

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT VE ÇOK DUVARLI KARBON  
NANOTÜP KATKILI POLİKARBONAT/POLİ (LAKTİK ASİT)  
KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**GÖZDE ÖNCEL**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT VE ÇOK DUVARLI**  
**KARBON NANOTÜP KATKILI POLİKARBONAT/POLİ**  
**(LAKTİK ASİT) KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**GÖZDE ÖNCEL**

**Doç. Dr. Ayşe AYTAÇ**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Doç. Dr. Erdinç Doğanç**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Doç. Dr. Ali Sinan Dike**  
**Jüri Üyesi, Adana Bilim ve Teknoloji Üni.** .....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, rGO ve MWCNT dolgu maddelerinin PC/PLA matrisi üzerine etkileri ve özellikleri incelenmiştir. Çalışma ayrıca literatürde ilk defa rGO/MWCNT hibrit dolgularının PC/PLA matrisine eklenerek nanokompozit elde edilmesi ile özgündür.

Çalışmalarım süresince tüm sabrı ve güleryüzünü hiçbir zaman eksik etmeyen, kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana her zaman destek olan değerli danışman hocam Doç.Dr.Ayşe AYTAÇ'a,

Bu tez çalışmasını FLY-2021-2481 nolu yüksek lisans projesi kapsamında destekleyen Kocaeli Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Polimer laboratuvarında her türlü konuda bana destek olan laboratuvar arkadaşlarıma,

Beni her zaman motive etmeye çalışan ve her koşulda desteğini esirgemeyen canım Furkan SAMURA'ya,

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi olarak beni her zaman destekleyen, her koşulda yanımda olan canım annem ve canım babama sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Haziran-2021

Gözde ÖNCEL

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT .....	ix
GİRİŞ .....	1
1.GENEL BİLGİLER .....	4
1.1.Polimerik Nanokompozitler .....	4
1.2.Tez Çalışmasında Kullanılan Malzemeler .....	6
1.2.1.Poli (laktik asit) (PLA) .....	6
1.2.2.Polikarbonat (PC) .....	8
1.2.3.PC/PLA karışımları .....	10
1.2.4.Karbon nanotüp (CNT).....	11
1.2.5.Grafen .....	12
1.3.Çalışmada Kullanılan Üretim Teknikleri .....	14
1.3.1.Ekstrüzyon .....	14
1.3.2.Enjeksiyonlu kalıplama .....	15
1.4.Numunelerin Karakterizasyonu İçin Kullanılan Yöntemler .....	16
1.4.1.Çekme testi .....	16
1.4.2.Diferensiyel taramalı kalorimetre (DSC) .....	17
1.4.3.Termogravimetrik analiz (TGA) .....	19
1.4.4.Reoloji analizi.....	19
1.4.5.Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	21
1.4.6.Geçirimli elektron mikroskobu (TEM).....	22
1.4.7.Isıl iletkenlik .....	23
2.LİTERATÜR TARAMASI.....	24
3.MALZEME VE YÖNTEM.....	29
3.1.Malzemeler.....	29
3.2.Yöntem .....	30
3.3.Numune Bileşimleri .....	30
3.4.Nanokompozitlerin Hazırlanması .....	31
3.5.Nanokompozitlerin Karakterizasyonu.....	32
3.5.1.Çekme testi .....	32
3.5.2.Diferensiyel taramalı kalorimetre (DSC) .....	33
3.5.3.Termogravimetrik analiz (TGA) .....	34
3.5.4.Isıl iletkenlik ölçümleri.....	35
3.5.5.Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	35
3.5.6.Geçirimli elektron mikroskobu (TEM).....	35
3.5.7.Reoloji analizi.....	36
4.BULGULAR VE TARTIŞMALAR .....	37

4.1.Çekme Testi.....	37
4.2.Diferensiyel Taramalı Kalorimetri (DSC).....	41
4.3.Termogravimetrik Analiz (TGA).....	45
4.4.Reoloji Analizi .....	49
4.5.Isıl İletkenlik .....	54
4.6.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....	55
4.7.Geçirimli Elektron Mikroskobu .....	58
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	60
KAYNAKLAR .....	62
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	67
ÖZGEÇMİŞ .....	68



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Polimerik Nanokompozitlerin Kullanım Alanları .....	5
Şekil 1.2. Polikarbonatın kimyasal tepkimesi .....	9
Şekil 1.3. A) SWNCT kimyasal yapı, B) MWCNT .....	12
Şekil 1.4. Tek vidalı ekstrüder şematik gösterimi .....	14
Şekil 1.5. Enjeksiyonlu kalıplama şematik gösterimi .....	15
Şekil 1.6. Çekme Cihazı ve Şematik Gösterimi .....	16
Şekil 1.7. Gerilim-gerinim eğrisi .....	17
Şekil 1.8. DSC şematik gösterim .....	18
Şekil 1.9. Tipik DSC grafiği .....	18
Şekil 1.10. TGA şematik gösterim .....	19
Şekil 1.11. Reoloji şematik gösterim .....	20
Şekil 1.12. Farklı malzemelerin reolojik davranışları .....	20
Şekil 1.13. SEM şematik gösterim .....	21
Şekil 1.14. TEM şematik gösterim .....	22
Şekil 3.1. Nanokompozit Üretiminde Kullanılan Ekstrüder .....	31
Şekil 3.2. Nanokompozit Üretiminde Kullanılan Enjeksiyonlu Kalıplama .....	32
Şekil 3.3. Enjeksiyon cihazında kullanılan kalıplar .....	32
Şekil 3.4. Instron markalı çekme cihazı .....	33
Şekil 3.5. DSC Cihazı .....	34
Şekil 3.6. TGA Cihazı .....	35
Şekil 3.7. Reometre Cihazı .....	36
Şekil 4.1. Örneklerin Çekme dayanımı değerleri .....	38
Şekil 4.2. Örneklerin kopmada uzama değerleri .....	40
Şekil 4.3. rGO içerikli nanokompozitlerin DSC eğrileri .....	44
Şekil 4.4. MWCNT içerikli nanokompozitlerin DSC eğrileri .....	44
Şekil 4.5. rGO/MWCNT karışımı içeren nanokompozitlerin DSC eğrileri .....	45
Şekil 4.6. rGO içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri .....	47
Şekil 4.7. MWCNT içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri .....	47
Şekil 4.8. rGO/MWCNT içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri .....	48
Şekil 4.9. rGO içerikli nanokompozitlerin kompleks viskoziteleri .....	50
Şekil 4.10. rGO içerikli nanokompozitlerin depo ve kayıp modül grafikleri .....	50
Şekil 4.11. MWCNT içerikli nanokompozitlerin kompleks viskoziteleri .....	51
Şekil 4.12. MWCNT içerikli nanokompozitlerin depo ve kayıp modül grafikleri .....	52
Şekil 4.13. rGO/MWCNT içerikli nanokompozitlerin kompleks viskoziteleri .....	53
Şekil 4.14. rGO/MWCNT içerikli nanokompozitlerin depo ve kayıp modül grafikleri .....	53
Şekil 4.15. Isıl İletkenlik grafiği .....	55
Şekil 4.16. Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 70PC/30PLA, b) PC/PLA/0,5rGO, c) PC/PLA/1rGO, d) PC/PLA/3rGO .....	56
Şekil 4.17. Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 70PC/30PLA, b) PC/PLA/0,5MWCNT, c) PC/PLA/1MWCNT, d) PC/PLA/3MWCNT .....	57

Şekil 4.18. Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 70PC/30PLA,  
b)PC/PLA/0,25rGO/0,25MWCNT,.c)PC/PLA/0,5rGO/0,5MWCNT,  
d) PC/PLA/1,5rGO/1,5MWCNT .....58

Şekil 4.19. Nanokompozitlerin TEM görüntüleri a) PC/PLA/0,5rGO, b)  
PC/PLA/0,5MWCNT, c)PC/PLA/0,25rGO/0,25MWCNT..... 59



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. PC'nin kimyasal ve mekanik özellikleri.....	9
Tablo 3.1 Tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve özellikleri.....	29
Tablo 3.2. Hazırlanan nanokompozitlerin bileşimleri.....	30
Tablo 4.1. Çekme Testi Sonuçları.....	37
Tablo 4.2. Üretilen örneklerin DSC Sonuçları.....	43
Tablo 4.3. TGA Sonuçları.....	46
Tablo 4.4. Örneklerin Isıl iletkenlik katsayıları .....	55





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$T_{\text{onset}}$	: Bozunmanın başladığı sıcaklık, (°C)
$T_{\text{max}}$	: Bozunma hızının maksimum olduğu sıcaklık, (°C)
$T_{\text{endset}}$	: Bozunmanın sona erdiği sıcaklık, (°C)
$T_g$	: Camı geçiş sıcaklığı, (°C)
$T_{10}$	: %10'luk bozunma sıcaklığı (°C)
$\Delta H_f$	: Erime entalpisi, (J/g)
$T$	: Sıcaklık, (°C)
$T_{cc}$	: Kristalizasyon sıcaklığı (°C)
$CO_2$	: Karbondioksit

### Kısaltmalar

DSC	: Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri)
MWCNT	: Multi-walled carbon nanotube (Çok duvarlı karbon nanotüp)
PC	: Polikarbonat
PLA	: Poli(laktik asit)
rGO	: Reduced Graphene Oxide (İndirgenmiş Grafen Oksit)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SWCNT	: Single-walled carbon nanotube (Tek duvarlı karbon nanotüp)
TGA	: Thermal Gravimetric Analysis (Termal gravimetrik Analiz)

# İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT VE ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP KATKILI POLİKARBONAT/POLİ (LAKTİK ASİT) KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Poli (laktik asit) (PLA), petrol kaynaklı polimerlere alternatif olarak kullanılabilen pek çok uygulama alanına sahip, biyobozunur bir polimerdir. İyi mekanik dayanıma sahip olmasının yanı sıra kırılma ve düşük tokluk gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. PLA'nın zayıf özelliklerini iyileştirmek için literatürde polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polikarbonat (PC) gibi çeşitli polimerler ve dolgu maddeleri ile karışımları çalışılmaktadır. PC/PLA karışımları son yıllarda elektronik sektöründe ilgi görmüş ve cep telefonları gibi ürünlerde kullanılmıştır. Bu nedenle PC/PLA karışımından biyobozunurluğun yanında yüksek mekanik ve elektriksel özellikler beklenmektedir. Bu çalışmada, 70/30 oranında PC/PLA karışımı matris olarak kullanılmıştır. PC/PLA matrisinin özelliklerini iyileştirmek amacıyla dolgu maddesi olarak indirgenmiş grafen oksit (rGO), çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve rGO/MWCNT karışımları kullanılmıştır. Dolgu maddeleri PC/PLA matrisi içerisine belli oranlarda eklenerek nanokompozitler elde edilmiştir. rGO ve MWCNT dolgu maddeleri tek dolgu ve karışım (hibrit dolgu) olarak PC/PLA matrisi içerisine ağırlıkça %0,5-1-3 oranlarında eşit miktarlarda eklenerek nanokompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Nanokompozitler, çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyonlu kalıplama kullanılarak üretilmiştir. Nanokompozitlerin mekanik, termal, reolojik ve morfolojik özelliklerini belirlemek için üretilen nanokompozitlere çekme testi, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), reoloji analizi, ısıl iletkenlik ve SEM gibi karakterizasyon testleri uygulanmıştır. Nanokompozitlere eklenen tek ve hibrit dolguların belirli oranlarının mekanik, termal ve morfolojik özelliklere olumlu etki ettiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNT), İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO), Nanokompozit, Polikarbonat, Poli (laktik asit).

## **INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF REDUCED GRAPHENE OXIDE AND MULTIWALLED CARBON NANOTUBE ADDITIVE POLYCARBONATE / POLY (LACTIC ACID) COMPOSITES**

### **ABSTRACT**

Poly (lactic acid) (PLA) is a biodegradable polymer that can be used as an alternative to petroleum-derived polymers. In addition to having good mechanical strength, it has some disadvantages such as brittleness and low toughness. To improve the weak properties of PLA, various fillers, and polymers such as polyethylene, polypropylene, and polycarbonate (PC) as the blend of PLA have been studied in the literature. PC/PLA have attracted attention in the electronics industry and have been used in products such as mobile phones. Therefore, high mechanical and electrical properties are expected from the PC/PLA blend as well as biodegradability. In this study, 70/30 ratio PC/PLA was used as a matrix. Reduced graphene oxide (rGO), multi-walled carbon nanotube (MWCNT) and rGO/MWCNT (hybrid filler) mixtures were used as fillers to improve the properties of the PC/PLA matrix. The nanocomposites were produced by adding fillers in certain proportions into the PC/PLA. The nanocomposite was produced by adding rGO and MWCNT fillers as a single filler and a mixture in equal amounts of 0.5-1-3 wt% into the PC/PLA. Nanocomposites were prepared by using twin screw extruder and injection moulding. Characterization tests such as tensile test, differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), rheology analysis, thermal conductivity and SEM were applied to determine the mechanical, thermal, rheological and morphological properties of nanocomposites. It is concluded that certain proportions of single and hybrid fillings added to the nanocomposites have a positive effect on mechanical, thermal and morphological properties.

**Keywords:** Multi-walled carbon nanotube (MWCNT), Reduced Graphene Oxide (rGO), Nanocomposite, Polycarbonate, Poly (lactic acid).

## GİRİŞ

Polimerler günlük hayatımızın her alanında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Günümüzde kullanılan polimerlerin çoğu petrol kaynaklı olarak türetilmiştir. Petrol türevli polimerler doğada biyolojik olarak parçalanamazlar. Bu durum araştırmacıları, biyolojik olarak parçalanabilen polimerler üzerine araştırma ve çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Poli (laktik asit) (PLA) biyobozunur bir polimerdir ve petrol türevli polimerleri elde etmek için kullanılan yöntemler kullanılarak üretilebilir. PLA, günümüzde birçok alanda yaygın kullanım alanına sahiptir. Tıbbi cihazlarda; biyolojik olarak parçalanması öngörülen vidalar, pimler, çubuklar ve plakalarda, şişelerde, plastik filmlerde kullanılmaktadır. PLA vücutta bozunabilme özelliğine sahip olduğundan, son yıllarda dikiş iplikleri ve implant teknolojisinde de kullanılmaktadır (Rogers, 2015).

PLA iyi mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra; zayıf işlenebilirlik ve düşük tokluk gibi eksikliklere sahiptir. PLA'nın plastikleştiriciler ya da farklı polimerler ile harmanlaması sonucu zayıf özelliklerinde iyileşmeler görülmektedir. PLA'nın düşük mekanik özelliklerini güçlendirmek amacıyla yapılan harmanlama çalışmalarından birisi de Polikarbonat (PC) ile PC/PLA karışımları üretmektir (Imre, Renner, & Pukanszky, 2013), (Qu, Bu, Pan, & Hu, 2018).

Polikarbonat (PC), iyi mekanik özelliklere sahip bir mühendislik plastiğidir. Mükemmel tokluk ve yüksek ısı direncine sahiptir. Sert özellikte olmasının yanı sıra kırılğan değildir, esnek yapıdadır ve darbelere karşı dayanıklıdır (Urtekin, 2019). PC, PLA gibi biyobozunur özelliğe sahip değildir, aksine doğada zor bozunan yapıya sahiptir. PC'nin PLA ile harmanlanması ile PC'nin biyobozunurluk özelliğinin iyileştirilebileceği düşünülmektedir.

PC/PLA karışımları, otomotiv, cep telefonları, elektronik aletler gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Helmenstine, 2018). PC/PLA karışımlarının eksikliği ise bu iki polimerin uyumsuz polimerler olmalarıdır. Uyumlaştırıcı ya da katkı maddeleri

kullanarak PC/PLA karışımları uyumlu hale getirilir. Son zamanlarda, PC/PLA matrisinin uyumunu artırmak, ısıl ve elektriksel özellikleri iyileştirmek amacıyla karbon nanotüpler (CNT) kullanılarak çalışmalar yapılmaktadır (Urtekin, 2019).

Karbon nanotüpler üzerinde çok fazla araştırma ve çalışma yapılmış dolgu maddesidir. Karbon nanotüpler bir veya birden fazla eş merkezli silindirin içe içe geçmesi ile oluşur. Tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) olmak üzere sınıflandırılır. SWCNT'ler bir tane grafen levhadan oluşan silindir içerirken; MWCNT'ler birden fazla grafen levhalarının içe içe geçerek oluşturduğu silindirik yapılardır. İyi derece elektrik iletkenliği ve mükemmel ısıl iletkenlik özelliğine sahiptir. Karbon nanotüpler, polimer karışımlarının özelliklerini iyileştirmek için literatürde birçok çalışmada kullanılmıştır (Urtekin, 2019).

İndirgenmiş grafen oksit, oksijen miktarı azaltılmış grafen oksit formudur. Grafen elde edilmesi için çeşitli yollar arandığından grafen oksitin, rGO'ya indirgenmesi günümüzde herkesçe bilinen bir yöntemdir. rGO genellikle düşük maliyetle yeterli miktarda grafen üretme kolaylığı nedeniyle, büyük miktarda malzeme gerektiren uygulamalarda seçilebilir. rGO üretildikten sonra, malzemeyi farklı uygulamalarda spesifik kullanım için işlevselleştirmenin yolları vardır. rGO'yu çeşitli kimyasallarla işleme tabi tutarak veya rGO'yu diğer iki boyutlu malzemelerle birleştirerek, yeni bileşikler oluşturarak, bileşiğin özelliklerini ticari uygulamalara uyacak şekilde geliştirmek mümkündür (Helmenstine, 2018).

Bu tez çalışmasının amacı, PC/PLA karışımının özelliklerini rGO, MWCNT dolgu maddelerini tek dolgu ve hibrit dolgu şeklinde PC/PLA matrisine ilave edilerek özelliklerinin geliştirilmesidir. Elde edilen nanokompozitlerin termal, mekanik, reolojik ve morfolojik özelliklerinin belirlenmesidir.

Tez çalışmasında, PC/PLA matrisine rGO ve MWCNT dolgu maddeleri çift vidalı ekstrüderde eriyikten karıştırma yöntemi kullanılarak eklenmiştir. Daha sonra üretilen nanokompozitlerin test örnekleri enjeksiyonlu kalıplama yöntemi ile hazırlanmıştır. Nanokompozitlerin test örnekleri kullanılarak termal, mekanik, reolojik ve morfolojik karakterizasyon testleri ile nanokompozitlerin özellikleri incelenmiştir.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Tezin giriş kısmında, malzemelerin kullanım amacı ve yapılacak çalışmanın amacına değinilmiştir. Bölüm 1’de nanokompozit üretiminde kullanılan polimerler ve dolgu maddeler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Nanokompozit üretim yöntemleri, uygulanan karakterizasyon testleri ve bu süreçte kullanılan cihazlar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 2’de kullanılan matris polimerleri, rGO ve MWCNT ile yapılan literatür araştırmalarına yer verilmiştir. Bölüm 3’te nanokompozit üretiminde kullanılan polimer ve dolgu maddelerinin tedarik edildiği firma bilgileri, kimyasal özelliklerine, nanokompozit üretim yöntemine ve karakterizasyon test koşullarına değinilmiştir. Bölüm 4’te nanokompozitlere uygulanan test sonuçları hakkında bilgiler verilmiştir. Tek dolgu ve hibrit dolgu sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bölüm 5’te tez çalışmasında elde edilen sonuçlar derlenmiştir.

## 1. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde; tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler, nanokompozitlerin elde edilmesinde kullanılan üretim yöntemleri ve nanokompozitlerin termal, mekanik, reolojik ve morfolojik özelliklerini belirlemede kullanılan karakterizasyon yöntemleri ile ilgili teorik bilgiler verilmiştir.

### 1.1. Polimerik Nanokompozitler

Günümüzde yaygın olarak kullanılan malzeme çeşitleri, metaller, seramikler, polimerler ve kompozitlerdir.

Kompozit malzemeler genel olarak metal, seramik ve polimer esaslı matrisler kullanılarak hazırlanırlar. Hazırlanan kompozitlerin yaklaşık %90'ı ise polimer matrislidir. Polimer malzemelerin kullanım alanlarının artması ile mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi için literatürde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar doğrultusunda, polimerik malzemelere elyaf veya tanecik boyutlu katkı maddeleri takviye edilmektedir. Polimer kompozitlere çeşitli elyaf yapılı katkı maddeleri eklenerek özellikleri incelenmektedir. Tanecik boyutlu takviyeler nano boyuttaki dolgu maddelerinden oluşursa, bu maddelerin polimer matrisi içerisine eklenmesi ile elde edilen yapı polimerik nanokompozit olarak adlandırılır. Nano boyutlu tanecikler ise genellikle 1-100 nm boyutuna sahiptir (Şen, Palancıoğlu, & Aldaş, 2010).

Nanokompozitlerin benzer mikro yapıya sahip kompozitlere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna çoğu çalışmada varılmıştır. Nanometrik boyuta sahip parçacıklar ile takviye edilmiş nanokompozitler yüksek yüzey/hacim oranına sahiptir ve yüksek enerjili yüzeyler sağlarlar. Polimerik kompozitlere nano boyutlu dolgu maddelerinin eklenmesi ile istenen sonuç, nanopartiküllerin yüksek arayüzey enerjisi ile polimer matrisi arasında kuvvetli bağ oluşmasıdır. Kompozit teorisine göre, dolgu maddesi ve polimer matrisi arasında bağın iyileştirilmesi/güçlendirilmesi ile

mekanik özelliklerde de olumlu sonuçlar elde edilir. (Ciprari, Jacob, & Tannenbaum, 2006).

Polimer nanokompozitler, eriyik harmanlama, yerinde polimerizasyon gibi üretim teknik kullanılarak elde edilebilir. Üretilen nanokompozitte istenen özelliklere göre farklı üretim yöntemleri seçilebilir. Yaygın olarak ise, ekstrüzyon ve enjeksiyonlu kalıplama teknikleri beraber kullanılarak nanokompozitler üretilir. Nanokompozit üretiminde istenen, dolgu malzemesinin polimer matris içerisinde düzenli dağılımıdır.

Polimer nanokompozitler günlük hayatımızda her alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerik nanokompozitlerin kullanım alanları Şekil 1.1.'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Polimerik Nanokompozitlerin Kullanım Alanları

Polimerik nanokompozitleri otomotiv sanayi, uçak sanayi ve yaygın olarak elektronik sanayinde elektronik ekipmanların üretiminde kullanılmaktadır. Malzemede istenen özelliğe göre polimer matrisine eklenen katkı maddelerinin türü değişmektedir. Elektronik ekipmanlarda, ısı iletkenlik özelliğinin iyi olması istendiğinden bu yönde polimer matrise eklenecek katkı maddeleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Polimer malzemeler yalıtkan özelliğe sahiptir. İletken özellikteki dolgu maddeleri ile harmanlanarak iletken polimerik nanokompozitler elde edilmiştir. Otomotiv sanayinde



kullanılan polimerik nanokompozitler dış şasi, panel vb. gibi alanlarda kullanılır. Toyota yaptığı polimerizasyon çalışması ile kil eklenerek elde ettiği nanokompozitin saf polimere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna varmıştır (Şen, Palancıoğlu, & Aldaş, 2010).

Saf polimerlere kıyasla nanokompozitler daha iyi mekanik ve termal özelliklere sahiptir. Ayrıca nano boyutlu taneciklerin polimer matrisine eklenmesi ile geleneksel yapıli kompozitlere oranla ısıli iletkenlik, termal kararlılık ve mekanik özelliklerdeki iyileşmeler daha iyidir (Şen, Palancıoğlu, & Aldaş, 2010).

## **1.2. Tez Çalışmasında Kullanılan Malzemeler**

### **1.2.1. Poli (laktik asit) (PLA)**

PLA, laktik asitten (2-hidroksi propiyonik asit) sentezlenen bir polimerdir. Poli (laktik asit) (PLA), şeker kamışı, mısır nişastası gibi yenilenebilir kaynaklardan üretildiği için günümüzde kullanılan çoğu termoplastik polimerden farklıdır. PLA'nın diğer polimerlere göre birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Bu özellikler aşağıda sıralanmıştır.

-Düşük CO<sub>2</sub> salınımına sahiptir.

-%20-30'lara kadar daha fazla enerji tasarrufu sağlaması.

-Biyobozunma ve geri dönüşüme elverişli olması,

-PLA'nın yapısı istenen mekanik ve fiziksel özelliklere göre yapılandırılabilmesi (Dizdar, 2012).

