



KARBON NANOTÜP KATKILI POLİAMİT 6 POLİMER NANOKOMPOZİTLERİN
MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gözde KUŞ

Yüksek Lisans Tezi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Mart - 2019

KARBON NANOTÜP KATKILI POLİAMİT 6 POLİMER NANOKOMPOZİTLERİN
MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gözde KUŞ

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Salih Hakan YETGİN

Ortak Danışman: Dr. Öğrt. Üyesi Murat KOYUNBAKAN

Mart - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Gözde KUŞ'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Karbon Nanotüp Katkılı Poliamit 6 Polimer Nanokompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

18.03/2019

Prof. Dr. Önder UYSAL
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Muammer GAVAS
Anabilim Dalı Başkanı, İleri Teknolojiler Bölümü

Dr. Öğr. Üyesi Salih Hakan YETGİN
Danışman, İmalat Mühendisliği Bölümü

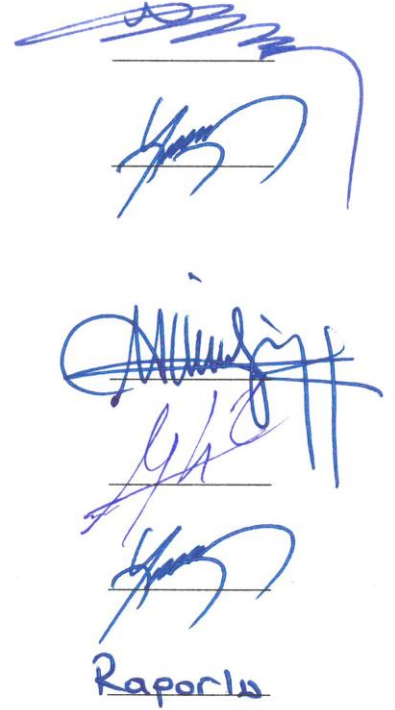
Sınav Komitesi Üyeleri

Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Dr. Öğr. Üyesi Agah AYGAHOĞLU
Makine Mühendisliği Bölümü

Dr. Öğr. Üyesi Salih Hakan YETGİN (Danışman)
İmalat Mühendisliği Bölümü

Dr. Öğr. Üyesi Murat KOYUNBAKAN (Ortak Danışman)
İmalat Mühendisliği Bölümü

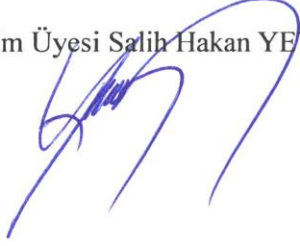


Raporlu

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %23 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Dr. Öğretim Üyesi Salih Hakan YETGİN



Gözde KUŞ



KARBON NANOTÜP KATKILI POLİAMİT 6 POLİMER NANOKOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gözde KUŞ

İleri Teknolojiler, Yüksek Lisans Tezi, 2019

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Salih Hakan YETGİN

Ortak Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Murat KOYUNBAKAN

ÖZET

Bu çalışmada, ağırlıkça %0,1; %0,2 ve %0,3 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı poliamit 6 (PA6) polimeri ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemleri ile üretilmiştir. PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlerinin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testi, darbe testi ve eğme testleri, fiziksel özellikleri belirlemek amacıyla yoğunluk ve X-Işını kırınım (XRD) testleri uygulanmıştır. Isıl özelliklerin belirlenmesi için ise diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), termal gravimetrik analiz (TGA) ve dinamik mekanik analiz (DMA) yöntemleri uygulanmıştır. Aşınma ve sürtünme deneyleri, pim-disk cihazında, kuru ortam şartlarında, 10-40 N yük ve 0,4-1,6 m/s kayma hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

DeneySEL çalışmalar sonucunda, PA6 polimerine ilave edilen %0,1 oranındaki ÇDKNT çekme dayanımını, elastiklik modülünü, eğme mukavemetini ve eğmedeki elastiklik modülünü azaltırken artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak özelliklerin arttığı belirlenmiştir. ÇDKNT miktarına bağlı olarak camsı geçiş sıcaklığı (T_g), kristallenme oranı ($\%X_c$), depolama modülü (E') ve kayıp modülü (E'') artmıştır. XRD sonuçlarına göre, PA6 polimerinin kuvvetli γ -formu oluşturduğu, PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT katkıların ise α -formu olduğu belirlenmiştir.

PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlerin artan yük ve kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmıştır. PA6 polimerine eklenen ÇDKNT katkıları ile sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı önemli oranda azalmıştır. En düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı %0,3 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozit numunelerinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (ÇDKNT), Mekanik özellikler, Poliamit 6 (PA6), Sürtünme, Termal özellikler.

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CARBON NANOTUBE FILLED POLYAMIDE 6 POLYMER NANOCOMPOSITES

Gözde KUŞ

Advanced Technologies, M. S. Thesis, 2019

Thesis Supervisor: Asist. Prof. Dr. Salih Hakan YETGİN

Thesis Co- Adviser: Asist. Prof. Dr. Murat KOYUNBAKAN

SUMMARY

In this study, 0,1; 0,2 and 0,3 wt% multi-walled carbon nanotube (MWCNT) filled polyamide 6 (PA6) polymers were produced by extrusion and injection molding methods. In order to determine mechanical properties such as tensile test, impact test and bending tests, and physical properties such as density and X-ray diffraction (XRD) tests were applied to PA6 polymer and PA6 nanocomposites. Also, for the thermal properties, differential scanning calorimeter (DSC), thermal gravimetric analysis (TGA) and dynamic mechanical analysis (DMA) methods were applied. Wear and friction tests were carried out at the sliding speeds of 0,4-1,6 m/s, applied loads of 10-40 N and under dry conditions by using pin-on-disc system.

As a result of studies, it was determined that the tensile strength, the modulus of elasticity, the bending strength and bending modulus of elasticity decreased with addition of 0,1 wt% MWCNT while the properties increased with increase of the MWCNTs content. The glass transition temperature (T_g), the crystallization rate ($\%X_c$), the storage module (E') and the loss modulus (E'') were increased with MWCNTs content. According to the results of XRD, strong γ -form was formed in PA6 polymer while α -form was formed in the MWCNT filled PA6 polymers.

Coefficient of friction and wear rate of PA6 polymer and PA6 nanocomposites increases with increase both applied load and sliding speed. The coefficient of friction and wear rate of the PA6 polymer decreased significantly with the addition of MWCNTs. The lowest coefficient of friction and the wear rate were obtained in 0,3 wt% MWCNT filled PA6 nanocomposites.

Keywords: Friction, Mechanical properties, Multi-walled Carbon Nanotube (MWCNT), Polyamide 6 (PA6), Thermal properties, Wear.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana yardımcı olan maddi, manevi ve engin bilgi birikimini paylaşan başta danışmanım, değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Salih Hakan YETGİN'e teşekkür ederim.

PA6 kompozitlerin üretiminde makine, laboratuvar ve teçhizat imkânı sağlayan Gama Alfa Plastik İnovasyon San. ve Tic. A.Ş. firmasına ve bu firmadan Selin ÇELEBİ Hanım'a teşekkür ederim.

Bu çalışmada manevi desteğini esirgemeyen ve hep yanımda hissettiğim, bugünlere gelmemde hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim annem ve babama sonsuz teşekkür eder, onlara ithaf ederim.

Bu çalışma, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje kodu: 2016-90). Proje ekibi; Dr. Öğr. Üyesi Murat KOYUNBAKAN, Dr. Öğr. Üyesi Salih Hakan YETGİN, Dr. Öğr. Üyesi Ferhat YILDIRIM, Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK ve Abdurrahman GENÇ'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
 1. GİRİŞ.....	 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	10
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	11
3.2. Polimer Matrisli Kompozitler.....	12
3.2.1. PA6 polimeri ve özellikleri.....	13
3.3. Nanokompozit Malzemeler	17
3.3.1. Polimer matrisli nanokompozitler	18
3.3.2. Polimer matrisli nanokompozitlerin üretim yöntemleri	20
3.4. Karbon Nanotüpler (KNT)	21
3.4.1. Karbon nanotüp çeşitleri.....	23
3.5. Karbon Nanotüplerin Yapısal Özellikleri ve Kimyasal Davranışları.....	26
3.5.1. Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri	27
3.5.2. Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri	27
3.5.3. Karbon nanotüplerin ısısal özellikleri.....	28
3.5.4. Karbon nanotüplerin uygulama alanları	28
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler.....	29
4.2. Ekstrüzyon (Kampaund) Prosesi	30
4.3. Enjeksiyon Prosesi ile Üretim	30
4.4. Yoğunluk Testi	33
4.5. Çekme Deneyi	33
4.6. Eğilme Deneyi	35

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.7. Darbe Deneyi	35
4.8. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi (DSC)	36
4.9. Termal Gravimetrik Analizi (TGA)	36
4.10. Dinamik Mekanik Analizi (DMA)	37
4.11. X Ray Difraktometresi (XRD)	38
4.12. Taramalı Elektron Mikroskop Analizi (SEM)	38
4.13. Aşınma Testleri	39
5. DENEY SONUÇLARI	41
5.1. Mikro Yapı İncelemeleri	41
5.2. Yoğunluk Testi Sonuçları	41
5.3. Mekanik Deney Sonuçları	42
5.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analiz (DSC) Sonuçları	49
5.5. Termal Gravimetrik Analiz (TGA) Sonuçları	52
5.6. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Sonuçları	53
5.7. X Ray Difraktometresi (XRD) Sonuçları	57
5.8. Aşınma ve Sürtünme Deneyinin Sonuçları	59
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
6.1. Sonuçlar	67
6.2. Öneriler	68
KAYNAKLAR DİZİNİ	69
 EKLER	
1. Uygulanan yük ve kayma hızına bağlı olarak poliamit 6 (PA6) ve çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkı PA6 nanokompozitlerinin sürtünme katsayısı değerleri	
2. Uygulanan yük ve kayma hızına bağlı olarak poliamit 6 (PA6) ve çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkı PA6 nanokompozitlerinin aşınma oranı değerleri	
 ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Poliamit 6 polimerinin kimyasal zincir yapısı	14
3.2. Nano boyuta sahip dolgu maddelerinin şematik gösterimi	18
3.3. Kil taneciklerle takviye edilmiş polimerik kompozit yapı	20
3.4. Grafin tabakası	22
3.5. Karbon nanotüp	22
3.6. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler	23
3.7. Grafit levhanın silindirik şekilde sarılması sonucu TDKNT eldesi	24
3.8. Çok duvarlı karbon nanotüp modelleri	25
4.1. ÇDKNT katkının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü	29
4.2. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin ekstruder üretim süreci	30
4.3. Hastec Borche marka enjeksiyon makinası	31
4.4. Enjeksiyon makinasında kullanılan: a) çekme numunesi kalıbı, b) darbe ve eğilme kalıpları	31
4.5. Üretilen deney numuneleri	32
4.6. Yoğunluk test cihazı	33
4.7. Çekme deney cihazı	34
4.8. Çekme deneyi numune ölçüleri	34
4.9. İzod darbe deneyi ve çentik açma cihazı	35
4.10. Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı	38
4.11. Altın kaplama cihazı	39
4.12. Pim-disk aşınma cihazı	40
5.1. Nanokompozitlerinin kırık yüzey SEM görüntüleri	41
5.2. PA6 ve PA6 nanokompozitlerinin çekme dayanımı (MPa) grafiği	43
5.3. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin elastiklik modülü (MPa) grafiği	44
5.4. PA6-%0,1 ÇDKNT numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü	44
5.5. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin kopma uzaması (%) grafiği	45
5.6. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin eğilme mukavemeti (MPa) grafiği	46
5.7. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin eğilmedeki elastiklik modülü (MPa) grafiği	47
5.8. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin izod çentikli darbe dayanımı (kJ/m^2) grafiği	48
5.9. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin kopma dayanımı (MPa) grafiği	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.10. PA6 ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin ergime (endotermik) termogramları	51
5.11. PA6 ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin kütle kaybı grafiği	53
5.12. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin Tan Delta (Tan δ) sonuçları	55
5.13. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin depolama modülü (E') sonuçları	56
5.14. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin kayıp modülü (E'') sonuçları	57
5.15. ÇDKNT, PA6 polimeri ile PA6 nanokompozitlerin XRD grafiği	58
5.16. Katkısız PA6 ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (kayma hızı: 0,4 m/s, uygulanan yük: 30 N)	60
5.17. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi: a) 0,4 m/sn, b) 0,8 m/sn, c) 1,2 m/sn, d) 1,6 m/sn	61
5.18. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi: a) 10 N, b) 20 N, c) 30 N, d) 40 N	63
5.19. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi: a) 0,4 m/sn, b) 0,8 m/sn, c) 1,2 m/sn, d) 1,6 m/sn	64
5.20. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi: a) 10 N, b) 20 N, c) 30 N, d) 40 N	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Kompozit yapı eleman tipleri	11
3.2. Katkısız poliamit 6'nın genel özellikleri	16
3.3. Tek duvarlı karbon nanotüp özellikleri	24
3.4. Çok duvarlı karbon nanotüpün genel özellikleri	25
4.1. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin isimleri ve kısaltmaları	29
4.2. Enjeksiyon kalıplama parametreleri	32
5.1. PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlerin yoğunluk testi sonuçları	41
5.2. Endotermik DSC sonuçlarına göre numunelerin ergime sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklığı ve kristallenme oranları	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Amper
Dak	Dakika
Dev	Devir
Dm	Ağırlık Kaybı
E'	Depolama Modülü
E''	Kayıp Modül
g (gr)	Gram
GPa	Giga Pascal
H	Hidrojen
Hm	Ergime Entalpisi
Hz	Hertz Frekans Birimi
j	Joule
Kg	Kilogram
lo	Numunenin İlk Ölçü Boyu
ls	Numunenin Son Boyu
m	Metre
Mg	Miligram
mm	Milimetre
MPa	Mega Pascal
N	Newton
Nm	Nanometre
O	Oksijen
RH	Bağıl Nem
s veya sn	Saniye
Tan δ	Tan Delta
TPa	Tera Pascal
Tg	Camsı Geçiş Sıcaklığı
Tm	Ergime Sıcaklığı
UV	Ultraviyole
X _c	Kristallik
Δl	Numunedeki Uzama Miktarı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