Plastiklerin çoğu, yenilenemeyen petrol kaynaklı üretimlerle ya da çeşitli polimerizasyon uygulamaları ile türetilmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan türetilen polimerlere, PLA gibi, "biyoplastikler" adı verilir.

Petrol kaynaklı olarak türetilen polimerlerin çoğu doğada biyolojik olarak parçalanamaz, PLA gibi biyokütleden türetilen polimerler biyolojik olarak parçalanma özelliğine sahiptir. Ayrıca PLA, yaygın olarak kullanılan polipropilen (PP), polietilen (PE) ve polistiren (PS) polimerlerine benzer özellikler gösterir.

PLA; petrol kaynaklı polimerleri üretmede kullanılan teknikler kullanılarak türetilir. Biyoplastik olarak adlandırılan en büyük üretim hacmine sahip olan

polimer Termoplastik Nişasta (TPS)'dir. PLA ise TPS'den sonra en yaygın üretim hacmine sahip ikinci polimerdir (Lin, Deng, Lin, & Wang, 2014).

PLA, günümüzde birçok alanda yaygın kullanım alanına sahiptir. Tıbbi cihazlarda; biyolojik olarak parçalanması öngörülen vidalar, pimler, çubuklar ve plakalarda, şişelerde, plastik filmlerde kullanılmaktadır. PLA vücutta bozunabilme özelliğine sahip olduğundan, son yıllarda dikiş iplikleri ve implant teknolojisinde kullanılmaktadır. Dikkat edilmediler ki, her ne kadar vücutta bozunabilen özelliğe sahip olsa da buhar ya da sıvısının solunması ya da vücutta emilimi toksik özelliğe sahip olabilir.

PLA birkaç farklı türe sahiptir. Bunlar; Düzenli Poli-L-laktik Asit (PLLA), Rasemik PLLA (Poli-L-laktik Asit), Poli-D-laktik Asit (PDLA) ve Poli-DL-laktik (PDLLA)'dir. PLA'nın her türü farklı özelliklere sahiptir, yenilenebilir kaynaktan üretilmeleri ise bu türlerin ortak benzer özellikleridir (Lin, Deng, Lin, & Wang, 2014).

Petrol kaynaklı olarak türetilen polimerlere alternatif olması ve düşük maliyet özelliği ile PLA popüler bir polimer olma yolundadır. Biyoplastik olan PLA, doğada kolay parçalanır ve çok yönlü özelliğe sahiptir. Petrol türevli geleneksel polimerin doğada bozulması birkaç yüzyıl ya da yıl alabilirken, okyanusta kalmış bir PLA bazlı şişe 6-24 yıl arasında bozunabilir. Günümüzde su şişeleri ve plastik kaplar yaygın olarak kullanılmaktadır. PLA'nın doğada kolay olarak parçalanabilmesi şişeler ve kaplar için iyi bir alternatiftir. PLA, elektronik parçası olarak da kullanılmaktadır ve doğada kolay bozunmasına karşın elektronik olarak oldukça sağlam bir yapıya sahiptir (Lin, Deng, Lin, & Wang, 2014).

Polimerler ısı ile şekillendirilebilme özelliklerine göre termoplastik ve termoset olarak sınıflandırılır. PLA ise termoplastik polyesterdir. Termoplastik polimerler ısı ile kolayca şekillendirilebilirler, erime noktalarında sıvı hale gelirler, soğutulduklarında ve bir bozunmaya maruz kalmadıklarında tekrardan ısıtılarak işlem görebilirler. Termoplastiklerin bu özellikleri ile PLA, enjeksiyonlu kalıplama tekniği kullanılarak kalıplanabilir. Termoset polimerler ise sadece bir kez ısıtma işlemi yapılabilir, ikinci ısıtma işlemine maruz kaldıklarında kömürleşebilirler. Bu özellikleri sebebi ile geri dönüşüm açısından dezavantaja sahiplerdir.

PLA, düşük camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. PLA'nın bu özelliği yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılması açısından uygun değildir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırsa eğer, malzemenin yumuşaması ya da deformasyonu ile karşılaşılır (Rogers, 2015). PLA, yüksek mekanik dayanım ve elastik modülü gibi mükemmel özelliklere sahip olmasının yanı sıra, zayıf darbe dayanımı, kolay yanma özelliği ve düşük ısıl sapma sıcaklığını (Heat Deflection Temperature-HDT) (<60) sahiptir (Lin, Deng, Lin, & Wang, 2014).

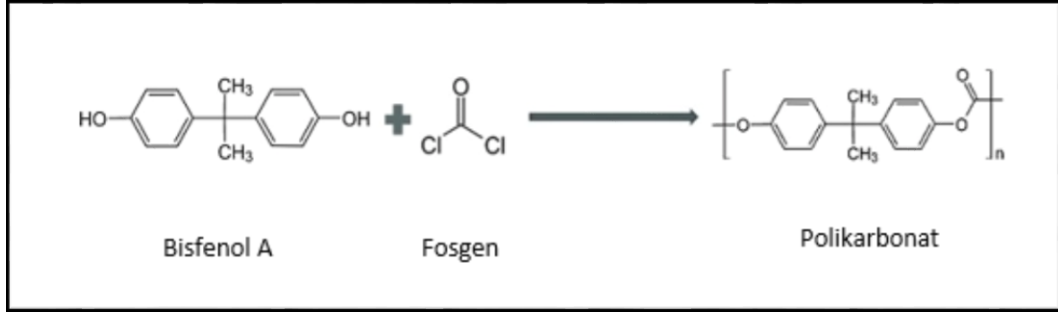
PLA biyolojik olarak parçalandığında su ve karbondioksit açığa çıkarır. Zayıf işlenebilirlik, yaşlanmaya karşı savunmasız olması ve yavaş kristallenme PLA'nın kullanılabilirliğini sınırlandıran özelliklerdendir (Wang, Tang, & Sheng, 2019). Bir polimerin iyi mekanik özellikler gösterebilmesi kristallenme ile doğrudan bağlantılıdır. PLA yavaş kristallenme özelliğine sahip olduğundan, kristalizasyon miktarını arttırmak ve bu sayede mekanik davranışlarını geliştirmek için birçok çalışma yapılmaktadır. En yaygın çalışma alanlarından birisi, PLA içerisine nano boyuttaki dolgu maddelerinin eklenmesidir (Terzopoulou, Klonosa, & Kyritsis, 2019).

PLA düşük termal kararlılığa sahiptir. Bu özelliği, PLA'nın rastgele zincir ayrılmalarına ve moleküler ağırlığının düşmesine neden olur. Molekül ağırlığında azalma olması, PLA'nın erime noktasını da düşürür. PLA, ekstrüzyon, enjeksiyonlu kalıplama ve üfleli şekil verme gibi işleme teknolojilerinden biri ile işlem gördüğünde, moleküler ağırlığındaki azalmalardan dolayı özelliklerinde de azalma görülür. Bu özelliklerini iyileştirmek için farklı polimerler ya da dolgu maddeleri ile harmanlanmaktadır (Chakraborty, Valapa, & Katiyar, 2018).

### **1.2.2. Polikarbonat (PC)**

Polikarbonat (PC), mühendislik plastiği olarak bilinmektedir ve cam ile karşılaştırıldığında ışığın %90'ından fazlasını cam kadar iyi iletme özelliğine sahiptir. Şeffaflık ve darbe direnci istenen ticari uygulamalarda (örneğin; kurşun geçirmez cam) tercih edilmektedir. Tıbbi cihazlarda, otomotiv aksamlarında, gözlüklerde, biberonlarda, dijital disklerde (CD, DVD), elektrik elektronik bileşenlerde, yapı-inşaat ve ev aletleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (URL-1).

Bisfenol A (BPA; C<sub>15</sub> H<sub>16</sub> O<sub>2</sub>) ve fosgenin (COCl<sub>2</sub>) kondenzasyon polimerizasyonu ile elde edilir (URL-1). Şekil 1.2’de PC’nin elde edilme tepkimesi verilmiştir.



Şekil 1.2. Polikarbonatın kimyasal tepkimesi

Polikarbonat şeffaf özelliğe sahip amorf bir termoplastik polimerdir. PC, 140 °C’ye kadar sertlik ve -20 °C’ye kadar tokluğa sahiptir. PC, termal olarak 135 °C ye kadar kararlıdır. PC’ye alev geciktirici maddeler eklenerek ısı direnci geliştirilebilir (URL-2). Yüksek camsı geçiş sıcaklığı (150 °C), ısı direnci, tokluk, optik şeffaflık, boyutsal kararlılık, elektriksel ve tutuşmaya karşı direnç gibi iyi özelliklere sahiptir. PC’nin iyi özelliklerinin yanı sıra, kullanımını kısıtlayan durumlar da vardır; çentik veya çatlaklara karşı çok hassastır. Çentik veya çatlaklara karşı olan hassasiyeti, PC içerisine kauçuk ya da çeşitli katkı maddeleri eklenmesi ile iyileştirilebilmektedir (Wang, Li, & Zhang, 2017).

PC, farklı polimerler ile karışım oluşturarak kullanılabilir. Otomotiv sektöründeki uygulamalar için PC/ABS veya PC ile polyesterler karışımları oluşturulur. PC karışımları genellikle, ekstrüzyon, enjeksiyonlu kalıplama, yapısal köpük kaplama, vakum şekillendirme ve üfleli kalıplama yöntemleri kullanılarak elde edilir (URL-2). Tablo 1.1’de PC’nin kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.1. PC’nin kimyasal ve mekanik özellikleri

Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	70-80
Çentikli Darbe Direnci (kJ/m <sup>2</sup> )	60-80
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m.K)	0.19-0.22
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,20

### 1.2.3. PC/PLA karışımları

İki ya da daha fazla polimerin harmanlanması ile polimer karışımları elde edilir. PLA'nın iyi mekanik özelliklerinin yanı sıra düşük tokluk, akış davranışı ve ısı direnci özelliklerini iyileştirebilmek için PC ile harmanlanır. PLA biyobozunur polimer iken PC doğada biyolojik olarak parçalanamaz. PC/PLA karışımlarının hazırlanması ile saf polimerlere göre iyi mekanik, termal ve morfolojik özelliklere sahip biyobozunur bir karışım elde edilmek istenmektedir. PC/PLA karışımları ambalaj malzemesi plastiğinden elektronik ekipmanlara kadar her alanda kullanılabilir.

PC ve PLA polimerleri birbiri ile uyumsuz özelliktedir. PC/PLA karışımlarında düşük arayüzey yapışması, faz ayrışması gibi problemler görüldüğü için mekanik özellikleri de zayıftır. Literatürde yapılan çalışmalarda, PC/PLA karışımı içerisine üçüncü bir bileşen eklemesi ile zayıf özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Uyumlaştırma işlemi, arayüzey yapışmasını arttırmak, fazlar arasındaki dağılmış fazın boyutunu küçültmek ve yapısal kararlılığı sağlamak amacıyla yapılır (Yemişçi & Aytaç, 2017).

Fijutsi ve Toray şirketleri, dizüstü bilgisayarlarda kullanmak için ağırlıkça 50PC/50PLA karışımı hazırlamışlardır. Bu çalışmada, PC/PLA karışımlarında ağırlıkça %50'den fazla PC bulunması ile proses sıcaklığının 260-270°C olmasını gerektirdiği sonucuna vardılar. Uyumlaştırıcı eklenmemiş PC/PLA karışımları düşük esnekliğe ve düşük yumuşama sıcaklığına sahiptir. PC/PLA karışımı içerisine takviye malzemelerinin eklenmesi ile sertliğinin ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır. PC/PLA karışımının esnekliği ve yumuşama sıcaklığı karışımdaki PLA miktarına bağlıdır (Yuryev, 2016).

Hazer ve arkadaşları, PC/PLA karışımlarını farklı oranlarda harmanlayarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kopma-uzama sonuçları değerlendirildiğinde %40 ve daha az PC içeren karışımların kopma uzamalarının, %50 ve üzeri PC içeren karışımlarla kıyasladıklarında oldukça düşük uzama gösterdiklerini gözlemlenmiştir. 70PC/30PLA karışımının kopmada uzama değerinin iyi olduğu sonucu varmışlardır (Hazer, 2018). Bu doğrultuda, yapılan bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında PC/PLA karışım oranı sabit tutularak 70PC/30PLA karışımları üzerinde çalışılmıştır.

#### 1.2.4. Karbon nanotüp (CNT)

Karbon nanotüp, grafenden yapılmış silindirik bir karbon yapısına sahiptir. Silindirik tüp altıgen yapıdan oluşmaktadır. Küçük boyutlara sahip olmasının yanı sıra oldukça güçlü bir yapıdır. Yüksek elastik modül ve yüksek dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Özel elektriksel yapısı ile metaller gibi yarı iletken özelliğe sahiptir (Beşergil, 2021). Karbon nanotüpler yapılarına göre, tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) olarak sınıflandırılır. Lijima tarafından 1991’de MWCNT, 1993’te ise SWCNT keşfedilmiştir (Eatemadi, Daraee, & Karimkhanloo, 2014).

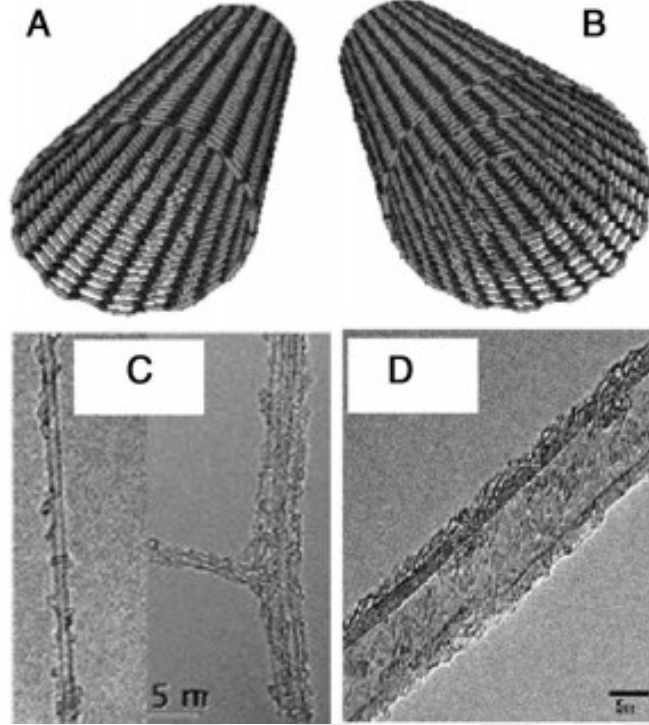
SWCNT, tek bir grafen yapısına sahiptir. 0,4 ila 2 nanometre çapında ve uzunluk olarak mikrometre boyutundadır (Beşergil, 2021). SWCNT’ler bir araya gelerek demet benzeri yapı oluşturabilir. Altıgen silindir etrafına sarılma şekline göre, zikzak(zigzag), koltuk (armchair) ve çiral (chiral) olarak isimlendirilirler (Eatemadi, Daraee, & Karimkhanloo, 2014). SWCNT, MWNCT’e göre daha esnek bir yapıya sahiptir.

Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)  $sp^2$  karbondan yapılmış, çapları 3-30 nm olan, uzunlamasına içi boş silindirik nano maddelerdir. Duvar kalınlıkları sabittir, iç kanalları düzdür ve MWCNT uçları fullerenler ile sınırlandırıldığı için bu kanala dışardan doğrudan erişilemez. Şekil 1.3’de SWCNT ve MWCNT kimyasal yapıları ve TEM görüntüleri verilmiştir.

CNT’ler ayrıca çok iyi mekanik, elektriksel, termal, kimyasal ve optik özelliklere sahiptir. CNT’ler çok kuvvetli ve sıkı malzemelerdir, yarı iletken elektrik özelliğine sahiptir. Çok iyi termal özelliğe sahiptir. Termal iletkenlik özelliği bakır ile karşılaştırıldığında, CNT oda sıcaklığında 6000 W/m·K iken bakırın termal iletkenliği 385 W/m·K’dir. CNT’nin çapı azaldıkça reaktif özelliği artar. CNT’ler optik aletlerde de kullanılmaktadır (Beşergil, 2021)

Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve tek duvarlı karbon nanotüpler aynı genel teknikler kullanılarak üretilbilirler. Birçok üretme tekniği geliştirilmiştir. Günümüzde en yaygın ve uygulanabilir sentez yöntemi katalitik kimyasal buhar biriktirme

(catalytic chemical vapor deposition-CVD)'dir. Ark boşaltma ve lazer ile aşındırma yöntemi de kullanılmaktadır (Urtekin, 2019).



Şekil 1.3. A) SWCNT kimyasal yapı, B) MWCNT kimyasal yapı, C) SWCNT TEM görüntüsü, D) MWCNT TEM görüntüsü

### 1.2.5. Grafen

Karbon allotropu olan elmas ve grafit, keşfedildiği zamandan beri en önemli malzemeler olarak bilinir. Grafit, standart koşullarda en kararlı karbon allotropudur ve üst üste dizilmiş altıgen karbon kristallerinden oluşur. Grafit keşfedildiği zamanlardan beri çok kullanılan malzemelerden biridir ve grafit, grafenin keşfedilmesine öncülük etmiştir. Grafen, tek katmanlı grafit olarak tanımlanır. Günümüzdeki en hafif ve en ince malzemedir. Yapısal özellikleri grafeni çok tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir. Yüksek mekanik mukavemet ( $\sim 40\text{N.m}^{-1}$ ), elastik modülü (1 TPa), güçlü elektriksel iletkenlik ( $10^{-6}\text{ S.cm}^{-1}$ ), güçlü ısı iletkenlik (5000 W/m.K), optik geçirgenlik ( $\sim 97,7\%$ ) ve geniş özgül yüzey alanı ( $\sim 2600\text{ m}^2/\text{g}$ ) özelliklerine sahiptir. Grafenin büyük ölçeklerde sentezi zordur. Grafenin bu zorluğu ile grafen oksit (GO) ve indirgenmiş grafen oksit (rGO) türevleri bulunmuştur. GO ve rGO'nun büyük ölçekli sentezi grafene kıyasla daha kolaydır.

Grafen Oksit (GO), grafenin oksitlenmiş formudur. Grafen oksit, grafenden daha önce keşfedilmiştir. 1859 yılında grafit oksidasyonu ve pul dökülme yöntemi ile sentezlenmiştir. Grafen oksit, grafen keşfinden önce önemsiz olarak bakılan bir malzeme olmuştur. Fakat grafen keşfedildikten sonra GO, grafen sentezinde kullanımı ile dikkat çekmiştir. Grafen oksit, sahip olduğu oksidasyon derecesine bağlı olarak düşük elektriksel iletkenlik özelliği gösterir. GO levhaları, Young modülü  $207.6 \pm 23.4$  GPa ve  $\sim 120$  MPa kırılma dayanımı ile yüksek mekanik dayanım özelliği sergiler. Ayrıca GO levhaları, hidrofilik özellik ve güçlü yüklü yapıları ile iyi dağılılabilirlik özelliğine sahiptir. Kararlı sulu dispersiyonlar oluşturabilirler. Bazı organik çözücüler içerisinde dağılırlar. Örneğin; Etilen glikol, dimetilformamid (DMF), n-metil-2-pirolidon (NMP), tetrahidrofuran (THF). Ayrıca, oksidasyondan kaynaklı optik şeffaflık özelliği gösterirler (Gürsel, 2020).

İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO), grafene benzer özellikte yapı elde edebilmek için GO'in indirgenmesi ile elde edilir. Kimyasal, termal ve foto-termal indirgeme yöntemleri kullanılarak rGO üretilebilir. rGO eldesi için, kimyasal indirgeme NaB, hidroksilamin, fenil hidrazin hidrat ve inorganik ajanlar kullanılarak gerçekleştirilir. Termal indirgenme ile rGO eldesi ise, inert veya indirgen bir atmosfer altında 300-2000°C sıcaklarda gerçekleştirilir. Foto termal indirgenme, lazer ışını ile 390 nm dalga boyları altında gerçekleştirilir. Kimyasal indirgenme termal indirgenmeye oranla daha avantajlıdır. Kimyasal indirgenme metodu ile daha düşük indirgenme seviyesine ulaşılabilir ve kullanılan kimyasallar toksik özelliktedir. Termal indirgenme metodunda ise kimyasal indirgenmeye kıyasla daha yüksek indirgenme görülür ve çevre dostudur. İndirgenmiş ürünlerdeki karbon/oksijen oranı ne kadar yüksekse elde edilen rGO'nun özellikleri işlem görmemiş grafenin özelliklerine daha yakındır (URL-2).

İndirgenmiş grafen oksit, elektriksel iletkenlik özelliği 6300 S/cm'e kadar artış gösterir. İndirgenme sırasında rGO'nun yüzey alanı da artar. rGO'nun Young modülü grafene benzer özellik gösterir ve 1 TPa değerine sahiptir. 13 GPa kırılma dayanımı ile güçlü mekanik dayanım gösterir. rGO yapısında bulunan C/O artması ile hidrofobik özellik gözlenir. Hidrofobik özelliği ile dağılılabilirlik özelliği de azalır. rGO, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, işlevselliğinin kontrol edilebilir olması, ucuz ve ölçeklendirilebilir hazırlama süreçlerine sahip olmasından dolayı birçok uygulama



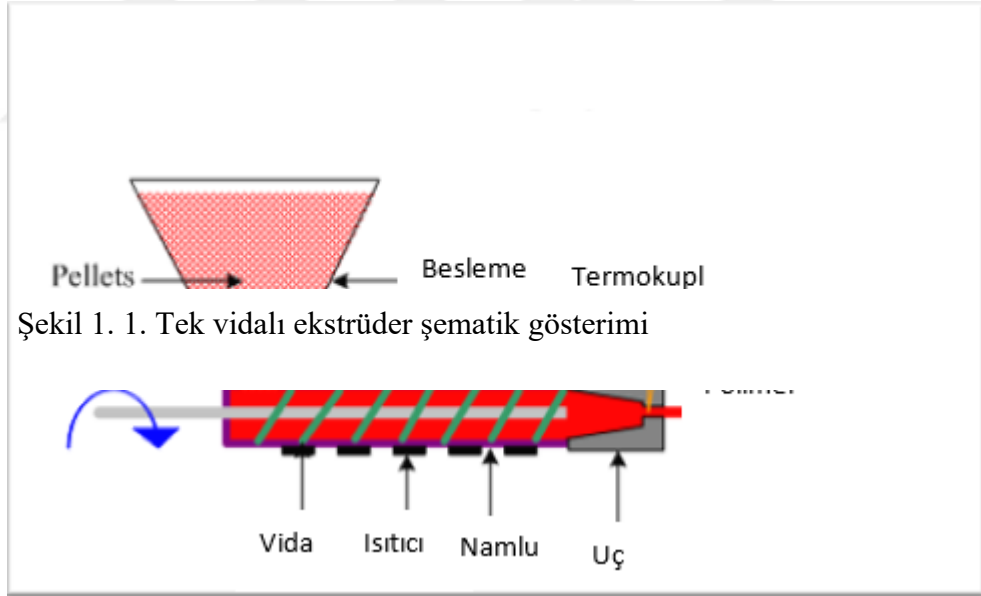
alanında tercih edilir. Lityum bataryalarda, güneş hücrelerinde, gaz sensörlerinde ve biyosensörlerde kullanılmaktadır (Gürsel, 2020).

### 1.3. Çalışmada Kullanılan Üretim Teknikleri

#### 1.3.1. Ekstrüzyon

Plastik işlemede en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri ekstrüzyondur. Levhalar, pencere çerçeveleri, kablolar, elektrik telleri ve ikincil işlemler için boru yapımında ekstrüzyon yöntemi kullanılır (Özdemir, 2020).

Ekstrüzyon cihazı dört bileşenden oluşur: (1) besleme hunisi, (2) namlu vidalı döner sistem, (3) kovan ve (4) uç kısımdaki kalıp. Ekstrüder, tek ve çift vidalı olarak ikiye ayrılır. Çift vidalı ekstrüzyon cihazı genellikle plastikler, dolgu maddeleri, renklendiriciler ve diğer bileşenleri karıştırmak için kullanılır (Kelly, 2020). Tek vidalı ekstrüder cihazının şematik gösterimi Şekil 1.4’de verilmiştir.