Açıklama

ε	Birim Şekil Değiştirme Oranı
σ	Gerilme
σ_{φ}	Çekme Mukavemeti
μ	Sürtünme Katsayısı

Kısaltmalar

Açıklama

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM	American Society for Testing and Materials
AYPE	Alçak Yoğunluklu Polietilen
Closite 30B	Organokil
COOH	Karboksilik Asit
C_3H_8O	İzopropil Alkol
$C_{15}H_{16}O_2$	Bisfenol A
ÇDKNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
ÇYMAPE	Çok Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
DIN	Deutsches Institut Für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
DMF	Dimetil Formamit
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
GMA	Glisidil Metakrilat
iPP	İzotaktik Polipropilen
KNT	Karbon Nanotüp
LiPF ₆	Lityum Hekza Floro Fosfat
MAN	Maleik-Anhidrit
MFI	Melt Flow Index (Erime Akış İndeksi)
MoS ₂	Molibden Disülfid
NK	Nanokil
NR	Doğal Kauçuk
PA6	Poliamit 6
PA11	Poliamit 11
PA66	Poliamit 66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
PAN	Poliakrilonitril
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEEK	Polieter Eterketon
PEI	Polietilenimit
PEO	Polietilenoksit
PES	Polieter Sülfon
PI	Poliimit
PK	Poliketon
PMMA	Polimetil Metakrilat
PLLA	Poli Laktik Asit
POF	Poliolefin
PP	Polipropilen
PPS	Poli-Fenilen-Sülfid
PS	Polistren
PSU	Polisülfon
PTFE	Politetrafloretillen (Teflon)
PVP	Polivinil Prolidon
SEBS	Stiren-Etilen-Bütillen-Stiren
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
SiO ₂	Silisyum Dioksit
TDKNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TGA	Termal Gravimetrik Analizi
TPU	Termoplastik Poliüretan
TiO ₂	Titanyum Dioksit
TS	Türk Standartları
XRD	X-RAY Difraktometre
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

1. GİRİŞ

Yüzyıllardır insanlar, hayatlarını daha konforlu ve daha kolay hale getirmek için, farklı malzemeler kullanma eğilimi göstermişlerdir. İnsanlık ilk olarak taş, tahta, kemik ve demir gibi doğal malzemeleri kullanmıştır. 1800’lü yıllardan bu yana lastik, kauçuk ve reçine gibi çok yönlü malzemeler bulunmuş ve geliştirilmiştir. İlk plastik (polimer) malzeme ise; 1862 yılında, Alexander Parkes tarafından icat edilmiş ve yine 1862 yılında Uluslararası Büyük Londra Fuarı’nda sergilenmiştir. Yaşanan bu sürecin ardından, birçok çeşit plastik geliştirilmiş ve plastiklerin kullanımı yaygınlaşmıştır (Hatipoğlu, 2014).

Plastik malzemeler, son yıllarda önemli gelişmeler göstermiştir. Günlük yaşamımızda ve endüstrinin birçok alanında plastik malzemelerin kullanımını görmekteyiz. Plastikler (polimerler)genel özellikleri yönünden çelik ve diğer malzemelerden farklıdır. Plastik malzemeler, avantajlı özelliklere sahip olmasından dolayı kullanım alanları giderek artmaktadır. Beyaz eşya, otomotiv, spor ekipmanları, havacılık, taşımacılık, inşaat sektörleri, sağlık alanı, ambalaj sektörleri ve birçok alanda geniş kullanım alanına sahip malzemelerdir (Plastik, 2018).

Polimerler gelişmiş özelliğinin yanı sıra işlevsel (mekanik) özellikleri açısından incelendiğinde sertlik, dayanıklılık gibi özelliklerinin düşük olması, plastik malzemelerin güçlendirilmesi ve geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmasına neden olmuştur (Arıcasoy, 2006; Demirel, 2007; Özsoy, 2015).

Polimer malzemelerin yoğunluğunun az olması önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple, ağırlığın kritik olduğu bütün sektörlerde, örneğin uzay ve otomotiv sanayilerinde polimerler vazgeçilmez bir tercih olarak kullanılmaktadır. Polimer malzemeler çeliğin kullanıldığı pek çok alanda %60-80 ve alüminyumun kullanıldığı alanlarda %20-50 oranlarında ağırlıktan kazanma imkanı sağlamaktadır. Havalandırma sistemlerinde kullanılan alüminyum yerini alabileceği gibi uçağın pek çok bölgesinde kullanılabilir. Ağırlık azalmasının yakıt tasarrufu için önemli bir etken olduğu düşünülen otomotiv sektöründe, 1970’li yıllarda 900 kg olan ortalama otomotiv ağırlığı günümüzde 700 kg’a kadar düşürülmüştür (Saylan, 2010).

Polimerler üretim yöntemleri açısından büyük avantajlara sahiptir. Ekstrüzyon, enjeksiyonla kalıplama, döner kalıplama, ısı ile şekillendirme gibi çeşitli imalat yöntemleri ile üretilmektedir. Polimer malzemelere eklenen farklı katkıları ile özelliklerinin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ile endüstrinin farklı alanlarında, polimer ve polimer nanokompozitler olarak kullanımı giderek artmaktadır (Kurt, 2010).

Plastik işlemede en önemli şekillendirme yöntemlerinden biri olan enjeksiyon kalıplama yöntemi ile parçalar ekonomik, büyük miktarlarda ve tasarım özgürlüğü ile üretilebilmektedir. İçten dişli, alttan kesme, dişleme veya free form yüzeyleri de mümkündür. Döner bir plastikleştirme vidası, plastik ham maddeleri sıcaklık etkisiyle eritir ve plastikleştirilen kütleyi vida ucuna doğru taşır. Ardından eriyik, plastikleştirme vidasının yüksek basınç altında aksinel hareketiyle, kapalı olan ve içinde istenen parçanın şeklinde bir boşluk (kavite) bulunan bir kalıbın içine enjekte edilir. Bir soğutma veya sertleştirme aşamasından sonra enjeksiyon kalıbı açılır ve bitmiş parçalar kalıptan çıkarılır (Arburg, 2018).