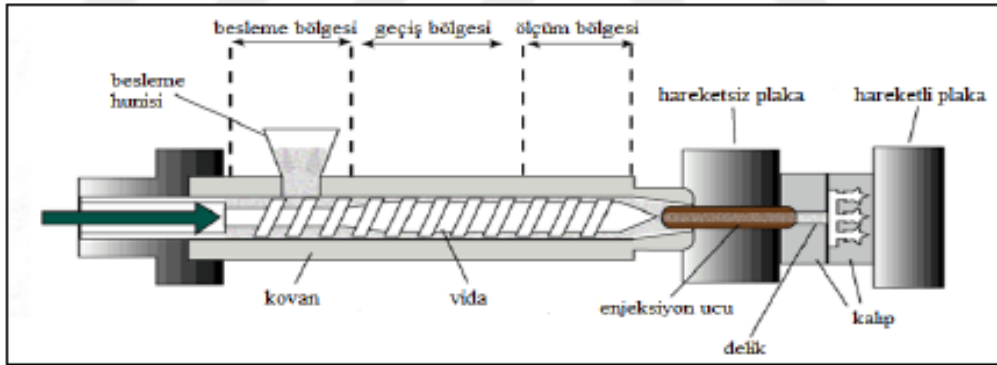
Şekil 1.4. Tek vidalı ekstrüder şematik gösterimi

Ekstrüzyon işleminde, besleme hunisinden pelet ya da kuru toz formunda polimer beslenir. Besleme hunisinden, kovana gelen polimer, ısıtıldığı ve eritildiği sıcaklık bölgelerinden geçer ve eriyen polimer cihaz sisteminde bulunan vidalar yardımı ile ekstrüder çıkışındaki kalıba (uç) itilir. Ekstrüzyon kovana, elektrikli ısıtıcılar ile kontrol edilen sıcaklık bölgelerinden oluşur. Ekstrüzyon sistemi içerisinde vidalar

bulunmaktadır. Vida, beslenen polimeri kovan girişinden kalıba doğru iten ekipmandır. Tek vidalı ya da çift vidalı sistemler kullanılır. Vidalar yardımıyla dönerak ilerleyen madde, ısıtıcı yardımı ile de ısınır. Vida ile itilen polimer kalıba belli bir basınç altında gelir ve kalıp şekline göre dışarı çıkar (Öztürk, 2020).

### 1.3.2. Enjeksiyonlu kalıplama

Polimerik malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bir diğeri enjeksiyonlu kalıplama yöntemidir. Enjeksiyon cihazları, enjeksiyon ünitesi ve sıkıştırma ünitesi olmak üzere iki bölümden oluşur. Enjeksiyon ünitesi, polimer peletinin beslendiği bir huni, kovan ve vida kısmından oluşan ekstrüder yapıdır. Sıkıştırma ünitesi, kalıbın açılıp kapanmasını sağlayan pistonlu bölümdür. Ekstrüder cihazında eriyik hale gelen polimer, vidanın itici gücüyle ekstrüder ucundan kalıba alınır. Ekstrüder ucundan kalıba alınan malzeme sıkıştırma ünitesinde basınç yardımıyla şekil alır (Öztürk, 2020). Enjeksiyonlu kalıplamanın şematik gösterimi Şekil 1.5’de verilmiştir.



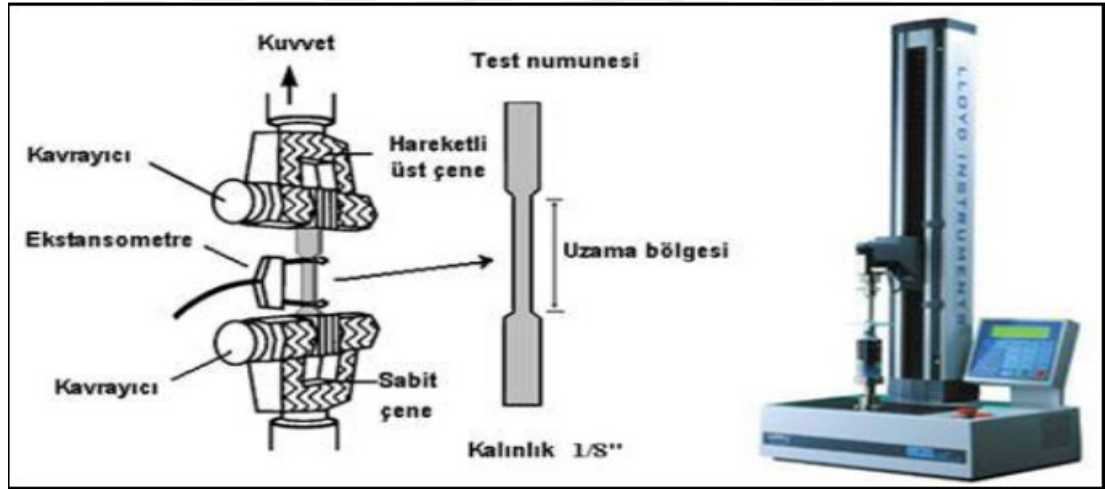
Şekil 1.5. Enjeksiyonlu kalıplama şematik gösterimi

Enjeksiyonlu kalıplamada üç ana adım vardır. Bu adımlar, doldurma, paketleme/bekletme ve soğutma şeklinde sıralanabilir. Doldurma aşamasında, erimiş polimer eriyiği istenen şekildeki soğuk kalıba hızla doldurulur. Paketle/bekletme aşamasında hem sıcaklık düşüşü hem de kristallenme meydana gelir, burada basınç yüksektir. Soğutma aşaması, ilk olarak kalıbın uç kısmının katılaşması ile başlar o andan itibaren kalıp içerisine malzeme giremez ya da çıkamaz. Kalıplama işlemi biten polimer malzeme kalıptan çıkarılır (Pantani, Coccorullo, Speranza, & Titomanli, 2005).

## 1.4. Numunelerin Karakterizasyonu İçin Kullanılan Yöntemler

### 1.4.1. Çekme testi

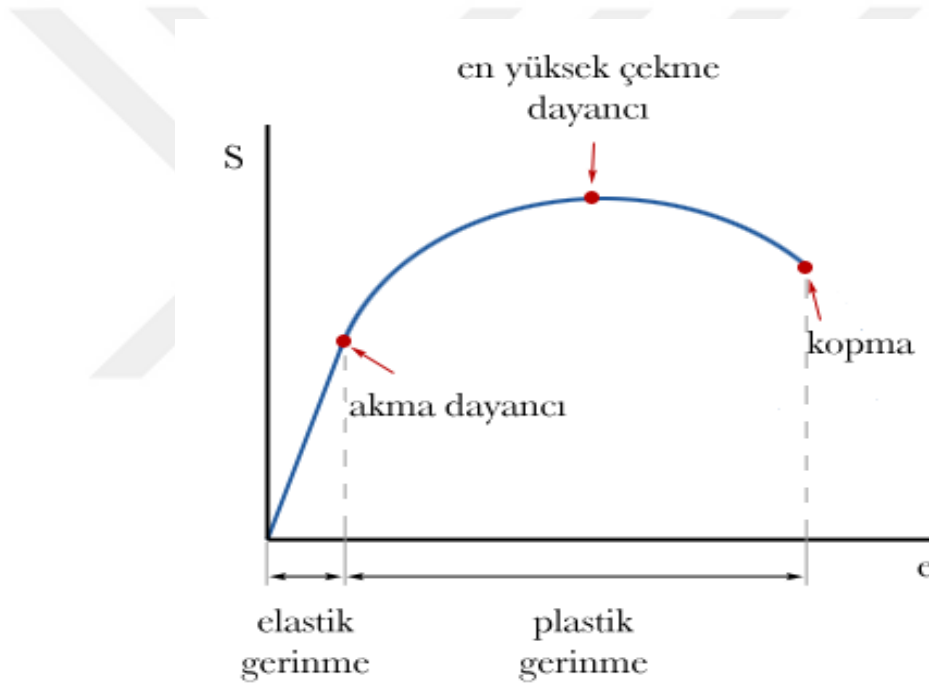
Çekme testi, polimerik malzemelerin, mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan karakterizasyon yöntemidir. Çekme testinin amacı, malzemenin uygulanan yük karşısında gösterdiği elastik ve plastik davranışı belirlemektir (Üçpınar, 2018). Çekme testi yapılan örneğe, orantısal limitte kuvvet uygulanırsa, kuvvet ortadan kalktıktan sonra örnek eski haline dönebilir. Bu duruma elastik deformasyon denir. Orantısal limitin üzerinde kuvvet uygulandığında ise kuvvet ortadan kaldırıldıktan sonra örnek eski haline geri dönemez. Bu duruma ise plastik (kalıcı) deformasyon denir. Çekme cihazı, alt ve üst çeneye sahiptir. Alt çene sabitken üst çene hareketlidir. Çekme cihazı ile ayrıca test sırasında malzemede meydana gelen uzama değeri belirlenir. Çekme cihazı uzamanın ölçüldüğü bir ekstansometreye de sahiptir (Çoban, 2017). Şekil 1.6'da çekme cihazının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.6. Çekme Cihazı ve Şematik Gösterimi

Çekme testi için, belirli standartlara göre ayarlanmış papyon (dogbone) adı verilen örnekler kullanılır. Örnek çekme cihazının alt ve üst çenesi arasına dikey şekilde yerleştirilerek sabitlenir. Çekme örneğinin çeneler arasında kaymasını engellemek için tutucular sıkı ve gergin olmalıdır. Çekme hızı ayarlanarak cihaz çalıştırılır. Örneğin boyunda gerçekleşen uzama miktarı ve örneğin uygulanan yüke karşı gösterdiği direnç cihaz tarafından kaydedilir.

Çekme testi sonucunda, örneğin kopmada uzama, kopma dayanımı, çekme dayanımı tokluk, rezilyans ve elastite modülü (Young's modül) belirlenir. Örnek kopana kadar cihaz sabit hızda gerilme uygulamaya devam eder. Şekil 1.7'de, polimerik malzemelere ait tipik bir gerilim-gerinim eğrisi verilmiştir. Kopma anındaki uzama, örneğin kopmada uzama miktarını, kopma sırasında ölçülen gerilme ise kopma dayanımını temsil eder. Çekme dayanımı ise, test sırasında ölçülmüş en yüksek gerilim değeridir. Grafiğin altında kalan kısım ise tokluk olarak ifade edilir. (Öztürk, 2020). Rezilyans ise, yalnızca elastik şekil değiştirme için harcanan enerji veya elastik şekil değiştirme esnasında malzemenin depoladığı enerjidir. Gerilme-gerinim eğrisinin elastik kısmının altında kalan alan ile belirlenir (URL-3).



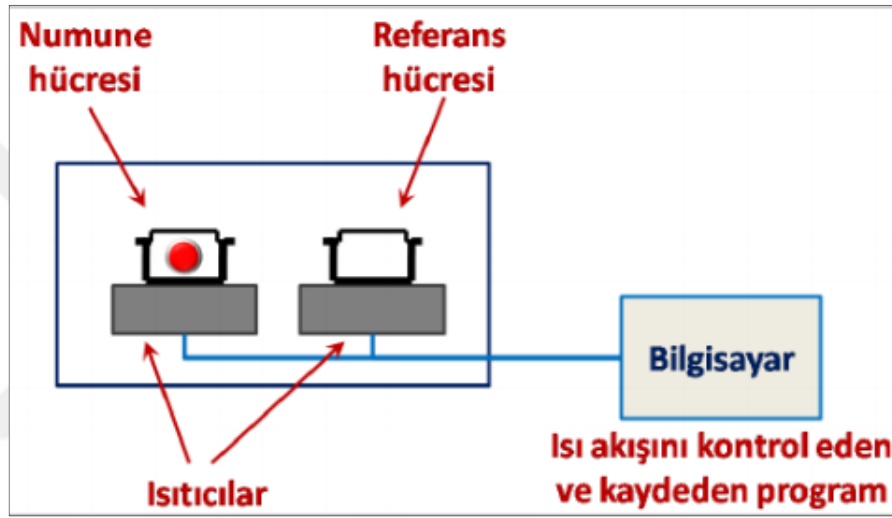
Şekil 1.7. Gerilim-gerinim eğrisi

#### 1.4.2. Diferensiyel taramalı kalorimetre (DSC)

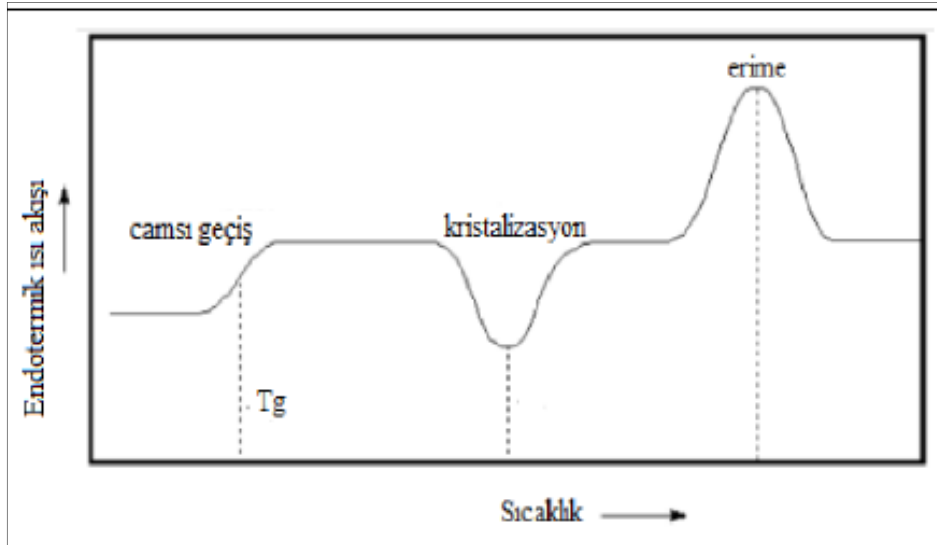
Diferensiyel taramalı kalorimetre (DSC), referans ve numune arasındaki ısı akışı farkını, kontrollü bir sıcaklık programıyla ölçen ve sıcaklığın fonksiyonu olarak inceleyen ısıl analiz yöntemidir. Şekil 1.8'de DSC cihazının şematik gösterimi verilmiştir. DSC cihazında, referans ve test numunesinin yerleştirildiği iki mini fırın vardır. Fırınlara konan küçük test kabına kroze (pan) adı verilir. Referans test kabı boş olarak cihaza yerleştirilirken, test numunesi belirli bir kütlede test kabı içerisine yerleştirilir. Ölçüm boyunca referans ve numunenin sıcaklıkları eşit tutulur.

DSC, kütlesi bilinen test numunesinin ısıtılması için gerekli ısı ve soğutulması için salıverilen enerji miktarını ölçer (Üçpınar, 2018).

DSC ile, polimerik malzemenin camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ), erime sıcaklığı ( $T_m$ ), kristalizasyon sıcaklığı ( $T_{cc}$ ), yüzde kristallenme miktarı ( $\%X_c$ ) ve entalpi değişimi ( $\Delta H_c$ ) belirlenir. Şekil 1.9’da tipik bir DSC grafiği verilmiştir. DSC analizi sırasında, referans sıcaklığı örnek sıcaklığından düşük olursa (endotermik) DSC cihazından pozitif sinyal elde edilir. Referans sıcaklığı örnek sıcaklığından büyük olursa (ekzotermik) cihazdan negatif bir sinyal elde edilir (Çoban, 2017).



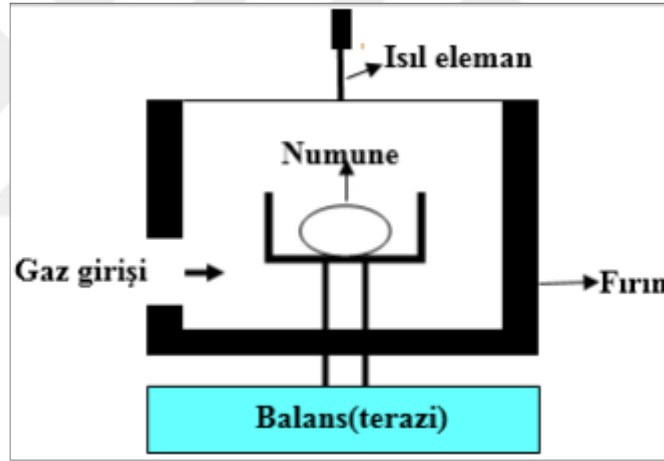
Şekil 1.8. DSC şematik gösterim



Şekil 1.9. Tipik DSC grafiği

### 1.4.3. Termogravimetrik analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA), belirli bir ısıtma hızında, belirli kütledeki numunenin, hava veya azot ortamında, hassas bir terazi üzerinde tartılarak, kütlesindeki değişimin artan sıcaklığa bağlı olarak incelendiği yöntemdir. Şekil 1.10'da TGA cihazının şematik gösterimi verilmiştir. Numune kroze içerisine konularak cihazın terazisine yerleştirilir. Sıcaklık ayarlanarak ölçüm yapılır. İstenilen sıcaklık aralığında analiz yapılabilir. Ölçüm sonucunda oksidasyon kaynaklı test numunesinde kütle kaybı yaşanabilir (Üçpınar, 2018). Ayrıca TGA ile, polimerik malzemeler içerisindeki dolgu maddelerinin analizi sağlanabilir. Analiz edilen polimerik malzeme, karışım halinde ise içerisinde bulunan dolgu maddelerinden kaynaklı olarak TGA grafiğinde birden fazla bozunma basamağı görünebilir (Urtekin, 2019).



Şekil 1.10. TGA şematik gösterim

### 1.4.4. Reoloji analizi

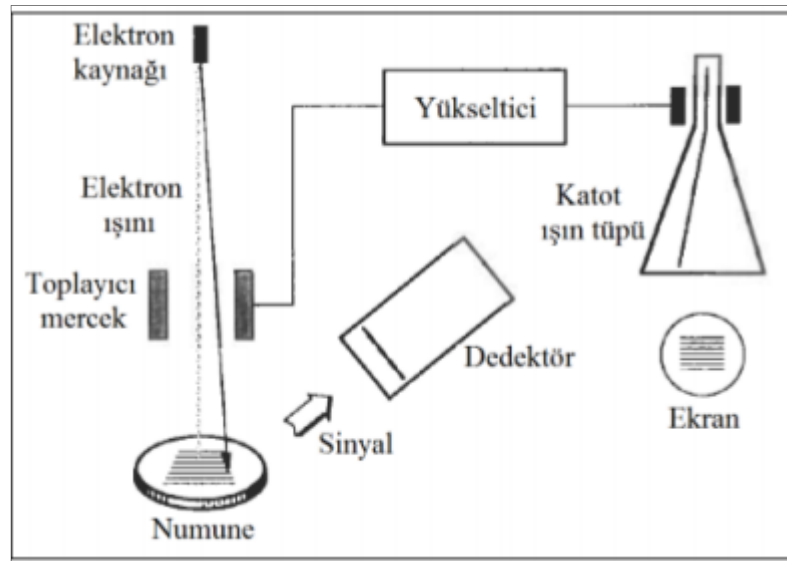
Reoloji, malzemelerin akış ve deformasyon özelliklerini tanımlamak için kullanılır. Eriyik harmanlama sırasında, malzemenin akış özelliklerinin belirlenmesi ve karışımın morfolojik yapısının incelenmesinde reoloji önemlidir. Malzeme belirli sıcaklık ve frekans aralığında salınımlı bir gerilime maruz bırakılarak yapısında meydana gelen deformasyon ölçülür. Reoloji ölçümünde, belirli frekans aralığında en yüksek gerilim değerinde malzeme sürekli artıp azalan gerinime maruz bırakılır. Gerilim ile gerinim arasında bir faz farkı oluşur. Bu faz farkı reoloji testi ile ölçülür (Erol, 2018). Reoloji analizinin şematik gösterimi Şekil 1.11'de verilmiştir.



Reoloji analizi ile malzemelerin, elastik gerilmenin gerinime oranı olan elastik modülü ( $G'$ ), viskoz gerilmenin gerinime oranı olan viskoz modülü ( $G''$ ) ve malzemenin deformasyona karşı gösterdiği toplam direnci temsil eden kompleks modül ( $G^*$ ) verileri elde edilir. Elastik modül değeri elastik tepkinin ya da malzemeye uygulanan bir deformasyon sonucunda depolanan enerjinin, viskoz modül ise viskoz tepkinin ya da malzemeye uygulanan bir deformasyon sonucunda kaybedilen enerjinin bir ölçüsüdür. Bu nedenle, elastik modülü depo modülü; viskoz modülü de kayıp modül olarak adlandırılmaktadır (Can, 2017).

#### 1.4.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, organik veya inorganik yapıdaki malzemelerin nanometre (nm) ve mikrometre ( $\mu\text{m}$ ) ölçeğinde görüntülerinin elde edilmesi ve malzemelerin karakterizasyonu için kullanılan tekniklerden birisidir. Örnek yüzeyine elektron ışınları yollanır ve taranır. Bu tarama sonucunda yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilir. SEM cihazındaki en önemli nokta ise, elektron ışını yollanan örneğin elektrik iletkenliğine sahip olması gerekliliğidir. Analiz yapılacak örnek, elektrik iletken özellikte değilse, yüzeyi altın veya paladyum gibi iletken malzemeler ile kaplandıktan sonra tarama işlemi yapılır. SEM cihazının Şekil 1.13'de şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.13. SEM şematik gösterim

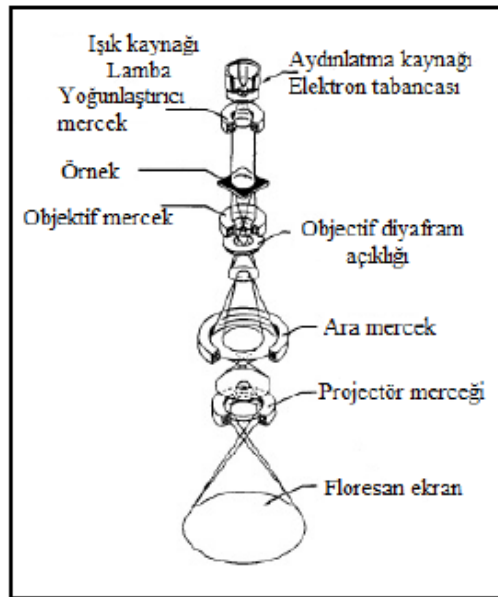


SEM cihazı üç ana bölümden oluşur; optik kolon, numune hücresi ve görüntülme sistemi. Sem analizinde, analizi yapılacak örnek üzerine, yüksek voltajlı ve hızlandırılmış elektronlar düşürülür ve örnek yüzeyi taranır. Tarama sırasında, elektronlar ve örnek atomları arasında meydana gelen etkileşimler sinyal yükselticiye iletilir. Yükselticiden geçen sinyaller ekrana aktarılarak SEM cihazında görüntüler elde edilir (Can, 2017).

#### 1.4.6. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)

Geçirimli elektron mikroskobu ile nanokompozitlerde bulunan dolgu maddelerinin dağılımı hakkında bilgi edinilebilir. Dolgu maddelerinin dağılımı nanokompozitlerin morfolojik, termal ve mekanik özelliklerine etki etmektedir (Chieng, 2014). Karbon karası, nanotüp, grafen kullanılan nanokompozitlerde, dolgu maddelerinin varlığını ve dağılımını görmek için kullanılan morfolojik karakterizasyon yöntemidir (Urtekin, 2019).

Geçirimli elektron mikroskobu ile çok ince örnek içerisinden yüksek enerjili elektronlar geçirilir ve görüntülenir (Şekil 1.14). Elektron demetleri yoğunlaştırıcı mercekle kullanılarak örnek üzerine düşürülür. Oluşan görüntü objektif mercekle yardımıyla belli bir noktaya odaklanır. Bu görüntü floresan ekran üzerine düşürülerek TEM görüntüleri elde edilmiş olur. Objektif mercekle yardımıyla görüntülerin boyutları değiştirilebilir.



Şekil 1.14. TEM şematik gösterim

#### 1.4.7. Isıl iletkenlik

Her malzeme ısıyı farklı şekilde depolar.  $C_p$  özgül ısı kapasitesi malzemelerin ısı enerji depolama ölçüsünü ifade eder. Su ve demirin özgül ısı kapasiteleri incelendiğinde,  $C_{p_{su}}$ : 4,18 kJ/kg.°C ve  $C_{p_{demir}}$ : 0,45 kJ/kg.°C'dir. Su demirden 10 kat daha fazla ısı depolar. Isıl iletkenlik ise malzemenin ısıyı iletme ölçüsüdür ve ısıl iletkenlik katsayısı  $k$  sembolü ile ifade edilir. Su ve demirin ısıl iletkenlik katsayıları incelendiğinde,  $k_{su}$ : 0,608 W/m°C ve  $k_{demir}$ : 80,2 W/m°C bu değerlere göre, demir sudan 100 kat daha iyi ısı iletir. Bir malzemenin ısıl iletkenliği birim sıcaklık farkında, birim uzunluk boyunca ısı transferinin oranıdır. Yüksek ısıl iletkenlik değeri malzemenin iyi ısı iletkeni olduğunu gösterirken, düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin ısı iletkenliği düşüktür veya ısıl olarak yalıtkan malzemelerdir (Kök, 2006).

Isı transferi katı yüzey boyunca fonon, elektron ya da fotonlar ile sağlanır. Saf metallerde elektronlar daha baskındır. Yarıiletken malzemelerde fonon ve elektronların katkısı neredeyse aynıdır. Yalıtkanlarda ise elektronların katkısı önemsizdir (Kök, 2006).

Malzemelerin ısıl iletkenlik değeri ısı absorplamasıyla tanımlanabilir. Polimer malzemeler ısıyı fazla absorpladıkları için düşük ısıl iletkenlik değerine sahiptir. Polimerlerin ısıl iletkenliği Denklem (1.1) Debye denklemi ile hesaplanır.

$$k = \frac{C_p \cdot v \cdot l}{3} \quad (1.1)$$

$C_p$  özgül ısı kapasitesi,  $v$  fononun hızı,  $l$  ise foton ortalama serbest yolunu ifade eder. Polimerlerin çoğu için ortalama serbest yol ( $l$ ) değeri oldukça düşüktür. Polimerlerin ısıl iletkenlik özelliği, sıcaklık, kristallik, makro moleküllerin oryantasyonu gibi birçok farklı parametreden etkilenir. Fonon polimerlerin ısıl taşıyıcısı olarak bilinir (Beyaz & Öksüz, 2021).

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, yapılan yüksek lisans tez çalışmasına yönelik literatürdeki bulunan bilimsel çalışmalar özetlenmiştir. Literatürde PLA ve PC'nin matris olarak, GO ve MWCNT'nin nanokatki olarak kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca GO/MWCNT'nin karışım halinde kullanıldığı nanokompozit üretimi yapılan çalışmalar araştırılmış ve bulunan çalışmalar sunulmuştur.

Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Poli (laktik asit)-nişasta karışımını çözelti döküm yöntemi ile hazırlanmıştır. Arayüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla PLA-nişasta karışımı içerisine grafen oksit (GO) eklemesi yapmışlardır. PLA-nişasta karışımına eklenen GO, maleikanhidrit ile aşılansmış ve dodesilamin ile modifiye edilmiştir. Elde edilen nanokompozitin kimyasal yapısı ve morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla, Termogravimetrik Analiz (TGA), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), X-ray Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) ve Geçirimli Elektron mikroskopisi (TEM) karakterizasyon testleri uygulanmıştır. Çalışmada, kristalizasyon özelliği, yüzey ıslanabilirliği, termal kararlılığı, yaşlanma direnci, dinamik ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

PLA-nişasta karışımına eklenen fonksiyonelleştirilmiş GO (f-GO) ilavesi ile heterojen çekirdeklenme artmıştır. Ayrıca f-GO eklenmesi ile nanokompozitin UV koruma kapasitesi, yaşlanma direnci ve yüzey hidrofobikliği arttığı gözlenmiştir. PLA-nişasta karışımına az miktarda f-GO ilavesi depolama modülünü arttırmıştır. TGA analizine göre, nanokompozite f-GO eklenmesi ile karışımın termal kararlılığı önemli ölçüde geliştirilmiştir. XRD ve SEM analizi f-GO'nun matriste pul kristalli bir yapıda görüldüğünü göstermiştir (Wang & Sheng, 2019).

Hasheminejad ve arkadaşları, PLA/grafen nanokompozitlerinin ara yüzey karakteristikleri incelenmiştir. Saf haldeki PLA zayıf bir kırılma tokluğuna sahiptir ve bu özelliğinden dolayı biyomedikal alanlarda kullanımı sınırlı kalmıştır. Bu özelliği iyileştirmek için bu çalışma yapılmıştır. Çalışmada, PLA zincirlerine grafen aşılansmıştır. Grafen aşılansmış PLA zincirlere -COOH, -OH, -NH<sub>2</sub>, -CH<sub>3</sub> gibi küçük

fonksiyonel gruplar eklenmiştir. Daha sonra, örneklerin camsı geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>) belirlenerek, örneklerin mekanik davranışları ve nanokompozitlerin ara yüzey özellikleri incelenmiştir.

Çalışma sonuçlarına göre, Grafen aşılı PLA zincirlerine -COOH fonksiyonel grubunun eklenmesi kırılma tokluğunu %237 arttırmıştır. Grafen aşılı PLA zincirlerine sırasıyla -OH, -NH<sub>2</sub> ve -CH<sub>3</sub> eklendiğinde elde edilen kırılma tokluğu sonuçları %120, %146 ve %154 olarak bulunmuştur. Ayrıca -OH grubunun eklenme yüzdesi arttırıldığında kırılma tokluğunun %220 oranına kadar ulaştığı sonucuna varılmıştır (Hasheminejad & Montazeri, 2019).

Ferreira ve arkadaşları, Termoplastik nişasta (TPS)/PLA karışımına indirgenmiş grafen oksit (rGO) eklemişler ve nanokompozitin morfolojik yapısını incelemek için X-ray kullanılarak karakterizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bu çalışma da iki farklı oranda TPS/PLA karışımları hazırlamışlardır. Bu karışımlar, 70:30 TPS/PLA ve 30:70 TPS/PLA bileşimindedir. Her iki ölçekte de hazırlanan numunelere belirli oranlarda (%1-3-5-7) rGO eklemesi yapılmıştır. Üretilen örneklerin özelliklerin belirlenmesi için, Raman spektroskopisi, Küçük açılı X-ray taraması (SAXS), Dinamik Mekanik Analiz (DMA) ve biyobozunurluk testleri yapılmıştır. SAXS ile yapılan incelemelerde, elektriksel özellik ve kılcal reoloji hakkında da bilgi edinilmiştir. 70:30 TPS/PLA numunelerine %1 ve %3 oranında rGO eklenmesi ile karışım içinde rGO'nun daha iyi bir dağılım gösterdiği sonucuna varılmıştır. %5 ve daha fazla rGO eklenmesi durumunda yapısal özelliklerde bozulma meydana gelmiştir. 30:70 TPS/PLA numunelerinde ise PLA oranının fazla olması dağılmayı ve yapısal özellikleri kötü yönde etkilemiştir (Ferreria, Dahmouche, & Andrade, 2019).

Zhang ve arkadaşları, kovalent olmayan fonksiyonelleştirilmiş GO ile eriyik harmanlama metodu kullanılarak PLA/f-GO nanokompozitler elde etmişlerdir. Bu çalışmada, öncelikle GO tabakaları didodesil dimetil amonyum (DDAB) kullanılarak kovalent olmayan fonksiyonelleştirmeye tabi tutulmuştur. Daha sonra elde edilen fonksiyonelleştirilmiş GO (f-GO) ve PLA ile eriyik harmanlama yöntemi kullanılarak nanokompozitlerin üretimi yapılmıştır. Ağırlıkça %0,2 ve 0,5 f-GO eklenerek nanokompozitler hazırlanmış ve nanokompozitlerin mekanik davranışları incelenmiştir. Saf PLA, PLA/0,2f-GO ve PLA/0,5f-GO örneklerine çekme testi

uygulanmıştır. Çekme testi sonuçları incelendiğinde, saf PLA'ya göre PLA/0,2f-GO gerilme dayanımı 26,6 kat artmıştır. Ancak nanokompozite eklenen f-GO oranının artması ile gerilme dayanımında düşüşler görülmüştür. Bu bilgiler sonucunda, en iyi gerilme dayanımının PLA/0,2f-GO örneğinde sağlandığı sonucuna varılmıştır (Zhang, Geng, & diğ., 2018).

Wang ve arkadaşları, 2017 yılında yaptığı çalışmada, Polikarbonatın (PC) çentik ve çatlaklara karşı dayanımı arttırmak için indirgenmiş grafen oksit (rGO) ile eriyik harmanlama metodu kullanarak nanokompozit üretmişlerdir. Yapılan çalışmada ağırlıkça %0,03-0,07-0,1-0,3-0,7-1-3 rGO kullanarak PC/rGO nanokompozitleri hazırlanmıştır. Üretilen nanokompozit örneklerine, çekme ve çentikli darbe testi uygulanmıştır. Örneklerin, SEM ve TEM görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, en iyi gerilme kırılma tokluğunu ağırlıkça %0,03 rGO içeriğinde %89 oranında arttığını ve en iyi çentikli darbe dayanımının ağırlıkça %0,07 rGO içeriğinde %46 arttığı ve akma dayanımının %12 oranında arttığını göstermiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, PC matrisinin sertlik özelliğinin artırılmasında indirgenmiş grafen oksit kullanılmasının olumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir (Espositoa, Sansoneb, & diğ., 2018).

Saf grafen, yüksek spesifik yüzey alanı ve kuvvetli Van der waals kuvvetlerine sahip olan polimerler ile karışım oluşturduğunda aglomerat oluşturma eğilimindedir. Polikarbonat (PC) ile harmanlandığında bu durum sınırlayıcı bir özelliktir. Ayrıca şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, PC kompozitlerine saf grafen ya da GO eklenmesi ile mekanik özelliklerde çok iyi sonuçlar elde edilmemiştir. Genellikle gerilme kuvvetinde %10'dan fazla artış olmamış ve hatta saf PC'den daha kötü duruma gelmiştir. Su ve ark. 2019 yılında bu sınırlamayı en aza indirmek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, GO'nun sahip olduğu karboksil/hidroksil bağları ve PC'nin ester bağları arasında transesterifikasyon tepkimesi kullanılarak GO yüzeyi fonksiyonelliği değiştirilmiştir. Yeni elde edilen PC-graft-GO, PC matrisi içerisine dahil edilerek mekanik özelliklerde iyileştirme amaçlanmıştır. Çekme testi, SEM ve TEM görüntüleri, XRD ve Raman spektroskopisi incelenmiştir. Bunların sonucunda, oluşturulan PC/PC-graft-GO nanokompozitinde, ağırlıkça %0,1 PC-graft-GO eklenmesi durumunda gerilme mukavemetinde %49 artış ve young's modülünde

%47'lik bir artış gözlenmiştir. Ayrıca PC-graft-GO'nun çekirdekleştirici madde olarak kullanılabilmesi ve PC'nin kristallenmesini uyardığı bulunmuştur (Su & diğ, 2019).

Mohammadi ve arkadaşları yaptığı çalışmada, PC'nin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için iki farklı nano katkı maddesi ekleyerek nanokompozit elde etmişlerdir. Kullandıkları nano katkılar, organik nanokil (NC- Close 20A) ve Grafen oksit (GO)'dir. Çalışmada, ağırlıkça % (0,3-0,6-0,9) GO ve % (0,5-1-3) NC kullanılarak PC/NC ve PC/GO nanokompozitleri üretilmiştir. Hazırlanan nanokompozitlere basınç, çekme ve üç nokta eğilme testleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçlara göre, en iyi sonuçlar, PC/GO için ağırlıkça %0,6 ve PC/NC için %1 yükleme olduğu durumda gözlenmiştir. Daha yüksek konsantrasyonlarda ise topaklaşma (aglomerat) oluşumu ve nanokompozit yapısında bozunmalar meydana gelmiştir. Yapılan testlerin sonuçları incelendiğinde, elastik modülü, bükülme modülü, sıkıştırıcı ve gerilme-akma dayanımının arttırdığı görülmüştür. PC/0,6GO nanokompoziti saf PC ile karşılaştırıldığında, elastik modülü %28,30 ve gerilme akma dayanımı %11,45 oranında artmıştır. GO konsantrasyonu ağırlıkça %13 olarak kullanılan PC/GO nanokompozitinde ise elastik modülünün %13,57 ve gerilme akma dayanımının %8,44 arttığı görülmüştür (Mohammadi & diğ, 2019).

Urtekin'in yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, 70PC/30PLA karışımı içerisine çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT), MWCNT-COOH, MWCNT-OH, PC içerisine aşılansak oluşturulan graft MWCNT (PC-g-MWCNT) eklenerek nanokompozitler elde edilmiştir. Nanokompozitlerin termal, mekanik ve morfolojik özelliklerini belirlemek için çekme testi, DSC, TGA, ısı iletkenlik ve elektriksel iletkenlik testleri yapılmıştır. Çalışma da elde edilen sonuçlara göre, farklı işlevselliğe sahip MWCNT'ler farklı özelliklerde iyi sonuçlar göstermiştir. Yüksek dayanım istendiğinde saf MWCNT, yüksek ısı iletkenlik istendiğinde MWCNT-COOH ve yüksek elektriksel iletkenlik istendiğinde ise PC-g-MWCNT'nin PC/PLA matrisi içerisine eklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır (Urtekin, 2019).

Jang ve arkadaşları, PC/PLA kompoziti içerisine laktik asit ile fonksiyonelleştirilmiş MWCNT (La-g-MWCNT) ekleyerek nanokompozit elde etmiştir. Çalışmada, nanokompozitlerin reolojik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Dolgu maddesi olan MWCNT'nin, PC/PLA karışımındaki dağılımı arttırmak için modifikasyon işlemi

kullanılmıştır. PC/PLA/MWCNT nanokompoziti ile PC/PLA/La-g-MWCNT karşılaştırıldığında La-g-MWCNT eklenmiş nanokompozitin daha iyi elektriksel iletkenlik, daha iyi kompleks viskoziteye sahip olduğu sonucuna ulaşımlardır (Jang , Lee, & Kim, 2015).

Rostami ve arkadaşları, PLA'ya MWCNT ve grafen nanopalet ekleyerek nanokompozitler elde etmiştir. Nano dolgu maddeleri fonksiyonelleştirme işlemlerine tabi tutulmuştur. Fonksiyonelleştirme sonucu elde edilmiş, fCNTs ve GnPs nano dolguları tek dolgu ve karışım (hibrit) halinde PLA matrisine içerisinde belli oranlarda eklenmiştir. Nanokompozitlere, TGA, Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), X-ray (XRD) karakterizasyon testleri uygulanmıştır. SEM ile GnPs'lerin eklendiği nanokompozitlerde pul pul dökülme görünümü görülmüştür. Hibrit dolgu maddesine sahip nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır (Rostami, Nazockdast, & Karimi, 2016).

Chen ve arkadaşları, MWCNT ve GO dolgu maddelerini hibrit halinde PCL matrisine takviye ederek mekanik ve elektriksel özelliklerini incelemiştir. GO/MWCNT hibrit şeklinde kullanılması mekanik özellikleri iyileştirdiği bilinmektedir. Çalışmada, dolguların karışım oranları değiştirilerek, PCL/MWCNT, PCL/GO/MWCNT (2/1) ve PCL/GO/MWCNT (1/4) nanokompozitlerini hazırlamışlardır. Mekanik testler sonucunda, PCL/GO/MWCNT (2/1) diğer nanokompozitlere kıyasla daha iyi çekme dayanımı ve kopmada uzama sergilediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca PCL/GO/MWCNT (1/4) iyi elektriksel özelliğe sahip olduğunu raporlanmıştır (Chen, 2018).

Yapılan literatür incelemesi sonucu, PC/PLA matrisi kullanılarak nanokompozit üretimi gerçekleştirilen tek bir çalışmaya rastlanmıştır. Literatürde rGO ve rGO/MWCNT karışımını hibrit katkı olarak PC/PLA matrisinde kullanan bir çalışma da bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada MWCNT, rGO ve rGO/MWCNT karışımını hibrit katkı olarak PC/PLA karışımına eklenerek nanokompozitler üretilmiş ve üretilen nanokompozitlerin karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilerek, elde edilen özellikler kıyaslanmıştır.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. Malzemeler

Tez çalışması kapsamında kullanılan Poli (laktik asit), 2003D ticari adıyla Natureworks; Polikarbonat, PC-110 Wonderlite ticari adıyla Kempro firmasından temin edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan Çok Duvarlı Karbon Nanotüp, KNT-113 ticari adıyla, Grafen; İndirgenmiş Grafen Oksit Hazerfen Kimya Malzeme ve Enerji Tek. San. A.Ş. firmasında temin edilmiştir.

Yüksek lisans tez kapsamında kullanılan tüm malzemeler ve özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme	Ticari Adı ve Firma	Özellikleri
PLA	2003D Natureworks	Tg :50-55 °C Tm :150-155 °C MFI: 10-30 g/10 dak. (190 C. 2,16 kg)
PC	PC-110 Wonderlite Kempro	Yoğunluk: 1,2 g/cm <sup>3</sup> MFI: 12 g/10 dak. (300° C, 1,2 kg)
rGO	Hazerfen Kimya Malzeme ve Enerji Tek. San. A.Ş.	Faz: Nanotoz Yoğunluk: 0.05- 0.1(g/cm <sup>3</sup> ) Özgül yüzey alanı: 200-250 (m <sup>2</sup> /g)
MWCNT	KNT-113 Grafen	Dış çap: 10-30 nm Uzunluk: 13-30 mikron Safılık:> 90



### 3.2. Yöntem

### 3.3. Numune bileşimleri

Bu tez çalışması kapsamında, PC/PLA matrisine rGO ve MWCNT dolguları önce tek tek daha sonra karışım halinde eklenerek nanokompozitler elde edilmiştir. PC/PLA matrisi her nanokompozit için sabit tutularak 70PC/30PLA yükleme oranında kullanıldı.

PC/PLA matrisine eklenen tek dolgu ve hibrit dolgu ağırlıkça %0,5-1-3 oranında eklendi. Saf PC, Saf PLA, PC/PLA, tek dolgulu PC/PLA/rGO, PC/PLA/MWCNT ve hibrit dolgulu PC/PLA/rGO/MWCNT nanokompozitleri üretildi. Tablo 3.2’de çalışma kapsamında hazırlanan nanokompozitlerin bileşimleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Hazırlanan nanokompozitlerin bileşimleri

Örnekler	PC (%wt)	PLA (%wt)	rGO (%wt)	MWNCT (%wt)
PC	100	-	-	-
PLA	-	100	-	-
70PC/30PLA	70	30	-	-
PC/PLA/0,5rGO	69,65	29,85	0,5	-
PC/PLA/1 rGO	69,30	29,70	1	-
PC/PLA/3rGO	67,90	29,10	3	-
PC/PLA/0,5MWCNT	69,65	29,85	-	0,5
PC/PLA/1MWCNT	69,30	29,70	-	1
PC/PLA/3MWCNT	67,90	29,10	-	3
PC/PLA/0,25rGO/0,25MWCNT	69,65	29,85	0,25	0,25
PC/PLA/0,5rGO/0,5MWCNT	69,30	29,70	0,5	0,5
PC/PLA/1,5rGO/1,5MWCNT	67,90	29,10	1,5	1,5

### 3.4. Nanokompozitlerin Hazırlanması

Nanokompozitlerin üretiminde, kovan hacmi 15 cm<sup>3</sup> olan DSM Xplore markalı aynı yönde dönen çift vidalı ekstrüder cihazı kullanıldı. DSM Xplore markalı ekstrüder cihazı hem kesikli hem de sürekli olarak işletilebilmektedir. Ekstrüder cihazına beslenen ham maddeler belli bir sıcaklık ve vida hızında belirli sürede karıştırıldıktan sonra bir vana yardımıyla kafa kısmına yönlendirilir.

Tez çalışması kapsamında üretilen örnekler, laboratuvar ölçekli çift vidalı ekstrüder de eriyik harmanlama yöntemi ile hazırlandı. Örnek üretiminde kullanılan PLA, üretim öncesinde 80 °C'de 12 saat vakumlu etüvde nemi çekilmesi için kurumaya bırakıldı. Nanokompozitlerin, eriyik sıcaklığı 260 °C, vidaların dönme hızı ise 100 rpm ve eriyiğin ekstrüderde alıkonma süresi 3 dakika olarak belirlendi. Nanokompozit üretiminde kullanılan ekstrüder cihazı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Nanokompozit Üretiminde Kullanılan Ekstrüder

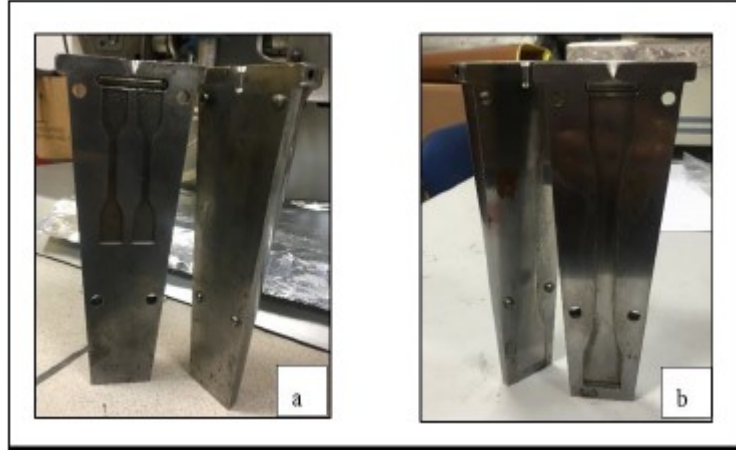
Eriyik hale gelen polimer karışımları DSM Xplore markalı Enjeksiyonlu Kalıplama Cihazı kullanılarak kalıplandı.

Nanokompozitlerin kalıplanma şartları; tabanca sıcaklığı 260 °C, kalıp sıcaklığı 45 °C ve kalıp basıncı 10 bar olarak belirlendi. Kullanılan enjeksiyonlu kalıplama cihazı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Enjeksiyonlu kalıplama işlemi sırasında, farklı analizler için farklı kalıplar kullanıldı. Çekme testi, DSC, TGA ve Reometre analizleri için Şekil 3.3a'da gösterilen kalıp kullanılırken, ısıl iletkenlik analizi için Şekil 3.3b'de gösterilen kalıp kullanıldı. Kullanılan her iki kalıp için de örneklerin üretim süreçleri aynıdır.



Şekil 3.2. Nanokompozit Üretiminde Kullanılan Enjeksiyonlu Kalıplama



Şekil 3.3. Enjeksiyon cihazında kullanılan kalıplar

### 3.5. Nanokompozitlerin Karakterizasyonu

#### 3.5.1. Çekme testi

Çekme testi polimerlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynayan test yöntemidir. Bu testte polimer çeşitleri genellikle çekme dayanımı, kopmada uzama miktarları ve çekme modüllerine göre kıyaslanmaktadır. Çekme testinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, bir polimerin tasarım sınırlarının belirlenmesi ve çeşitli polimerler içerisinde mekanik özelliği uygun olan polimer türünün seçimi yapılabilir (Arıcıoğlu & diğ., 2000).

Çekme testi Şekil 3.4'de verilen çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler test edilirken, çekme cihazının iki çenesi arasına gergin bir şekilde örnek

yerleştirildi ve dikey olarak çekme uygulandı. Çekme işlemi örnek kopana kadar devam etti. Çekme testi Instron marka çekme cihazında, ISO 527 A-3 standardında, 5 mm/dak çekme hızında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Her bir örnekten 5 numune test edilerek, sonuçların ortalama değerleri alındı. Çekme testi ile, örneklerin çekme dayanımı, % kopma uzama değerleri ve modül değerleri elde edildi.



Şekil 3.4. Instron markalı çekme cihazı

### 3.5.2. Diferensiyel taramalı kalorimetre (DSC)

Diferensiyel Taramalı Kalorimetre (DSC), polimerlerin ısıl özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden biridir. Numune ısıtıldığı, soğutulduğu ya da sabit sıcaklıkta tutulduğu sırada soğurulan ya da salınan enerji miktarını ölçer (Karoui, 2012).

DSC analizleri, Mettler Toledo DSC 1 cihazı (Şekil 3.5) kullanılarak azot ortamında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan tüm nanokompozitlerin DSC analizleri 25 °C'den 200 °C'ye çift ısıtmalı olarak 10 °C/dk. ısıtma ve soğutma hızında gerçekleştirildi.

DSC analizleri sonucunda, her örnek için DSC termogramları elde edildi. Camsı geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>), erime Sıcaklığı (T<sub>m</sub>), kristallenme sıcaklığı (T<sub>cc</sub>) ve entalpi değerleri (ΔH) termogramdan elde edildi.

DSC analiz sonuçları kullanılarak her örnek için yüzde kristalinite değerleri (%X<sub>c</sub>) hesaplandı. %X<sub>c</sub> değeri Denklem (3.1) kullanılarak belirlendi.



Şekil 3.5. DSC Cihazı

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_c}{(W_f) \times \Delta H_m^*} \quad (3.1)$$

$\Delta H_m$ ; erime entalpisini,  $\Delta H_c$ ; kristallenme entalpisini,  $(W_f)^*$ ; matristeki referans alınan polimerin nanokompozitlerdeki ağırlıkça yüzdesi,  $(\Delta H_m)^*$  ise yine hangi polimer referans alınmış ise onun tek bir kristalinin füzyon entalpi değeridir. Bu tez kapsamında PLA referans alınarak % kristalinite değerleri hesaplandı. Bu nedenle  $\Delta H_m^*$  değeri PLA için 93,7 J/g alınmıştır (Urtekin, 2019).

### 3.5.3. Termogravimetrik analiz (TGA)

Termogravimetrik Analiz (TGA) ile bir maddenin yapısında sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişen kütle kayıpları hakkında bilgi edinilir (Urtekin, 2019). Hazırlanan örneklerin analizinde Mettler Toledo markalı TGA cihazı kullanılarak, örneklerin bozunma başlangıç ve bitiş sıcaklıkları, maksimum bozunma sıcaklığı ve % kalıntı miktarı değerleri elde edildi. Çalışmada kullanılan TGA cihazı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. TGA testi 25 °C'den 800 °C'ye 10 °C/dk ısıtma hızı ile 20 ml/dk azot gazı beslemesi altında gerçekleştirildi. TGA analizinde yaklaşık 5-10 mg örnek kullanıldı.



Şekil 3.6. TGA Cihazı

#### 3.5.4. Isıl iletkenlik ölçümleri

Numunelerin ısı iletim katsayıları Sabancı üniversitesi Tümlleştirilmiş Üretim Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde hizmet alımı yolu ile yaptırılmıştır. Ölçümler Thermal Constants Analyser (TCA) Cihazı (HotDisk, TPS2500S) cihazı ile TS EN ISO 22007 standardına göre 24 °C'de gerçekleştirilmiştir.

#### 3.5.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

SEM analizi ODTÜ merkez laboratuvarında bulunan QUANTA 400F Field Emission SEM cihazında hizmet alımı yolu ile gerçekleştirildi. Kullanılan cihaz yüksek çözünürlüğe sahip olup, 1,2 nm çözünürlüktedir. Bu analizde farklı büyütme oranlarında görüntüleme yapılarak en iyi görüntü elde edilmeye çalışıldı. Görüntüleme, çekme testi sonucunda kopan numunelerin kırılma yüzeylerinden yapıldı.

#### 3.5.6. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)

Bu analiz ODTÜ merkez laboratuvarında yapıldı. SEM görüntüleri sonucu %0,5 orana sahip tek dolgu ve hibrit dolgulu örneklerle TEM uygulandı. 20-120 kV hızlandırıcı voltaj varlığında çalışan Lantan heksaborür elektron tabancalı, FEI marka Tecnai G2 Spirit Biotwin modelinde Yüksek Kontrastlı Geçirimli Elektron Mikroskobu (CTEM) ile analiz gerçekleştirildi. Birkaç büyütme oranı uygulandı. Numunenin herhangi bir yüzeyinden ultra mikrotomda kesit alınarak ölçüm için uygun boyutlara getirildi.

### 3.5.7. Reoloji analizi

Bu çalışmada Anton Paar marka reometre cihazı kullanıldı (Şekil 3.7). Reoloji analizi için 260 °C’de çalışıldı. Numuneler %8’lik gerilme genliği ile dinamik zaman taraması ile kontrol edildi. Bütün testler %8’lik gerilme genliğinde, sabit sıcaklık ve 0,01-1000 rad/sn frekans taraması aralığında yapıldı. Reometre fırını, ısıl bozulmadan kaçınmak için ölçüm esnasında kuru azot ile temizlendi. Bu analiz ile numunelerin kompleks viskoziteleri ( $\eta^*$ ), depolama modülü ( $G'$ ) ve kayıp modülü ( $G''$ ) değerlendirilmiştir.



Şekil 3.7. Reometre Cihazı

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

### 4.1. Çekme Testi

Üretilen nanokompozitlerin, mekanik özelliklerini incelemek amacıyla çekme testi uygulandı. Saf haldeki polimerler, PLA/PC karışımı, tek dolgu içeren nanokompozitler ve hibrit dolgu takviyeli nanokompozitlerin; çekme dayanımı, kopmada uzama değerleri ve Young's modül değerleri Tablo 4.1'de özetlenmiştir, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

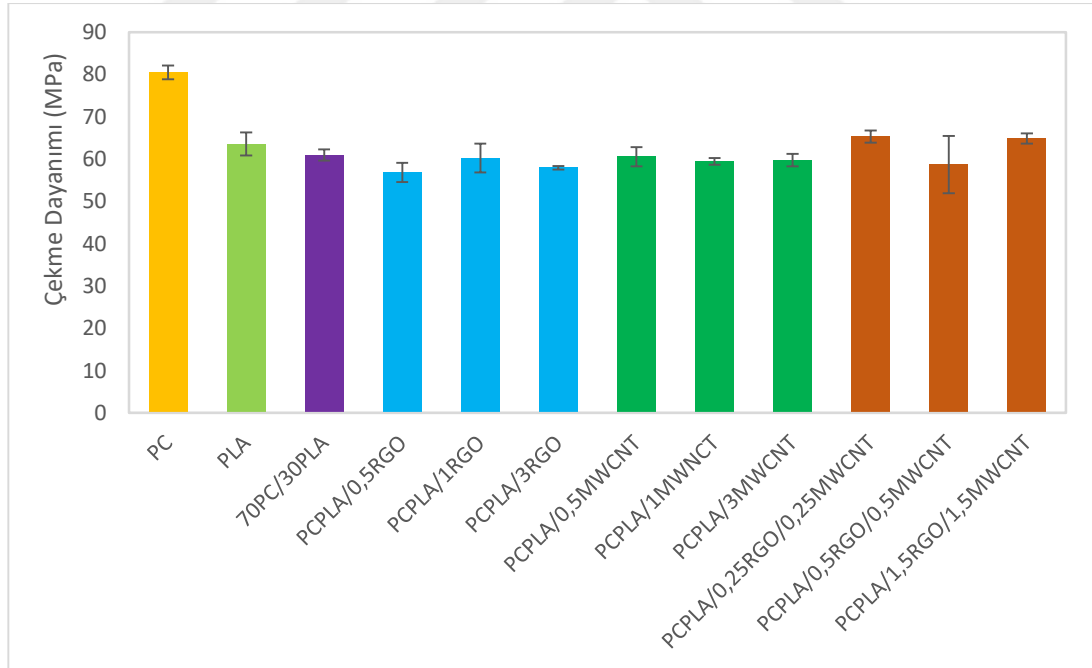
Tablo 4.1. Çekme Testi Sonuçları

NUMUNELER	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopmada Uzama (%)	Young's Modül (MPa)
PC	80,5	131	3505,4
PLA	63,6	6	5139,3
PC/PLA	<b>60,9</b>	158	3401,4
PCPLA/0,5rGO	56,8	112	3212,9
PCPLA/1rGO	60,3	121	2394,9
PCPLA/3rGO	57,9	67	2717,9
PCPLA/0,5MWCNT	60,5	144	1484,4
PCPLA/1MWCNT	59,4	132	1546,6
PCPLA/3MWCNT	59,7	13	3958,8
PCPLA/0,25rGO/0,25MWCNT	<b>65,3</b>	111	5390,1
PCPLA/0,5rGO/0,5MWCNT	58,7	7	4432,5
PCPLA/1,5rGO/1,5MWCNT	64,8	15	5004,0



Saf haldeki PC ve PLA'nın çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, PC 80,5 MPa, PLA 63,6 MPa değerine sahiptir. PC polimeri PLA'dan daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. 70PC/30PLA karışımı ise 63,6 MPa değeri ile saf haldeki PC ve PLA'nın arasında bir değerde çekme dayanımı sergilemiştir. Kopmada uzama değerleri karşılaştırıldığında, PC %131 uzama gösterirken, PLA %6 uzama göstermiştir. PC/PLA karışımı ise %158'lik bir uzama ile saf haldeki polimerlere göre daha yüksek bir kopmada uzama değeri sergilemiştir. Karışımın yüksek uzamasının sebebi literatürde, iki polimerin molekülleri arasındaki etkileşimin sonucu oluşan kopolimer yapısının etkisi olarak açıklanmaktadır (Kanzawa ve Tokumitsu, 2011). Young's modülleri karşılaştırıldığında, PC/PLA karışımının saf haldeki PC'nin modül değerine yakın bir modül değeri gösterdiği görülmüştür.

PC/PLA matrisine ağırlıkça %0,5-1-3 oranlarında tek dolgu rGO ve MWCNT takviyesi yapılarak nanokompozitler elde edilmiştir. Nanokompozitlerin çekme dayanımları Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Örneklerin Çekme dayanımı değerleri

Nanokompozit içerisine eklenen tek dolgu olarak rGO çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, %0,5 oranında rGO eklenmesi ile çekme dayanımında PC/PLA matrisine kıyasla düşüş görülmüştür. %0,5 ve %3 oranında rGO dolgusuna sahip olan nanokompozitlerin çekme dayanım değerleri neredeyse aynıdır ve sırasıyla 57,88 MPa

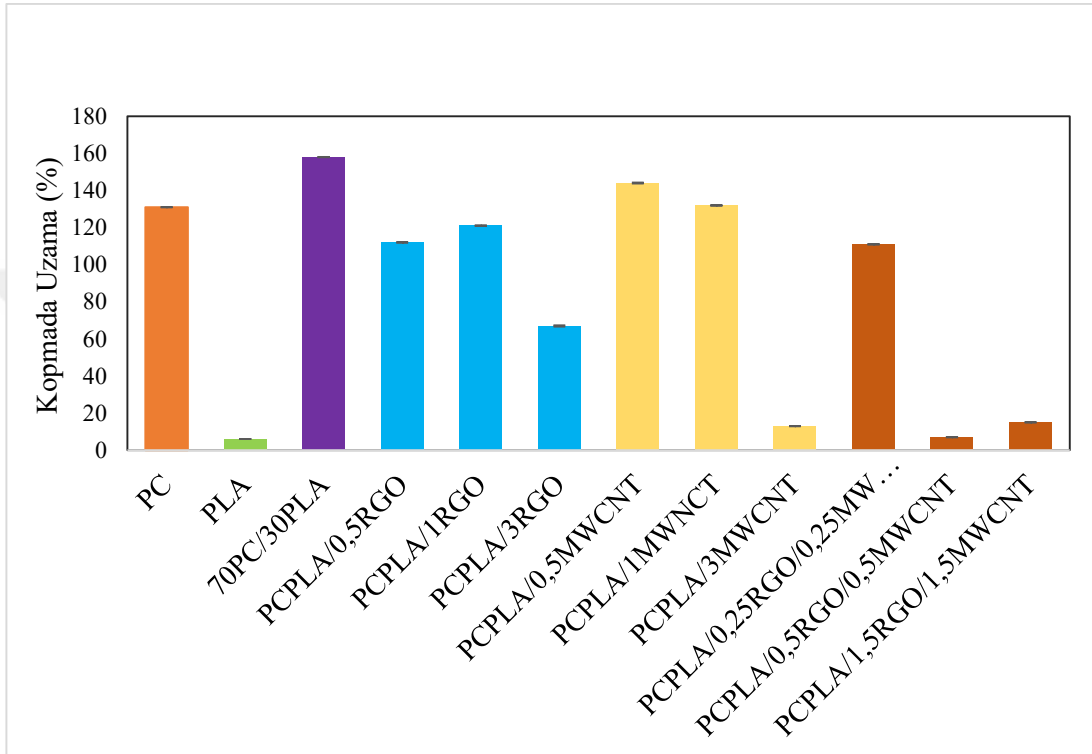
ve 57,99 MPa değerlerindedir. %1 rGO içeren nanokompozitin çekme dayanım değeri 60,28 MPa değerine sahiptir. Bu sonuçlar doğrultusunda, rGO dolgusunun tek dolgu olarak PC/PLA matrisine eklenmesi ile çekme dayanımında anlamlı bir iyileşme görülmemiştir denilebilir.

MWCNT'nin tek dolgu olarak PC/PLA matrisine eklenmesi ile, çekme dayanımları %0,5-1 ve 3 oranları için sırasıyla 60,54; 59,47 ve 59,77 MPa'dır. PC/PLA matrisinin dolgusuz çekme dayanımı ise 60,97 MPa'dır. MWCNT dolgusunun PC/PLA matrisi içerisine farklı oranlarda eklenmesi ile nanokompozitlerin çekme dayanımında rGO'daki gibi anlamlı bir iyileşme görülmemiştir.

Dolguların hibrit şeklinde PC/PLA karışımına eklenmesi ile çekme dayanımı %0,5 hibrit için 65,31 MPa'dır. PC/PLA matrisine %1 hibrit dolgu eklenmesi ile çekme dayanımında saf PC/PLA matrisine kıyasla düşüş görülmüştür. Hibrit dolgunun %3 olarak eklendiği nanokompozit çekme dayanımı ise 64,88 MPa'dır. Çekme dayanımı grafiğine göre (Şekil 4.1), nanokompozitlere eklenen hibrit dolgu ve tek dolgular kıyaslandığında, hibrit kullanılarak elde edilen nanokompozitlerin çekme dayanım sonuçları daha iyidir. Chen ve arkadaşları, poli (kaprolakton)'un (PCL) elektriksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için MWCNT takviyesi yapmışlardır. MWCNT'lerin polimerik nanokompozitlerin içerisinde dağılımı mekanik özellikleri iyileştirmede oldukça önemlidir. Polimerler içerisine eklenen dolgu maddelerinin miktarları da mekanik özellikler üzerinde etkilidir. Grafen oksit (GO) ve MWCNT arasında güçlü  $\pi$ - $\pi$  bağları vardır. GO/MWCNT hibritleri, PCL/MWCNT nanokompozitinde MWCNT'in topaklanmasını geciktirici özellik sağlar, dolgu maddelerinin PCL içerisinde dağılımını etkiler. PCL/GO/MWCNT ve PCL/MWCNT nanokompozitlerinin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlar ve hibrit olarak elde edilen PCL/GO/MWCNT nanokompozitin çekme dayanımı ve kopmada uzama değerlerinin PCL/MWCNT'ye kıyasla daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır (Chen, 2018). Bu çalışmada da çekme dayanımında tek dolgulara göre karışım halinde kullanılan dolguların daha iyi değerler verdiği görülmüştür.

Şekil 4.2'de tek dolgu ve hibrit dolguya sahip nanokompozitlerin kopmada uzama grafiği verilmiştir. Saf PC ve PLA kopmada uzama değerlerine bakıldığında, PC %131 kopmada uzama değerine sahipken, PLA %6 uzamıştır. PC/PLA karışımı için

kopmada uzama değeri %158 olmuştur. Dolgu maddelerinin tek ve hibrit şeklinde eklenmesi ile nanokompozitlerin kopmada uzama değerlerinde PC/PLA matrisine kıyasla düşüşler görülmüştür. %0,5 ve %1 yükleme oranlarında saf PLA'ya göre oldukça yüksek kopmada uzama değerleri elde edilirken, saf PC ye göre yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Örneklerin kopmada uzama değerleri

rGO eklenerek elde edilen nanokompozitlerde kopmada uzama değerleri %0,5-1 ve 3 oranları için sırasıyla %112, %121 ve %67'dir. %1 rGO eklenmesi ile kopmada uzama değerinde PC/PLA matrisine göre %23 oranında düşüş göstermiştir. Nanokompozite eklenen %0,5 ve %3 oranlarında ise sırasıyla %29 ve %57 oranlarında düşüş görülmüştür. rGO içeren nanokompozitler kendi arasında kıyaslandığında en iyi kopmada uzama %121 oranı ile %1'lik dolgu oranına sahip nanokompozittedir. PC/PLA matrisine rGO ilavesi ile kopma uzamasında görülen düşüş, PC/GO arasındaki zayıf uyumdan kaynaklanıyor olabilir (Su & diğ, 2019).

MWCNT eklenmesi ile elde edilen nanokompozitlerin kopmada uzama değerlerinde de düşüş görülmüştür. %0,5 MWCNT kopmada uzama değeri %144, %1 için kopmada uzama değeri %132 ve %3 MWCNT oranı için kopmada uzama değeri %13'tür.

MWCNT dolgulu nanokompozitlerin kopmada uzama değerleri kendi aralarında kıyaslandığında artan dolgu miktarı ile kopmada uzama değerinde düşüş görülmüştür.

%1 MWCNT kopmada uzama değeri ile %3 MWCNT kopmada uzama değeri arasında %89 oranında keskin bir düşüş yaşanmıştır. Urtekin'in tarafından yapılan tez çalışmasında, %0,5 ve %1 oranlarında yüklemelerin mekanik özellikleri iyileştirmede yetersiz kaldığı ve artan MWCNT yükleme oranı ile topaklaşmaların(aglomeratların) oluştuğu sonucuna varılmıştır. MWCNT ve PC arasındaki ara yüzey yapışması zayıftır. Ara yüzey etkileşiminin zayıf olması mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Topaklaşmalar MWCNT'nin takviye gücünü düşürür, kompozit malzemenin dayanım değerine olumsuz etkide bulunur (Urtekin, 2019).

Hibrit dolgulu nanokompozitlerin kopmada uzama değerleri, %0,5, 1 ve 3 hibrit oranları için sırasıyla %111, %7 ve %15'tir. Hibrit dolgunun artan miktarı ile kopmada uzamada düşüş görülmüştür. %0,5 hibrit oranına sahip nanokompozit ile %1 hibrit kopmada uzamasında %93'lük keskin bir düşüş görülmüştür. Rostami ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, hibrit katkılı nanokompozitlerin kopmada uzama değerleri saf PLA'ya göre düşük bulunmuştur. Bunun sebebi, katkı maddelerinin belli bir alanda topaklaşma oluşturması, katkı maddelerinin kaymasından kaynaklanan boşlukların ve kusurların olabileceği, katkı maddelerinin zayıf dağılımından kaynaklı mikro-kırıkların olabileceği sonucuna varılmıştır (Rostami, Nazockdast, & Karimi, 2016).

#### **4.2. Diferensiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)**

Tek dolgu ve hibrit dolgulu nanokompozitlerin DSC sonuçları Tablo 4.2'de ve DSC termogramları sırasıyla rGO, MWCNT ve rGO/MWCNT karışımı dolgulu olmak üzere Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. DSC testi ile camsı geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>), erime sıcaklığı (T<sub>m</sub>), erime entalpisi ( $\Delta H_m$ ) elde edilmiş ve % kristalinite (%X<sub>c</sub>) değerleri hesaplanmıştır.

PC amorf bir polimerdir. 146,3 °C'de yüksek bir camsı geçiş sıcaklığına sahip mühendislik plastiklerindedir. PLA kristal yapıya sahiptir ve T<sub>g</sub> değeri 59,3 °C'dir. PLA, PC'ye göre daha düşük bir T<sub>g</sub> değerine sahip olduğu Tablo 4.2'de

görülmektedir. PC/PLA matrisine bakıldığında 54.8 °C’de camsı geçiş sıcaklığı (Tg) göstermiştir. PC/PLA matrisinin Tg değeri saf PC ve saf PLA’ya göre düşüktür.

Nanokompozitlere tek dolgu olarak eklenen rGO ve MWCNT yaklaşık aynı değerde camsı geçiş sıcaklığı sergilemiştir. Tek dolgulu nanokompozitler ve PC/PLA matrisi kıyaslandığında Tg değerlerinde artış veya azalış olmadığı, Tg değerinin aynı kaldığı söylenebilir. Ayrıca artan rGO ve MWCNT ilavesi ile Tg değerlerinde düşmeler yaşanmıştır.

Hibrit dolgulu nanokompozitlerde ise PC/PLA matrisine kıyasla daha yüksek Tg değerleri sağlanmıştır. Hibrit içerikli nanokompozitlerin DSC eğrileri Şekil 4.5’de verilmiştir. En yüksek camsı geçiş sıcaklığı ise %1 hibrit oranına sahip nanokompozitte elde edilmiştir. Hibrit dolgu ilavesi arttıkça Tg değeri artış göstermiştir. %3 hibrit değerinde ise Tg değeri düşmüştür.

PC/PLA matrisine tek ve hibrit dolguların ilave edilmesi ile Tm değerlerinde anlamlı bir değişim olmamıştır.

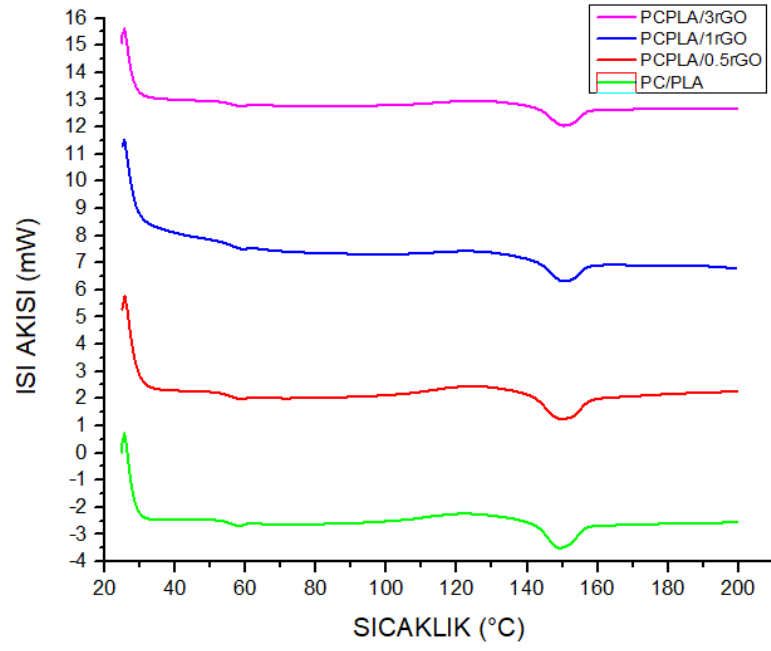
PC amorf polimer olduğu için kristallenme sıcaklığı (Tcc) değeri yoktur. PLA’nın, Tcc değeri 121,8 °C’dir. Dolgu maddelerinin tek dolgu veya hibrit şeklinde eklenmesi ile Tcc değerlerinde 2-3 °C’lik artışlar gözlenmiştir ve Tcc değerleri birbirlerine çok yakındır. Yüksek Tcc hızlı kristalleşme oranı anlamına gelir. Dolgu maddelerinin PC/PLA matrisi içerisinde dağılımının nanokompozitlerin Tcc değerleri ile ilişkisiz olduğu söylenebilir (Chen, 2018).

$\Delta H_m$ , PLA’nın kristalliğini ifade etmektedir. PLA’nın PC ile karıştırılması ile  $\Delta H_m$  4,8 J/g’ a düşmüştür. %0,5 rGO’nun eklenmesi ile  $\Delta H_m$  5,2 J/g’a yükselmiştir. Fakat artan rGO değeri ile  $\Delta H_m$ ’de düşüşler yaşanmıştır. MWCNT dolgusunun artan değerleri ile  $\Delta H_m$  değerlerinde artış gözlenmiştir. Hibrit dolguların eklenmesi ile tek dolgu rGO ve MWCNT’ye kıyasla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. En iyi  $\Delta H_m$  değeri 6,6 J/g ile %3 rGO/MWCNT hibrit dolgusuna sahip nanokompozitte gözlenmiştir. GO’nun iki boyutlu yapısı sebebiyle, MWCNT’ye göre PC/PLA matrisi üzerinde daha düşük bir çekirdeklenme etkisi olmuş olabilir (Chen, 2018).

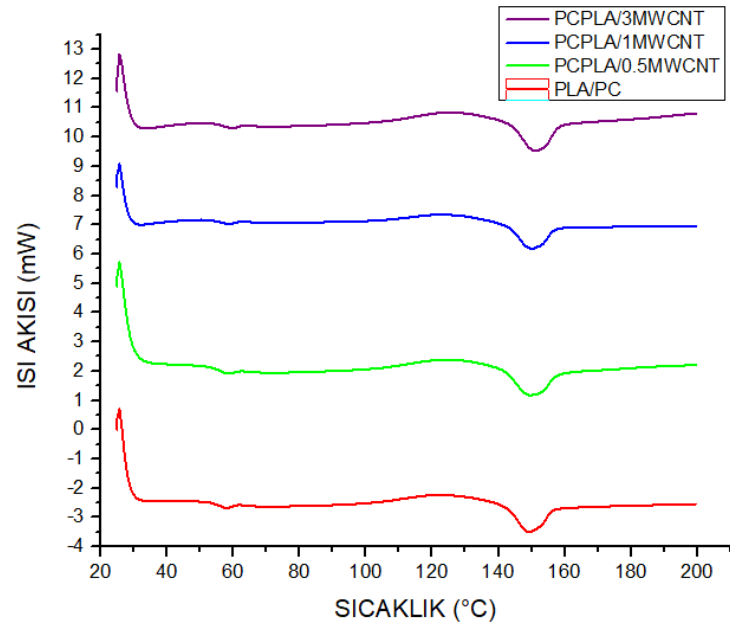
PLA'ın DSC'de yüzde kristallinite değeri %11 olarak belirlenirken, PC/PLA matrisinin kristallinite değeri %17 olarak bulunmuştur. rGO dolgusunun karışım matrise ilave edilmesi ile kristallinite değeri düşük yüklemelerde sabit kalmış rGO miktarının artması ile kristallinite değerinde düşüş yaşanmıştır. MWCNT dolgusuna sahip nanokompozitlerin kristallinite değerleri çok düşüktür. Hibrit dolguların eklenmesi ile % kristallinite değerlerinde PC/PLA karışımına göre artış gözlenmiştir. Artan hibrit yükleme miktarı ile kristallinite artarak en iyi kristallinite değeri ağırlıkça %3 hibrit karışım eklenmiş nanokompozitte görülmüştür.

Tablo 4.2. Üretilen örneklerin DSC Sonuçları

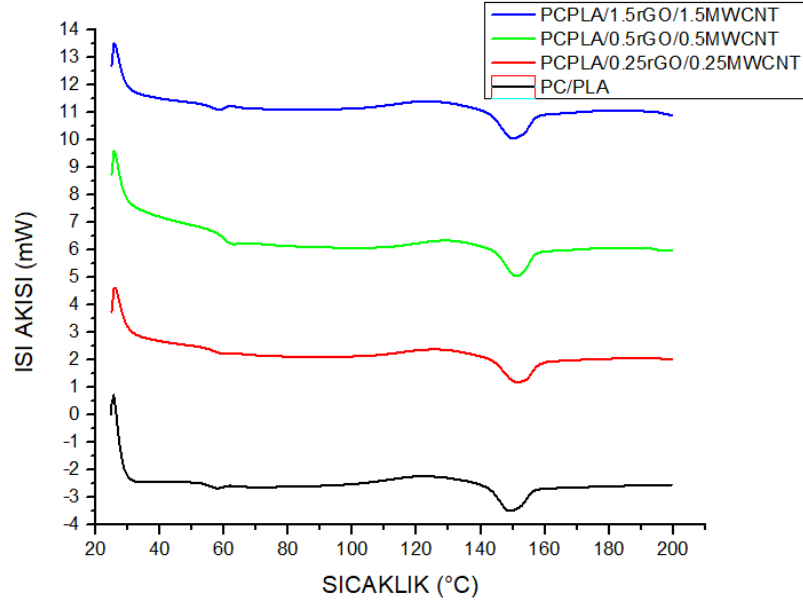
Numuneler	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	T <sub>cc</sub> (°C)	ΔH <sub>cc</sub> (J/g)	%X <sub>c</sub>
PC	146,3	-	-	-	-	-
PLA	59,3	150,6	17,1	121,8	27,6	11,2
PC/PLA	<b>54,8</b>	149,2	4,8	122,6	7,9	17,1
PCPLA/0,5rGO	56,0	149,8	5,2	125,4	10,0	17,0
PCPLA/1rGO	55,2	150,3	3,7	125,7	3,8	0,3
PCPLA/3rGO	55,4	150,4	3,0	126,2	3,7	2,3
PCPLA/0,5MWCNT	56,1	150,4	4,9	123,9	5,0	0,3
PCPLA/1MWCNT	54,9	149,9	4,8	123,1	3,7	3,8
PCPLA/3MWCNT	55,0	151,2	5,1	125,6	6,1	3,7
PCPLA/0,25rGO/0,25MWCNT	56,4	150,6	5,5	125,8	5,0	19,5
PCPLA/0,5rGO/0,5MWCNT	57,1	149,8	6,2	128,7	3,9	22,0
PCPLA/1,5rGO/1,5MWCNT	57,5	150,1	6,6	124,8	3,8	23,5



Şekil 4.3. rGO içerikli nanokompozitlerin DSC eğrileri



Şekil 4.4. MWCNT içerikli nanokompozitlerin DSC eğrileri



Şekil 4.5. rGO/MWCNT karışımı içeren nanokompoziterin DSC eğrileri

### 4.3. Termogravimetrik Analiz (TGA)

TGA analizinde, örneklerin sıcaklığa karşı ağırlık kayıpları elde edilir ve örneklerin kullanım sıcaklıkları hakkında bilgiler sağlanır. Tablo 4.3’de üretilen örneklerin %10 ağırlık kaybının yaşandığı sıcaklık ( $T_{10}$ ), maksimum ağırlık kaybının yaşandığı sıcaklıklar ( $T_{max1}$ ,  $T_{max2}$ ) ve 800 °C sonundaki % kalıntı miktarları verilmiştir.

PC’nin  $T_{10}$  değeri 487.2 °C’dir ve bu da oldukça yüksek sıcaklıklardaki alanlarda kullanım avantajı sağlar. PC’nin %24,8 kalıntı değeri vardır. PLA’nın  $T_{10}$  değeri 335.5 °C’dir, %0 kalıntı veren biyobozunur bir polimerdir ve PC’ye göre daha düşük sıcaklıklarda bozunmaya başlar. Matrisi oluşturan polimerlerin  $T_{max}$  değerlerine bakıldığında PLA için 361.3 °C; PC için 502.1 °C’dir. PC/PLA matrisi 322.4 °C de ağırlığının 10% unu kaybetmiştir. Bu değer saf PLA’ya ve saf PC’ye göre daha düşük sıcaklıktır. PC/PLA, saf polimerlerden farklı olarak 353.4 °C ve 455.2 °C’de olmak üzere iki adımlı bozunma göstermiştir.

Tablo 4.3 dikkatle incelendiğinde, ilk bozunmanın PLA fazına; ikinci bozunmanın ise PC fazına ait olduğu görülmektedir. Saf PC’nin bozunma sıcaklığı 502,1 °C iken PLA ilavesi ile bozunma sıcaklığı 455,2 °C’ye düşmüştür. PLA’nın biyobozunur özelliğinin PC polimerinin termal bozunmasını kolaylaştırmış olabileceği söylenebilir (Phung ,



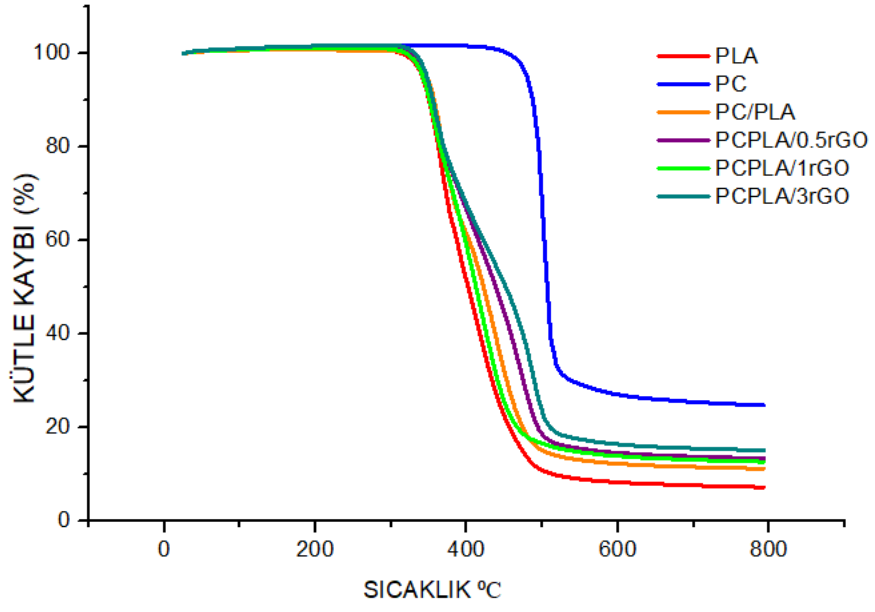
Coltelli, & diğ., 2014). Karışımın kalıntı değeri ise biyobozunur malzeme olan PLA ile %11,3'e düşmüştür.

Tablo 4.3. TGA Sonuçları

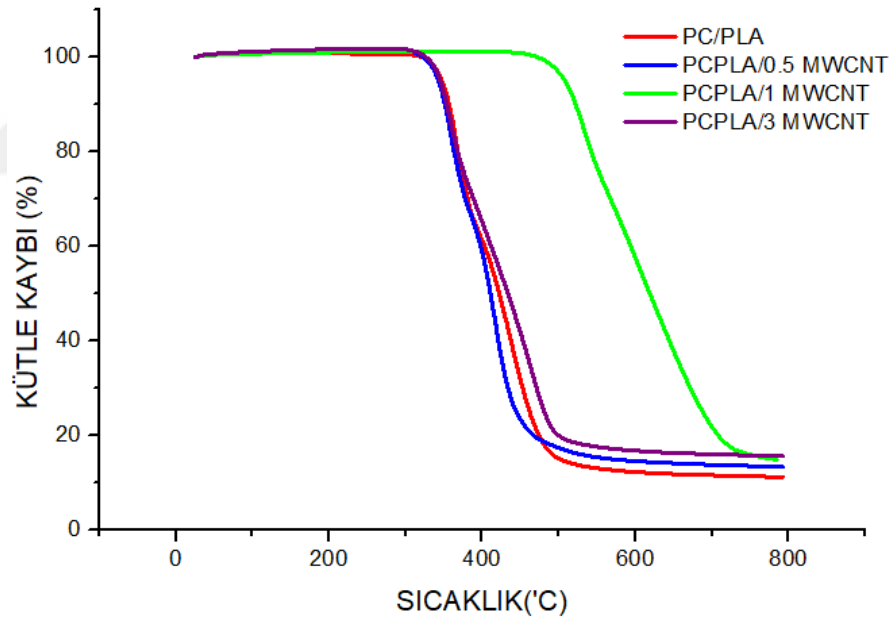
Örnekler	T <sub>10</sub> (°C)	T <sub>max1</sub> (°C)	T <sub>max2</sub> (°C)	% Kalıntı
PC	487,2	502,1	---	24,8
PLA	335,5	361,3	---	0
PC/PLA	<b>322,4</b>	353,4	455,2	11,3
PCPLA/0,5rGO	354,0	358,0	473,3	13,5
PCPLA/1rGO	350,7	356,8	421,3	12,8
PCPLA/3rGO	357,3	359,1	486,8	15,2
PCPLA/0,5MWCNT	351,0	358,0	417,3	13,5
PCPLA/1MWCNT	354,2	352,0	456,0	13,5
PCPLA/3MWCNT	354,3	358,5	465,3	15,7
PCPLA/0,25rGO/0,25MWCNT	350,3	376,6	389,0	13,8
PCPLA/0,5rGO/0,5MWCNT	331,6	352,3	424,6	11,0
PCPLA/1,5rGO/1,5MWCNT	356,8	360,2	487,0	17,8

rGO içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri Şekil 4.6, MWCNT içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri Şekil 4.7 ve hibrit içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri Şekil 4.8'da verilmiştir. Tek dolgu rGO takviyeli nanokompozitlerin % kalıntı miktarı PC/PLA matrisine kıyasla artış göstermiştir.

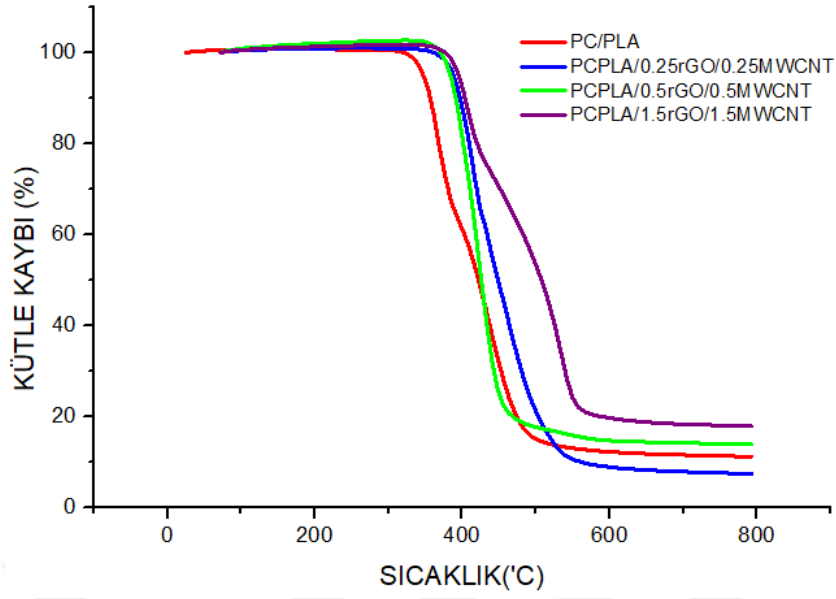
MWCNT ve rGO'nun tek dolgu olarak eklendiği nanokompozitlerde T<sub>10</sub> değerleri PC/PLA matrisine kıyasla 15-20 °C arasında artış göstermiştir. PLA/PC karışımına eklenen nano dolgular ısıl dayanımı geliştirmiştir. PLA ve PC fazı için iki aşamadaki bozunma değerleri vermektedir. Jang ve arkadaşları yaptığı çalışmada, PC/MWCNT ve PLA/MWCNT kompozitlerinin ara yüzey gerilimini hesaplamıştır. PLA/MWCNT kompozitinin arayüzey gerilimi PC/MWCNT kompozitinden daha düşük olduğu için, MWCNT, PC fazına (sürekli faz) göre PLA fazında (dağınık faz) daha fazla konumlanma eğiliminde olduğu sonucuna varmışlardır (Jang , Lee, & Kim, 2015).



Şekil 4.6. rGO içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri



Şekil 4.7. MWCNT içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri



Şekil 4.8. rGO/MWCNT içerikli nanokompozitlerin TGA eğrileri

MWCNT katkısı rGO ya göre  $T_{max}$  özellikle  $T_{max2}$  artmasına daha çok katkı sağlamıştır. En yüksek  $T_{max}$  değeri PLA fazı için, MWCNT %1 e ait iken PC fazı için en yüksek  $T_{max2}$  değeri %3 rGO'a ait olduğu görülmektedir. rGO ve MWCNT'nin %1'lik yüklemelerinde, %0,5 yüklemeye göre bir miktar düşüşler yaşandığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak ekstrüzyon aşamasında eklenen dolgu maddelerinin tamamının matris içinde homojen karışmadığı gösterilebilir. Kalıntı miktarı dolgu maddelerinin yükleme oranları arttıkça artmıştır. MWCNT ve rGO'nun kalıntı miktarları yükleme oranları aynı olduğu için yaklaşık olarak aynı değerlere sahiptir.

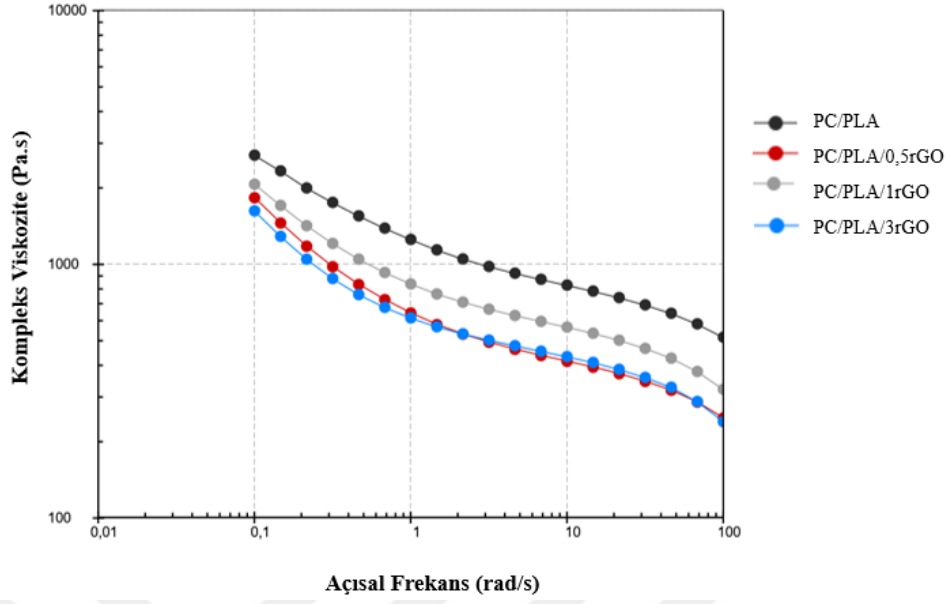
Termal kararlılık polimer nanokompozitler için önemlidir (Chieng, 2014). Tek ve Hibrit dolguların eklenmesi ile, nanokompozitlerin termal kararlılığını arttığı literatürde de yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bunun nedeni yapılan bir çalışmada, kloropren kauçuğun arayüzündeki hem rGO hem de MWCNT arasındaki fiziksel etkileşimin daha termal olarak kararlı nanokompozitler üretmesi şeklinde açıklanmıştır. Ancak daha yüksek yüklemelerde maksimum bozunma sıcaklığı iyileşmez, bunun yerine hafif bir düşüş gösterir. Bu, zayıf etkileşimle sonuçlanan matris içindeki dolgu partiküllerinin aglomerasyonundan kaynaklanıyor olabilir (Maya, Abraham & Moni, 2020).

#### 4.4. Reoloji Analizi

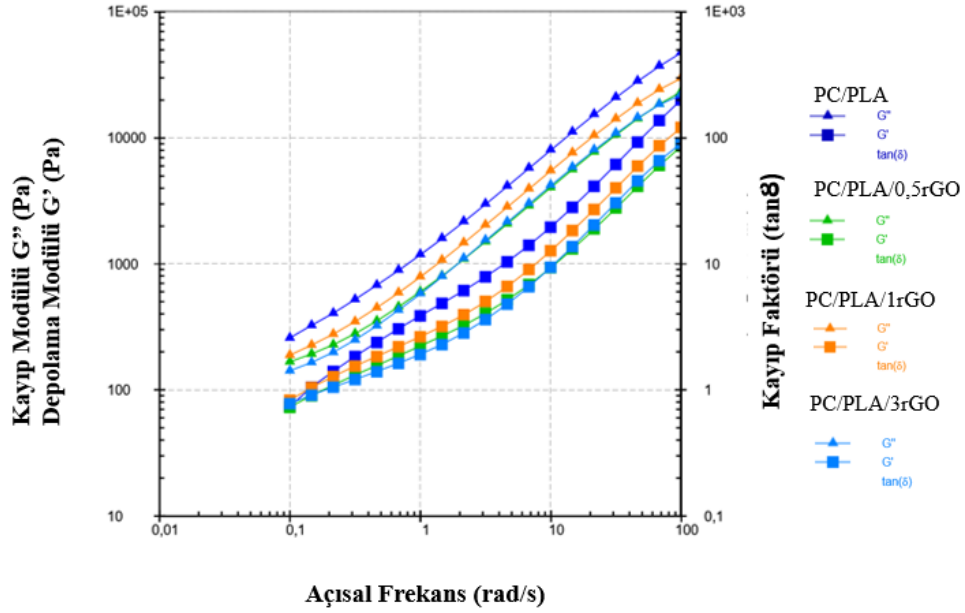
Tek dolgu ve hibrit dolgu takviyeli nanokompozitlerin reolojik özellikleri reometre ile incelenmiştir. Reolojik analiz sonucunda, nanokompozitlerin kompleks viskozite, depolama modülü ve kayıp modülü hakkında bilgi edinilmiştir. Açısal frekansa karşı kompleks viskozite (Şekil 4.9), depolama modülü (Şekil 4.10) ve kayıp modülü (Şekil 4.11) grafikleri verilmiştir.

Reolojik analiz ile, işlenmiş nanokompozitlerin akışkanlığı değerlendirilir. Depolama modülü ( $G'$ ) eriyikteki moleküler hareketlilik ve moleküler arası etkileşimler hakkında bilgi verirken, kayıp modülü ( $G''$ ) eriyiğin esnekliği ile ilgili bilgi verir (Xiaoi, 2016). Depolama modülü, malzemenin ne kadar katı olduğunu gösterir, aynı zamanda depolanmış elastik enerjinin bir ölçüsüdür. Sıcaklık artışı ile depolama değeri azalır. Bu durum, malzemenin katı miktarının azaldığı ve daha sıvı benzeri hale geldiğini gösterir. Kayıp modülü polimerin viskoz özelliklerini veya numunenin belirli bir sıcaklık ve frekansta ne kadar sıvı olduğunu tanımlar (Ferry, 1980).  $\tan \delta$ , polimerin viskoz özelliğinin (kaybedilen enerji), polimerin elastik özelliğine (depolanan enerji) oranıdır. Bu nokta, bir polimerin katı formunun sıvı benzeri bir forma dönüşümünü ifade eder (Uzuner, 2020). Güçlü bir reolojik davranış, polimer matrisi ve dolgu maddeleri arasında etkileşime ve dağılıma bağlıdır (Chen, 2018).

Tek dolgu rGO içerikli nanokompozitlerin kompleks viskozitesi (Şekil 4.9) PC/PLA matrisine kıyasla düşüş göstermiştir. rGO'nun artan değerleri ile nanokompozitlerin kompleks viskozite değerlerinde düşüş görülmüştür. Depolama ve kayıp modül- açısal frekans grafiği incelendiğinde (Şekil 4.10), PC/PLA matrisi ve rGO içerikli nanokompozitlerin kayıp modüllerinin depolama modülünden büyük olduğu görülmektedir. En düşük depolama modülü PLA/PC/3rGO'da gözlenmiştir. Ayrıca en düşük kompleks viskoziteye sahip nanokompozit PLA/PC/3rGO'dır. Bu bileşimde bileşenlerin ara yüzey yapışmasının zayıf olduğu söylenebilir.



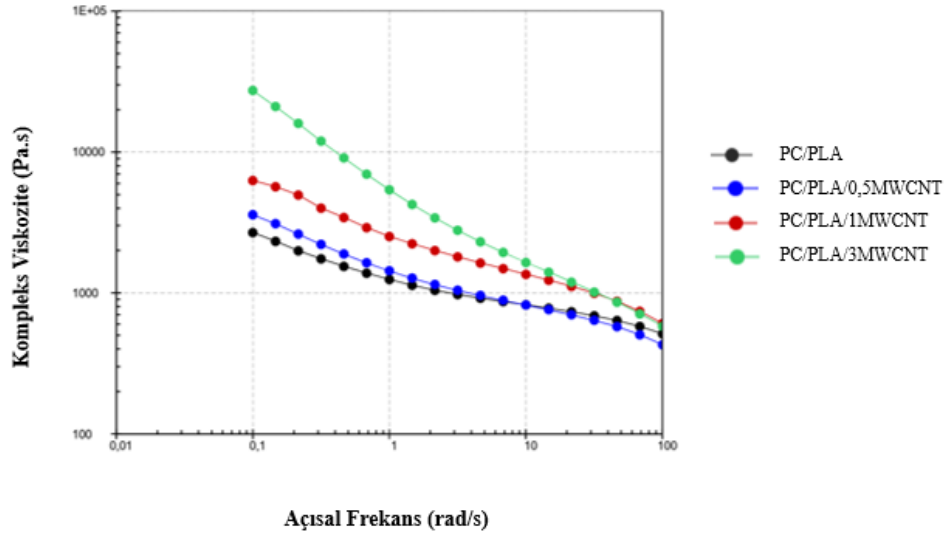
Şekil 4.9.rGO içerikli nanokompozitlerin kompleks viskoziteleri



Şekil 4.10. rGO içerikli nanokompozitlerin depo ve kayıp modül grafikleri

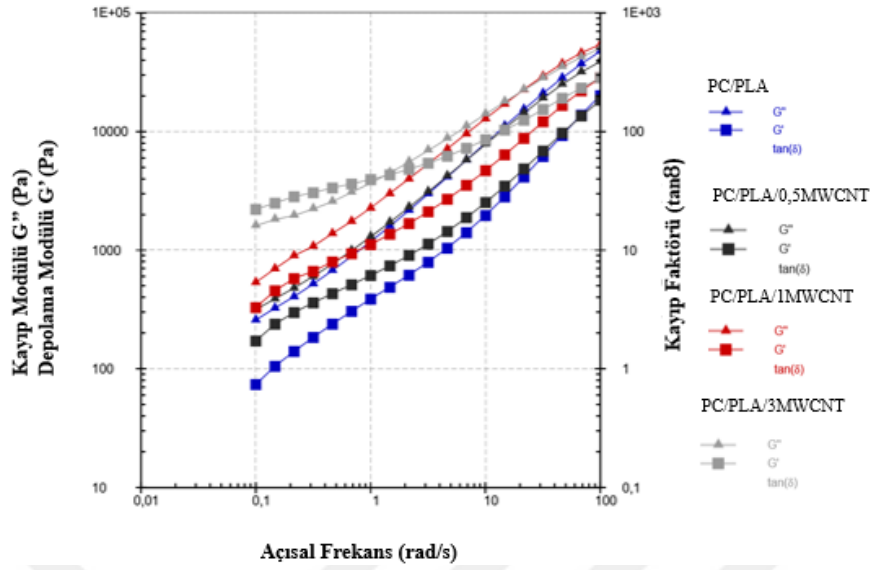
Şekil 4.11. MWCNT içerikli nanokompozitlerin kompleks viskozite grafikleri verilmiştir. Tek dolgu MWCNT içerikli nanokompozitlerin kompleks viskozitesi MWCNT içeriğinin artması ile artış göstermiştir. En yüksek kompleks viskozite PLA/PC/3MWCNT'de elde edilmiştir. Jang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da PLA/PC/MWCNT için MWCNT'nin artan miktarı ile kompleks viskozitenin arttığı sonucuna varılmıştır (Jang , Lee, & Kim, 2015). Genel olarak yüksek frekans

değerlerinde kayma incelmesi davranışı gözlenmiştir. 30 rad/s değerinden sonra tüm numunelerde kayma incelmesi davranışı hızlanmıştır.



Şekil 4.11. MWCNT içerikli nanokompozitlerin kompleks viskoziteleri

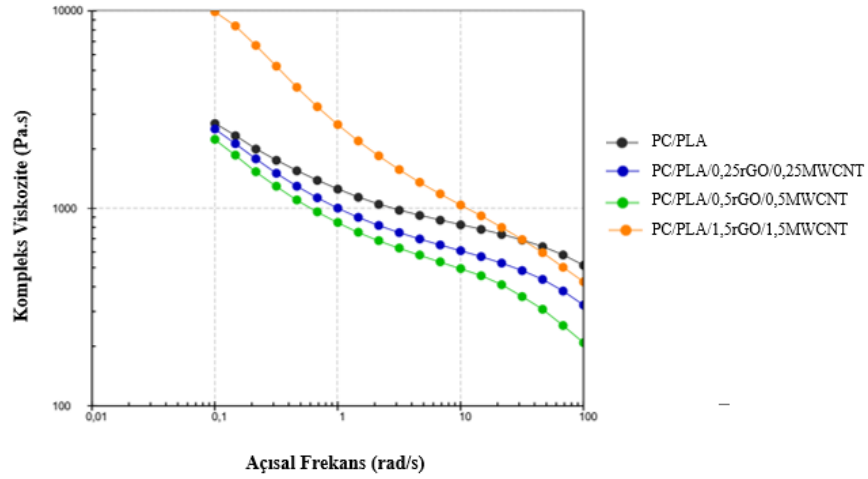
Depolama ve kayıp modül-açısal frekans grafiğine göre (Şekil 4.12), tek dolgu MWCNT içerikli nanokompozitler, artan MWCNT miktarları ile depolama modülü ( $G'$ ) ve kayıp modülü ( $G''$ ) artış göstermiştir. %0,5 MWCNT takviyeli nanokompozit PC/PLA ile aynı platoyu sergilemiştir. %0,5 MWCNT takviyesinin nanokompozitin işleme akışkanlığına etki etmediği söylenebilir. %3 MWCNT için  $G'$  ve  $G''$ , 1 rad/s noktasında birbirine eşit olmuştur. Eşit olunan bu noktaya çaprazlama geçiş noktası denir. Çaprazlama geçiş noktasında  $G''/G'$  oranı yani kayıp faktör  $\tan\delta=1$ 'dir.  $\tan\delta=1$ 'e karşılık gelen sıcaklığın üstünde, polimer kauçuğumsu özellik gösterirken sıcaklığın artmasıyla birlikte yarı-kristalin bir polimer için malzeme erime noktasına yaklaşır. Çaprazlama geçiş noktasının altında, depo modülü kayıp modülden daha yüksek değerler sergiler veya başka bir ifadeyle  $\tan\delta < 1$ 'e eşit olur. Çaprazlama geçiş noktası, polimer eriyiklerinin gevşemeleri için geçen süre ve iki bileşen arasındaki kimyasal etkileşim varsa dallanmış ya da çapraz bağlı yapıların tespitinde kullanılır. Çaprazlama geçiş noktasının üstünde ise, malzeme daha çok bir sıvı gibi davranır ve  $\tan\delta > 1$ 'e eşit olur (Uzuner, 2020).



Şekil 4.12. MWCNT içerikli nanokompozitlerin depo ve kayıp modül grafikleri

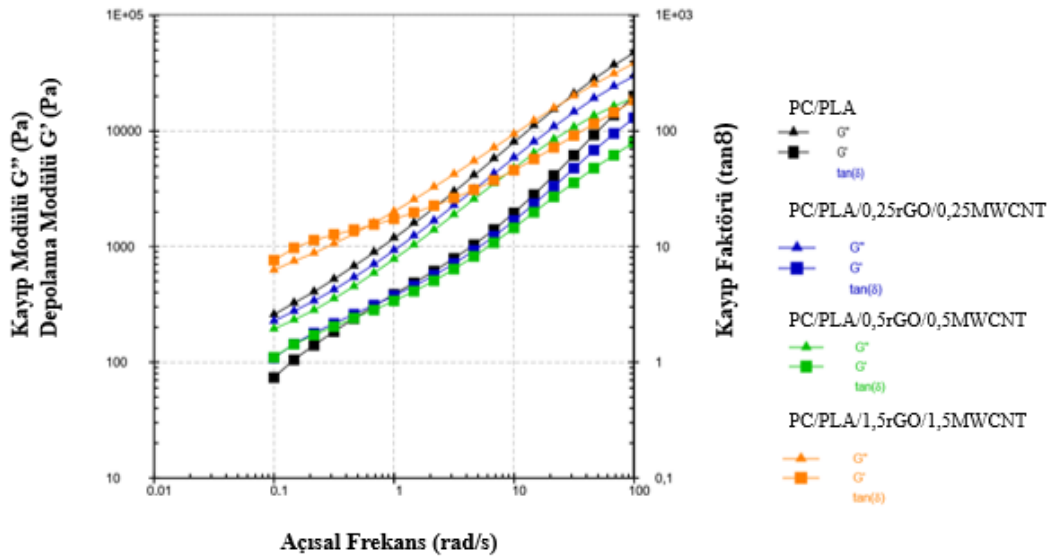
Şekil 4. 13. rGO/MWCNT hibrit nanokompozitlerin kompleks viskozite grafikleri görülmektedir. Hibrit dolgu içerikli nanokompozitlerin kompleks viskozitesi, PC/PLA/0,25rGO/0,25MWCNT ve PC/PLA/0,5rGO/0,5MWCNT nanokompozitleri için düşüş göstermiştir. PC/PLA/1,5rGO/1,5MWCNT için kompleks viskozitesi farklı oranlardaki hibrit içeriklerine göre artış göstermiştir. Karışımların artan viskozitelerinin, dağılmış ve sürekli fazlar arasında artan uyumluluğa işaret ettiği bilinmektedir (Lee, 2011). Ayrıca artan viskozite ile bileşenlerin ara yüzey yapışmalarının olumlu etkilendiği söylenebilir.

Şekil 4. 14. rGO/MWCNT içerikli nanokompozitlerin depo ve kayıp modül grafikleri verilmiştir. Kompleks viskozite ile doğru orantılı olarak  $G'$  ve  $G''$ , %0,5 ve %1 rGO/MWCNT içeriklerinde düşüş göstermiştir. %3 hibrit içeriğinde  $G'$  ve  $G''$  artış göstermiştir. %3 rGO/MWCNT içeriğinde kayıp modül ve depolama modül bir noktada birbirine eşitlenmiştir ve çaprazlama geçiş noktası görülmüştür,  $\tan\delta=1$ 'dir.  $\tan\delta=1$ 'e karşılık gelen sıcaklığın üstünde, polimer kauçuğumsu özellik gösterirken sıcaklığın artmasıyla birlikte yarı-kristalin bir polimer için malzeme erime noktasına yaklaşmaktadır.



Şekil 4.13. rGO/MWCNT içerikli nanokompozitlerin kompleks viskoziteleri

Tek dolgu ve Hibrit dolgular karşılaştırıldığında en yüksek kompleks viskozite, depolama ve kayıp modülü değerleri %3 MWCNT ve %3 rGO/MWCNT içeriğinde görülmüştür. %3 MWCNT tek dolgu olarak nanokompozitte iyi reolojik özellik sergilemiştir. Hatta rGO ile hibrit oluşturması sonucunda  $G'$ ,  $G''$  ve  $G^*$  değerlerinde MWCNT'ye oranla düşüş görülmüştür. Grafen tabakaları numune üzerinde düzensiz dağılım sergilemiştir. Grafen yapıları MWCNT gibi süzölmüş ağ yapısı sergilemez fakat MWCNT ile g-hibrit oluşturması sonucunda süzölmüş ağ yapısı sergileyeceği düşünülmektedir (Xiaoi, 2016).



Şekil 4.14. rGO/MWCNT içerikli nanokompozitlerin depo ve kayıp modül grafikleri



#### 4.5. Isıl İletkenlik

Tek dolgu ve hibrit dolguların eklenmesi ile elde edilen nanokompozitlerin ısı iletkenlik katsayıları Tablo 4.4 ve Şekil 4.15’de verilmiştir. PC/PLA ısı iletkenlik katsayısı 0,22 W/m.K ’dir. Dolgu maddelerinin PC/PLA matrisine eklenmesi ile nanokompozitlerin ısı iletkenlik katsayıları artış göstermiştir. rGO’nun tek dolgu eklenmesi ile nanokompozitlerin ısı iletkenlik katsayısında artış görülmüştür. PC/PLA/1rGO örneğinde PC/PLA göre %14 artış sağlanmıştır. %3 rGO eklenmesi ile ısı iletkenlik katsayısında düşüş görülmüştür. Bunun nedeni yüksek yükleme oranlarında rGO’nun matrisde topaklaşması olabilir.

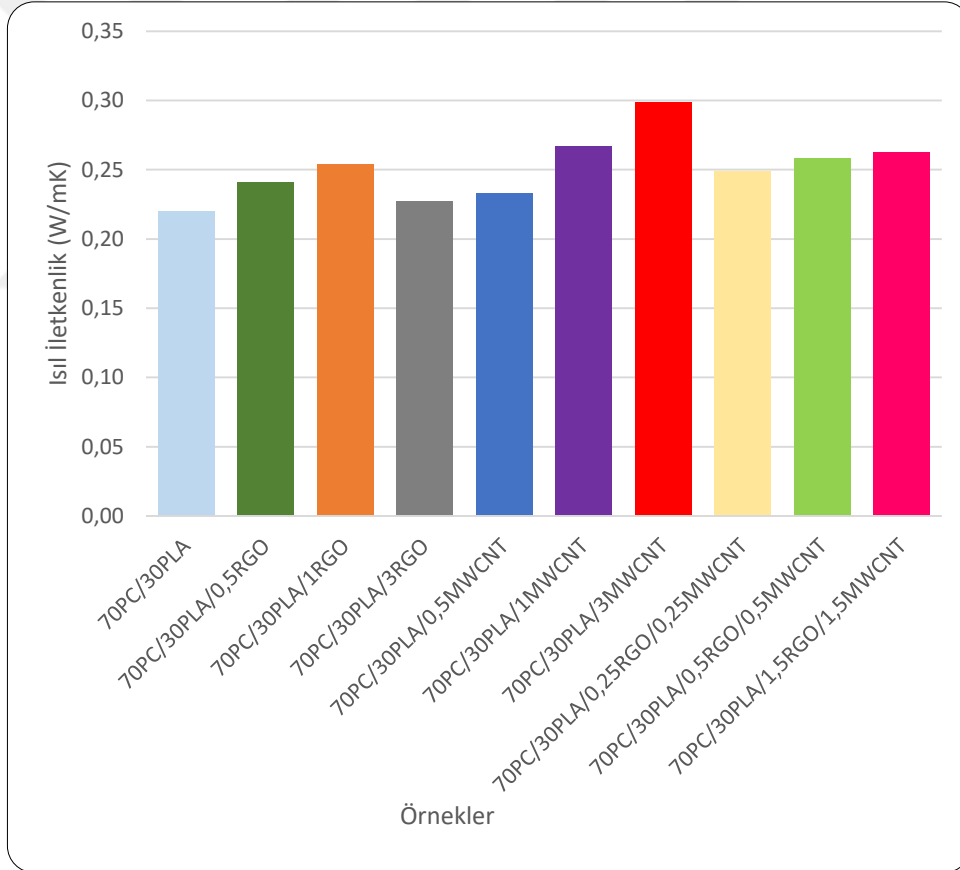
MWCNT’nin tek dolgu eklenmesi ile nanokompozitlerin ısı iletkenlik katsayısında artış görülmüştür. MWCNT’nin artan yükleme yüzdesi ile ısı iletkenlik katsayısı artmıştır. %3 MWCNT oranına sahip nanokompozitin ısı iletkenlik katsayısı 0,30 W/mK’dir ve PC/PLA’ya göre %36 artış sağlanmıştır. Lebedev ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre, PLA/Grafit bileşenine CNT eklenmesi ile ısı iletkenlikte artış gözlenmiştir. Polimer matrisi içerisindeki dolgu içeriği arttıkça, dolgu maddeleri kendi aralarında etkileşerek ısı iletkenliği artırır (Lebedev , Gefle, & diğ., 2017).

Nanokompozitlerdeki hibrit dolgu ile PC/PLA göre ısı iletkenlik katsayısı %18’lik artış göstermiştir. Hibrit dolgular kendi arasında kıyaslandığında ısı iletkenlik katsayıları %0,5,1 ve 3 için sırasıyla 0,25; 0,26 ve 0,26 w/m.K’dir. Yu ve arkadaşları, polimer nanokompozitlerinin ısı iletkenliğinin, MWCNT ve grafen nanokatıklarının PC içerisine hibrit olarak eklenmesi ile sinerjik olarak iyileştirdiğini ifade etmişlerdir (Yu, Choi, & diğ., 2016).

Zhang ve arkadaşları ise, MWCNT ve pullu grafit bazlı nanokatki maddelerini PC içerisine ekleyerek nanokompozit elde etmişlerdir. Hibrit ilavesi edilen nanokompozitlerin tek dolgulu nanokompozitlere oranlara ısı iletkenliğinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır (Zhang , Li, & diğ., 2016).

Tablo 4.4. Örneklerin Isıl iletkenlik katsayıları

Numuneler	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)
PC/PLA	0,22
PC/PLA/0,5RGO	0,24
PC/PLA/1RGO	0,25
PC/PLA/3RGO	0,23
PC/PLA/0,5MWCNT	0,23
PC/PLA/1MWCNT	0,27
PC/PLA/3MWCNT	<b>0,30</b>
PC/PLA/0,25RGO/0,25MWCNT	0,25
PC/PLA/0,5RGO/0,5MWCNT	0,26
PC/PLA/1,5RGO/1,5MWCNT	0,26



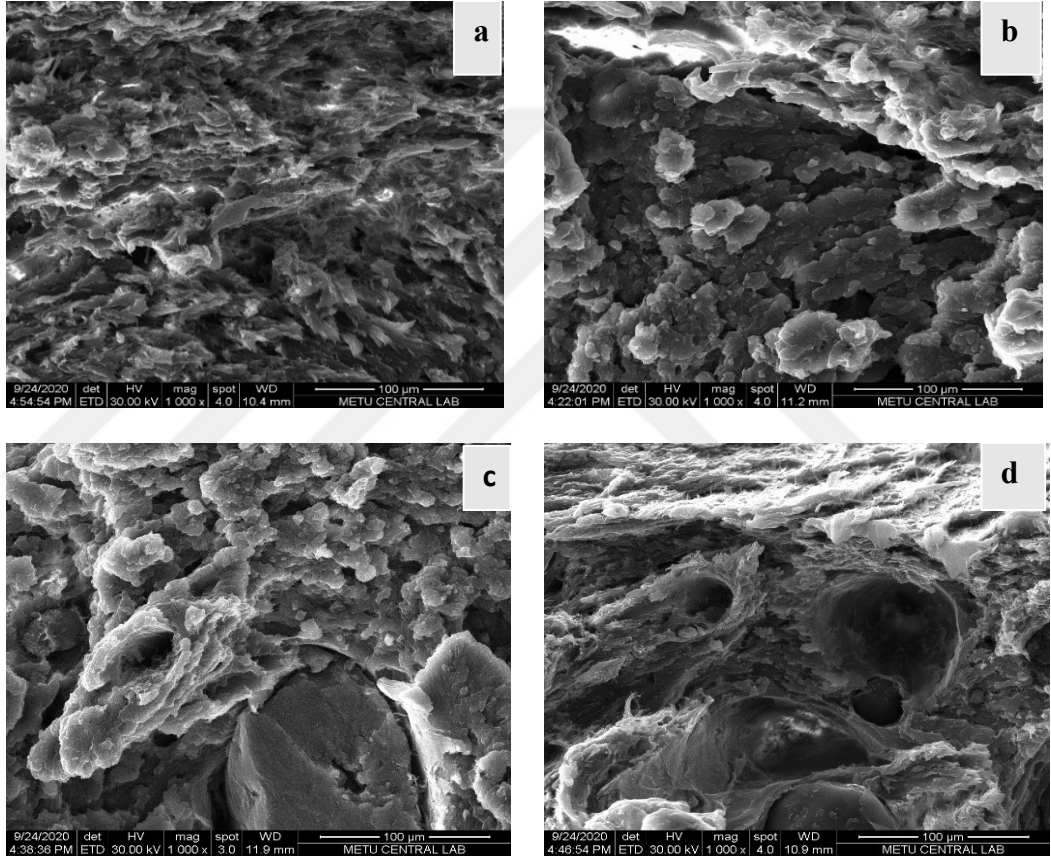
Şekil 4.15. Isıl İletkenlik grafiği

#### 4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM görüntüleri çekme testi uygulanan nanokompozitlerin kopma yüzeyinden görüntüler alınarak elde edilmiştir. PC/PLA matrisi, tek dolgulu ve hibrit dolgulu

nanokompozitlerin SEM görüntüleri aşağıda sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'te verilmiştir.

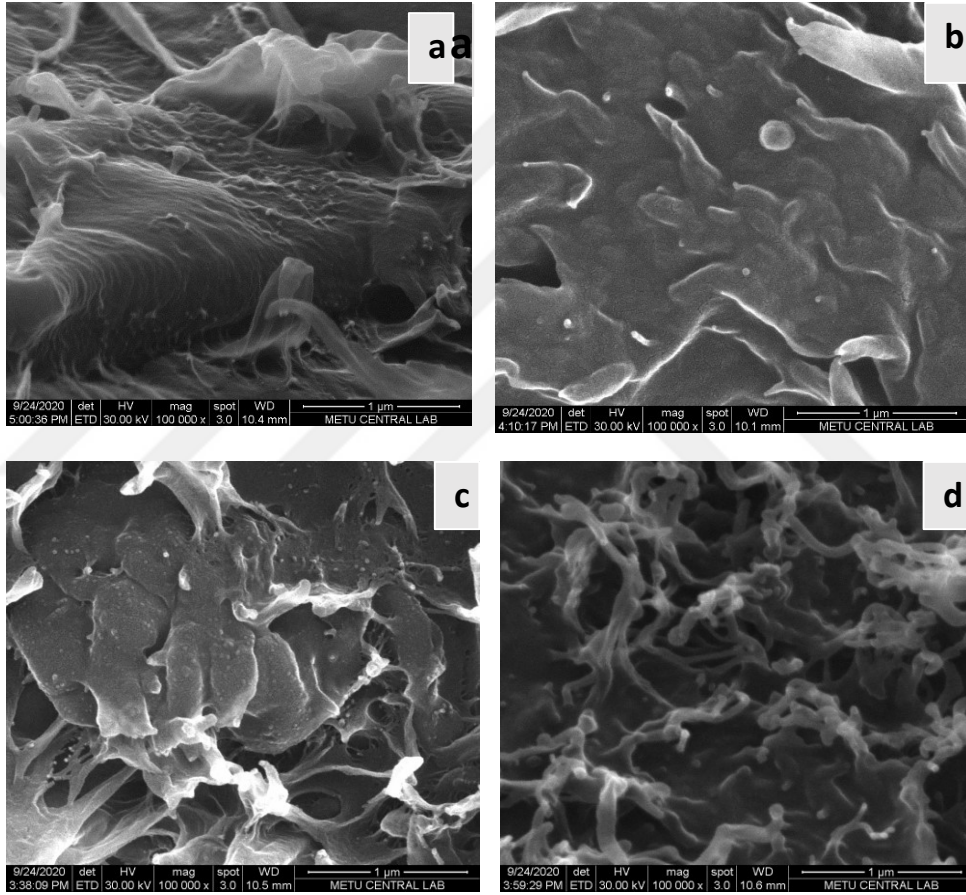
PC/PLA matrisi için (Şekil 4.16a), PLA, PC/PLA matrisi içerisinde küresel şekiller oluşturmuştur. PLA'nın PC içerisinde karışmadığı söylenebilir. PC ve PLA'nın uyumsuz polimerler olduğu literatürdeki araştırmalar ile bilinmektedir. Bao ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada PC içerisinde PLA'nın karışmadığını ve ada-deniz morfolojisi oluşturduğunu söylemiştir (Bao, 2013).



Şekil 4.16. Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 70PC/30PLA, b) PC/PLA/0,5rGO, c) PC/PLA/1rGO, d) PC/PLA/3rGO

Tek dolgu rGO'nun takviye edildiği nanokompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.16b, 4.16c ve 4.16d'de verilmiştir. PC/PLA matrisi ile dolgulu nanokompozitler karşılaştırıldığında, dolgu maddelerinin artan yükleme oranlarında eklenmesi ile matris içerisinde topaklanmalarda artış görülmüştür. SEM ve reoloji analizi eş zamanlı olarak değerlendirildiğinde, rGO'nun PC/PLA matrisi içerisinde iyi bir dağılım gösteremediği artan yüklemelerde topaklandığı söylenebilir.

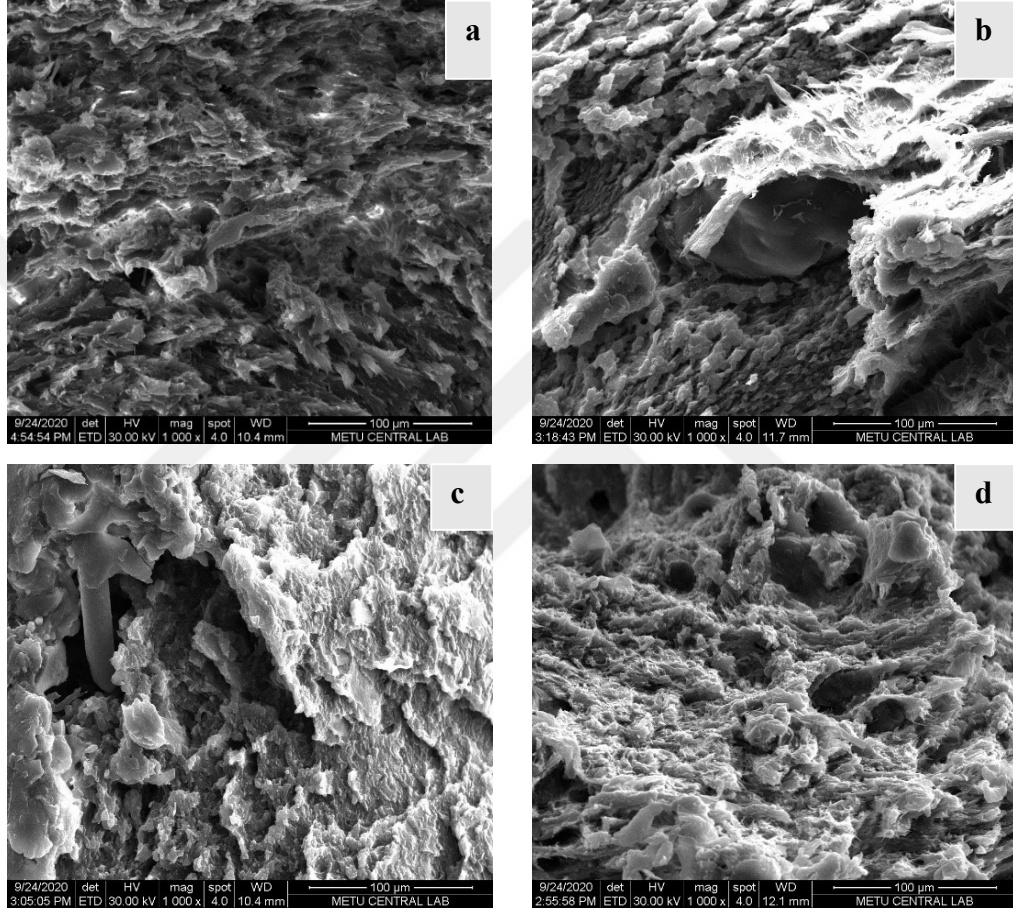
Tek dolgu MWCNT takviyesi yapılan nanokompozitlerin SEM görüntüleri artan yükleme oranlarına bağlı olarak Şekil 4.17b, 4.17c ve 4.17d'de verilmiştir. Reoloji analizinde belirtilmiş olan süzölmüş ağ yapı %3 MWCNT takviyeli nanokompozitte görülmektedir. PC/PLA matrisi içerisinde en iyi dağılım %0,5 MWCNT takviyesinde görülmüştür. MWCNT miktarı arttıkça nanokompozitteki topaklanmalar artmıştır. Bu durum, kopmada uzama değerinde MWCNT yükleme seviyesinin artması ile gerçekleşen düşüşü açıklamaktadır. SEM görüntüleri çekme testi sonuçlarını desteklemektedir.



Şekil 4.17. Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 70PC/30PLA, b) PC/PLA/0,5MWCNT, c) PC/PLA/1MWCNT, d) PC/PLA/3MWCNT

Şekil 4.18'de hibrit karışım içeren nanokompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. rGO/MWCNT hibrit dolgusunun eklenmesi ile tek tip dolgu içeren nanokompozitlerde gözlenen topaklanma azalmış ve nanokompozit içinde borsal bir yapı görülmüştür. GO, oksidasyon sırasında dökülmüş pul tabakası yapısını sergiler. MWCNT ise boru şeklinde bir ağ yapısı gösterir. MWCNT, GO yapısı içerisinde adsorbe edilir. Bunun

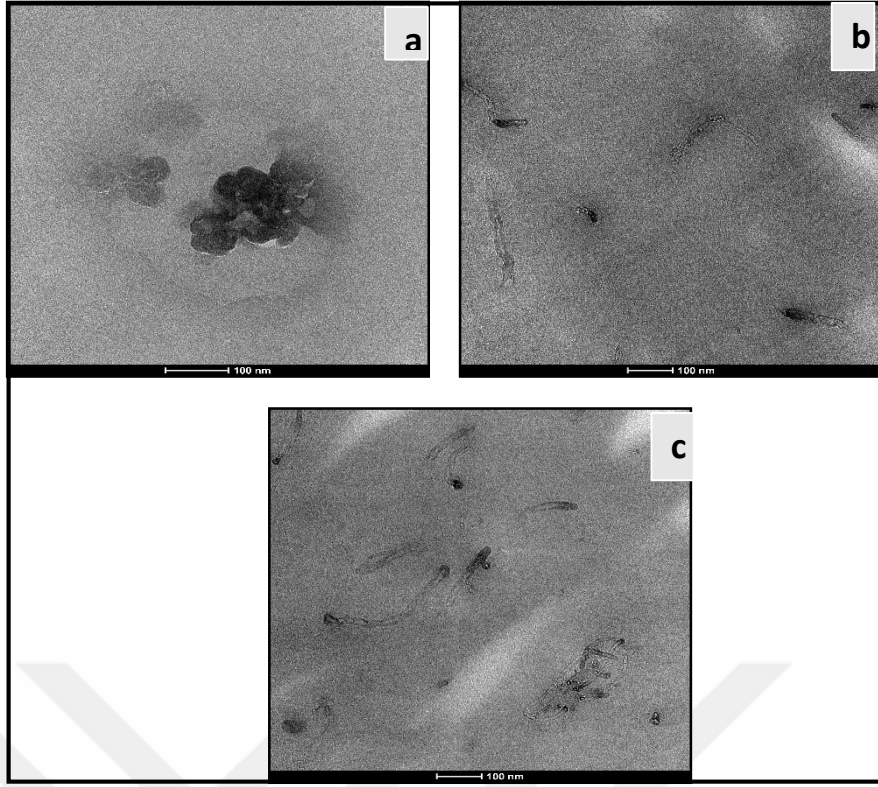
sebebi ise, GO'nun hidrofobik bölgesi ile MWCNT'nin yan duvarları arasında etkileşim oluşmasıdır. Bu etkileşime üst-istifleme denir. Üst-istifleme etkileşimi MWCNT'nin topaklanmasını önler ve GO/MWCNT dağılımını homojen hale getirir (Kavinkumar, 2018). Literatürde açıklanan rGO/MWCNT hibrit dolgu etkisi PC/PLA matrisli kompozitlerde de kısmen görülmüştür. Tek tek yükleme ile oluşan topaklanmalarda azalma gözlenmiştir.



Şekil 4.18. Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 70PC/30PLA, b) PC/PLA/0,25rGO/0,25MWCNT, c) PC/PLA/0,5rGO/0,5MWCNT, d) PC/PLA/1,5rGO/1,5MWCNT

#### 4.7. Geçirimli Elektron Mikroskobu

Nanokompozitlerin performansları dolgu maddelerinin dağılımına bağlıdır. TEM, nano dolgu maddelerinin dağılımını incelemeye kullanılan yaygın bir tekniktir (Chieng, 2014). Tem analizi ile 0,5rGO, 0,5 MWCNT ve 0,5 rGO/MWCNT içerikli nanokompozitlerin görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 4.19'da TEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.19. Nanokompozitlerin TEM görüntüleri a) PC/PLA/0,5rGC  
b)PC/PLA/0,5MWCNT,c)PC/PLA/0,25rGO/0,25MWCNT

Şekil 4.19a'da rGO'nun grafen tabakalarının bozulmadan kaldığı ve PC/PLA matrisi içerisinde dağılım gösterdiği söylenebilir. Şekil 4.19b'de MWCNT'lerin silindirik uzun tüpler şeklinde dağıldığı görülmektedir. Şekil 4.19c'de hibrit nanokompozit içinde rGO'ların iyi dağılım gösterdiği görülmektedir. MWCNT'lerin ise bir noktada agglomerat oluşturduğu söylenebilir

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 70PC/30PLA karışımı ana matris olarak kullanılmıştır. rGO ve MWCNT nano dolgu maddeleri tek dolgu ve hibrit dolgu olarak ağırlıkça %0,5-1 ve 3 oranlarında PC/PLA matrisine ilave edilerek nanokompozitler elde edilmiştir. Elde edilen nanokompozitlerin mekanik, termal ve morfolojik özellikleri çeşitli karakterizasyon testleri ile belirlenmiştir.

Mekanik özellikleri belirlemek için nanokompozitlere çekme testi uygulanmıştır. Tek dolgu ve hibrit dolgu takviyeli nanokompozitlerin çekme dayanımı, kopmada uzama ve Young's modülü değerleri belirlenmiştir. Çekme dayanımı ve kopmada uzama da en iyi sonuç %0,5 hibrit içeriği PC/PLA/0,25rGO/0,25MWCNT'de elde edilmiştir. Tek dolgu rGO ve MWCNT nanokompozitlerinde artan dolgu miktarları ile çekme dayanımı ve kopmada uzama değerlerinde azalma gözlenmiştir.

DSC ile nanokompozitlerin termal özellikleri belirlenmiştir. Hibrit dolgulu nanokompozitlerde PC/PLA matrisine kıyasla daha yüksek Tg değerleri sağlanmıştır. Hibrit dolgu ilavesi arttıkça Tg değeri de artış göstermiştir. Tek dolgulu nanokompozitler ve PC/PLA matrisi kıyaslandığında Tg değerlerinde artış veya azalış olmadığı, Tg değerinin aynı kaldığı söylenebilir. Ayrıca artan rGO ve MWCNT ilavesi ile Tg değerlerinde azalma gözlenmiştir. rGO ve rGO/MWCNT karışımı takviyeli nanokompozitlerin %kristalinite değerinde artış göstermiştir.

Hibrit dolguların eklenmesi ile, nanokompozitlerin termal kararlılığının arttığı TGA ile kanıtlanmıştır. MWCNT dolgusu rGO'ya kıyasla  $T_{max2}$ 'de daha fazla artış sağlamıştır. Kalıntı miktarı dolgu maddelerinin yükleme oranları arttıkça artmıştır.

En yüksek kompleks viskozite, depolama ve kayıp modülü değerleri %3 MWCNT ve %3 rGO/MWCNT içeriğinde görülmüştür. %3 MWCNT tek dolgu olarak nanokompozitte iyi reolojik özellik sergilemiştir. rGO ile Hibrit oluşturması sonucunda  $G'$ ,  $G''$  ve  $G^*$  değerlerinde MWCNT'ye oranla düşüş görülmüştür. Grafen tabakaları numune üzerinde düzensiz dağılım sergilemiştir. Grafen yapıları MWCNT

gibi süzölmüş ađ yapısı sergilemez fakat MWCNT ile g-hibrit oluşturması sonucunda süzölmüş ađ yapısı sergileyeceği düşünölmektedir.

Isıl iletkenlik katsayısı en iyi değeri %3 MWCNT’de PC/PLA’göre %36 artış sağlayarak göstermiştir. Hibrit dolgulu nanokompozitlerin ısıl iletkenlik değerleri de iyidir. MWCNT ve rGO dolgu maddelerinin birbiri ile etkileşmesinin ısıl iletkenliği artırdığı görölmüştür.

Tüm test sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, yüksek mekanik özellikler için düşük yükleme seviyelerinde rGO, MWCNT ve rGO/MWCNT (hibrit) nanokatki olarak kullanılabilir. Yüksek termal kararlılık için ise %3 hibrit, yüksek ısıl iletkenlik için %3 MWCNT kullanılmalıdır. Tek dolgu ve hibrit dolgular karşılaştırıldığında, genel anlamda hibrit dolguların daha düşük yüklemelerde daha iyi sonuçlar verdiği görölmüştür. rGO’nun topaklanma özelliklerini MWCNT ile birlikte kullanıldığında azaldığı ve daha iyi dağılım sağladığı söylenebilir. Ağırlıkça artan miktarlarda bazı özelliklerde özellikle tek nanokatki kullanıldığında düşmeler görölmüştür.

Bu tez çalışmasında, %0,5-1-3 rGO ve MWCNT dolgu maddeleri tek dolgu ve hibrit dolgu takviyesi ile 70PC/30PLA matrisine eriyikten karıştırma yöntemi ile eklenerek nanokompozitler elde edildi. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, farklı oranlarda rGO/MWCNT (hibrit) takviyesinin PC/PLA matrisine eklenerek nanokompozitlerin elde edilmesi ve özelliklerinin incelenmesi önerilir.



## KAYNAKLAR

Arıcioğlu M.K., Mert B., Soydan Y., Polimer Malzemelerin Mekanik Analiz Yöntemleri, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2000, **4**(1,2), 51-58.

Beşergil B., Karbon Nanotüpler, CNT (carbon nanotubes), [http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/9\\_4.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/9_4.html), (Ziyaret Tarihi: 22 Nisan 2021).

Beyaz R., Öksüz M., Polimer Malzemelerin Isıl İletkenlik Özellikleri, Plastik&Ambalaj Teknolojisi, <http://www.plastik-ambalaj.com/tr/2012-02-17-15-08-38/119-plastik-ambalaja-makale/3014-polimer-malzemelerin-is-l-iletkenlik-oezelikleri>, (Ziyaret Tarihi: 02 Mayıs 2021).

Can B., Poli(Bütülen Adipat-Ko-Teraftalat)/Termoplastik Nişasta Karışımlarında Okside Termoplastik Nişasta Ve Uyumlaştırıcı Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017, 494781.

Chakraborty G., Valapa R.B, Katiyar V., Investigating the properties of poly (lactic acid)/exfoliated graphene based nanocomposites fabricated by versatile coating approach. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, **113**, 1080-1091.

Chen Y.F., Tan Y.J., Li J., Hao Y.B., Shi D., Wang M., Graphene oxide-assisted dispersion of multi-walled carbon nanotubes in biodegradable Poly( $\epsilon$ -caprolactone) for mechanical and electrically conductive enhancement, *Polymer Testing*, 2018, **65**, 387-397.

Chieng B.W., Ibrahim N.A., Yunus W., Hussein M., Then Y., Loo Y., Effects of Graphene Nanoplatelets and Reduced Graphene Oxide on Poly(lactic acid) and Plasticized Poly(lactic acid): A Comparative Study, *Polymers*, 2014, **6**, 2232-2246.

Ciprari D., Jacob K., Tannenbaum R., Characterization of Polymer Nanocomposite Interphase and Its Impact on Mechanical Properties. *Macromolecules*, 2006, **39**, 6565-6573.

Çoban M., Farklı nano katkıların ve kabaran alev geciktiricili sistemin plastikleştirilmiş poli(laktik asit)'in özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017, 494759.

Dizdar Z., Poli (laktik asit) esaslı filmlerin ısı ve basınç yardımıyla kendine ve etilen vinil alkol kopolimerine yapışma davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2012, 301628.

Eatemadi A., Daraee H., Karimkhanloo H., Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, 2014, **9** (393), 1-13.

Espositoa F., Sansoneb L., Taddei C., Campopiano S., Giardona M., Iadicico A., Ultrasensitive biosensor based on long period grating coated with polycarbonate-graphene oxide multilayer, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, **274**, 517-526.

Erol T., Termoplastik nişasta esaslı sıcak eriyik yapıştırıcıların hazırlanması ve performans özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2018, 507251.

Ferreria W., Andrade C., Preparation and Properties of Poly(lactic acid)/Thermoplastic Starch/Reduced Graphene Oxide Composites, *Macromolecular Symposia*, 2018, **381**, 1800113.

Ferreria W., Dahmouche K., Andrade C., Dispersion of reduced graphene oxide within thermoplastic starch/poly (lactic acid) blends investigated by small-angle X-ray scattering, *Carbohydrate Polymers*, 2019, **208**, 124-132.

Ferry J., Viscoelastic Properties of Polymers, 3rd ed., John Wiley and Sons, Inc., NewYork, 1980

Gürsel H., What is the Difference Between Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. Nanografi, <https://nanografi.com/blog/what-is-the-difference-between-graphene-oxide-and-reduced-graphene-oxide/>, (Ziyaret Tarihi: 20 Mayıs 2021).

Hasheminejad K., Montazeri A., Enhanced Interfacial Characteristics in PLA/graphene composites through numerically-designed interface treatment, *Applied Surface Science*, 2020, **502**, 1441590.

Hazer S., Karbon elyaf takviyeli poli(laktik asit)/Polikarbonat kompozitlerin ısı, yanma ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2018, 522089.

Helmestine A.M., Why is Graphene İmportant?, <https://www.thoughtco.com/why-is-graphene-important-603950>, (Ziyaret Tarihi: 20 Mayıs 2021).

İmre B., Renner K., Pukanszky B., Interactions, structure and properties in poly(lactic acid)/thermoplastic polymer blends, *eXPRESS Polymer Letters*, 2013, **8** (1), 2-14.

Jang M.G., Lee Y.K., Kim W.N., Influence of Lactic Acid-Grafted Multi-Walled Carbon Nanotube (LA-g-MWCNT) on the Electrical and Rheological Properties of Polycarbonate/Poly(lactic acid)/ LA-g-MWCNT Composites, *Macromolecular Research*, 2015, **23**, 916-923.

Kanzawa T., Tokumitsu K., Mechanical Properties and Morphological Changes of Poly (lactic acid)/Polycarbonate/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blend Through Reactive Processing, *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, **121**, 2908-2918.

Karoui R., Food Authenticity and Fraud, Chemical Analysis Food : Techniques and Applications, *Food Chemistry*, 2012, **15**, 499-517.

Kavinkumar T., Manivannan S., Improved dielectric behaviour of graphene oxide-multiwalled carbonnanotube nanocomposite, *Vacuum*, 2018, **148**, 149-157.

Kelly C., What is Extrusion?, <https://www.plasticsintl.com/blog/what-is-extrusion/>, (Ziyaret Tarihi: 20 Nisan 2020).

Kök M., DSC ile termal iletkenlik ölçümü ve uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilim Enstitüsü, Elazığ, 2006, 185348.

Lebedev S.M., Gefle O.S., Amitov E.T., Berchuk D.Y., Zhuravlev D.V., Poly(lactic acid)-based polymer composites with high electric and thermal conductivity and their characterization, *Polymer Testing*, 2017, **58**, 241-248.

Lee J.B., Lee Y.K., Choi G.D., Na S.W., Park T.S., Kim W.N., Compatibilizing effects for improving mechanical properties of biodegradable poly (lactic acid) and polycarbonate blends, *Polymer Degradation and Stability*, 2011, **96**(4), 553-560.

Lin L., Deng C., Lin G., Wang Y., Mechanical Properties, Heat Resistance and Flame Retardancy of Glass Fiber-Reinforced PLA-PC Alloys Base on Aluminum Hypophosphite, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2014, **53**(6), 613-625.

Maya M., Abraham J., Moni G., George J., George S., Thomas S., A comprehensive study on impact of RGO/MWCNT hybrid filler reinforced polychloropene rubber multifunctional nanocomposites, *Polymer Testing*, 2020, **87**, 106525.

Mertens R., Peleg R. Graphene Info, <https://www.graphene-info.com/reduced-graphene-oxide-introduction>, (Ziyaret Tarihi: 3 Mayıs 2021)

Mohammadi M.,Majzoobi G.H., Mechanical Characterization of Polycarbonate Reinforced With Nanoclay and Graphene Oxide, *Society of Plastics Engineers*, 2019.

Urtekin G., Farklı fonksiyonel gruplara sahip çok duvarlı karbon nanotüp katkıların polikarbonat/poli(laktik asit) karışımı üzerine etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2019, 577264.

Uzuner A., Yeni Nesil Hibrit Nanoparçacıklar İle Uyumlaştırılmış PTPE/PA6 Karışımlarının Mekanik, Isıl, Reolojik Ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2020, 650994.

Pantani R., Coccorullo I.,Speranza V., Titomanli G., Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers, *Elsevier*, 2005, **30**(12), 1185-1222.

Park S., Lee S.,Kim S., Isothermal crystallization behavior and mechanical properties of polylactide/carbon nanotube nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, **46**, 11-18.

Phung V. T., Coltelli M., Cinelli P., Cifelli M., Verstichel S., Lazzeri A., Compatibilization and property enhancement of poly(lactic acid)/polycarbonate blends through triacetin-mediated interchange reactions in the melt, *Polymer*, **55**(17), 4498-4513.

Özdemir E., Termoplastik Nişasta (Tps) / Polietilen (Pe) Karışımı Ambalaj Filmlerinin Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2020.

Öztürk C., Farklı uyumlaştırıcıların indirgenmiş grafen oksit takviyeli poli(etilentereftalat)/poli(bütilen eraftalat) nanokompozitlerinin özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2020, 620875.

Qu Z., Bu J., Pan X., Hu X., Probing the nanomechanical properties of PLA/PC blends compatibilized with compatibilizer and nucleation agent by AFM, *Journals of Polymer Research* , 2018, **25**(138).

Rogers T., *Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA)*, <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototype>, (Ziyaret Tarihi: 02 Mayıs 2021).

Rostami A., Nazockdast H., & Karimi M., Graphene induced microstructural changes of PLA/MWCNT biodegradable nanocomposites:rheological, morphological, thermal and electrical porperties, *The Royal Society of Chemistry*, 2016, **6**, 49747.

Su Y., Luan G., Shen H., Liu B., Ran S., Fang Z., Guo Z., Encouraging mechanical reinforcement in polycarbonate nanocomposite films via incorporation of melt blending-prepared polycarbonate-graft-graphene oxide, *Applied Physics A*, 2019, 125(426).

Şen, F., Palancıoğlu, H., Aldaş, K., Polimerik Nanokompozitler ve Kullanım Alanları, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2016, 111-118.

Terzopoulou Z., Klonosa, P., Kyritsis A, Interfacial interactions, crystallization and molecular mobility in nanocomposites of Poly(lactic acid) filled with new hybrid inclusions based on graphene oxide and silica nanoparticles, *Polymer*, 2019, **166**, 1-12.

URL-1: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polycarbonate-pc-plastic#:~:text=Polycarbonate%20is%20a%20high%2Dperformance,a%20unique%20combination%20of%20properties>, (Ziyaret Tarihi: 18.04.2021).

URL-2: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/polycarbonate.aspx>, (Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2021)

URL-3: [ktu.edu.tr/dosyalar/14\\_14\\_00\\_77c0a.pdf](http://ktu.edu.tr/dosyalar/14_14_00_77c0a.pdf), (Ziyaret Tarihi: 4 Temmuz 2021)

Wang J., Li C., Zhang X., Xia L., Zhang X., Wu H., Guo J., Polycarbonate toughening with reduced graphene oxide: Toward high toughness, strength and notch resistance, *Chemical Engineering Journal*, 2017, **325**, 474-484.

Wang P., & Sheng F., Tang S., Cai J., Fei P., Nawz A., Walayat N., Javaid A., Xiong H., Crystallization, thermal stability, barrier property, and aging resistance application of multi-functionalized graphene oxide/poly(lactide)/ starch nanocomposites, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, **132**, 1208-1220.

Xiao Y., Wang W., Chen X., Lin X., Zhang Y., Yang J., Wang Y., Zhou Z., Hybrid network structure and thermal conductive properties in poly(vinylidene fluoride) composites based on carbon nanotubes and graphene nanoplatelets, *Composites : Part A*, 2016, 614-625.

Yemişçi F., Aytaç A., Compatibilization of Poly(lactic acid)/Polycarbonate Blends by Different Coupling Agents, *Fibers and Polymer*, 2017, **18**, 1445-1451.

Yu J., Choi H., Kim H.S., Kim S.Y., Synergetic effect of hybrid graphene nanoplatelet and multi-walled carbon nanotube fillers on the thermal conductivity of polymer composites and theoretical modelling of the synergistic effect, *Compos Part A Appl Sci Manuf*, 2016, **88**, 75-79.

Yuryev Y., Mohanty A., Misra M., Novel super-toughened bio-based blend from polycarbonate and poly(lactic acid) for durable applications, *Royal Society of Chemistry*, 2016, **6**, 105094.

Zhang F., Li Q., Liu Y., Zhang S., Wu C., Improved thermal conductivity of polycarbonate composites filled with hybrid exfoliated graphite/multi-walled carbon nanotube fillers, *J Therm Anal Calorim Manuf*, 2016, **123**, 431-437.

Zhang X., Geng B., Geng B., Chen H., Chen Y., Wang Y., Zhang L., Liu H., Yang H., Chen J., Extraordinary toughness enhancement of poly(lactic acid) by incorporating very low loadings of noncovalent functionalized graphene-oxide via masterbatch-based melt blending, *Chemical Engineering Journal*, 2018, **334**, 2014-2020.

## **KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER**

**Öncel G.**, Aytaç A., Comparison Of The Effect Of Reduced Graphene Oxide And Multi-Walled Carbon Nanotube On Poly (Lactic Acid) / Polycarbonate Mixtures, *ISCMP'20-IV. International Joint Science Congress of Materials and Polymers*, Tetovo/North Macedonia, 7-10 Ekim 2020.

**Öncel G.**, Aytaç A., Urtekin G., Investigation of the Effects of Reduced Graphene Oxide/Multiwalled Carbon Nanotube Mixtures on the properties of Polycarbonate / Poly (Lactic Acid) Blend, *7. Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Kongresi*, 21-22 Mayıs 2021.



## ÖZGEÇMİŞ

Orta öğrenim ve lise hayatını İstanbul'da tamamladı. 2019 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde Kimya Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Kimya Mühendisliği Ana Bilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Haziran 2020'den beri Türk Henkel firmasında Üretim Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.