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı farklı polimer nanokompozitlerinin, mekanik, termal ve tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalar verilmiştir.

Kumar ve arkadaşları (2015), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) matris malzemesine farklı oranlarda (%0,05; 0,1) çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) ilaveli nanokompozitlerinin aşınma davranışlarını incelemiştir. Aşınma deneyleri ball-on disk cihazında, 5 N yük, 200 dev/dak. hız ve 2 saat süre ile yapılmıştır. Deneyler sonucunda, sürtünme katsayısındaki azalmayı KNT'lerin sürtünme sırasında katı yağlayıcı etkisi göstermesine bağlamışlardır. KNT tabakalarının birbirine güçlü van der Waals bağları ile bağlandığını belirlemiştir. Sürtünme katsayısındaki azalmanın bir diğer sebebini ise yüzeydeki KNT'lerin, pürüzlerin arasına girip yuvarlanma etkisi göstererek sürtünme etkisini azaltması olarak açıklamışlardır.

Lee ve arkadaşları (2014), çalışmalarında poliamit 66 (PA66) matris malzemesine %1 oranında ÇDKNT katkısı ilave edilerek hazırladıkları nanokompozit malzemelerin aşınma davranışları incelenmiştir. Deneyler sonucunda, sürtünme katsayısındaki azalmanın sebebini, karbon nanotüplerin yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde aşınma yüzeyindeki ısınmayı azaltması olarak açıklamışlardır.

Wei ve arkadaşları (2006), çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) matris malzemesine farklı oranlarda (%1, %2, %5) KNT ilave ederek elde ettikleri nanokompozitlerinin aşınma davranışlarını incelemiştir. Deneyler sonucunda KNT miktarı arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır. Sürtünme katsayısındaki azalmayı, matris malzemeye ilave edilen KNT ile yeni bir mikroyapı ve ara yüzeyde güçlü bağların oluşması olarak açıklamışlardır.

Yang ve arkadaşları (2005), çalışmalarında polimetilmetakrilat (PMMA) matris malzemesine farklı oranlarda KNT ilavesinin sürtünme katsayısına etkisini incelemiştir. Nanokompozitlerinin sürtünme katsayısı % KNT miktarının artması ile azalmıştır. Özellikle, %1'in altında KNT ilavesinin sürtünme katsayısını hızlı bir şekilde azalttığını belirlenmiştir. Ayrıca % KNT'nin artması ile sürtünme katsayısı daha kararlı hale gelmiştir. Bu durumu, KNT'lerin mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklerine sahip olmasına bağlamışlardır.

Dong ve arkadaşları (2008), polimetilmetakrilat/polistren matris malzemesine farklı oranlarda (%0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0) ÇDKNT ilavesinin sürtünme katsayısına etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, en düşük sürtünme katsayısı %1,5 ÇDKNT katkılı numunelerde elde edildiği belirtilmiştir.

Kaştan (2015), poliamit 6 (PA6) matris malzemesine farklı yükler altında ve farklı oranlarda NK ve PE-g-MA ilavesinin aşınma davranışlarına etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda yükün artması ile sürtünme katsayıları azaldığı belirlenmiştir. Nanaokil katkısı ile sürtünme katsayısı azalmıştır.

Konovalova ve arkadaşları (2014), yaptıkları çalışmada PA66 matris malzemesine farklı oranlarda modifiye edilmiş closite-30B ve SEBS-g-MA ilaveli nanokompozitlerinin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kayma hızı arttıkça aşınma miktarının arttığını gözlemlemişlerdir.

Xia ve arkadaşları (2004), çalışmalarında TDKNT katkılı PP nanokompozitlerini hazırlamışlardır. KNT katkının, sürtünme katsayısı ve aşınma davranışlarına etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda kayma hızı ve yükün artması ile PP nanokompozitlerinin aşınma direncinde artış gözlemlemişlerdir. PP polimerine eklenen KNT katkının, nanokompozitlerin ara yüzey etkileşimlerini arttırdığı belirlenmiştir.

Valentino ve arkadaşları (2008), kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle elde ettikleri karbon nanotüpleri kullanarak AYPE/ÇYMAPE/ÇDKNT nanokompozitlerini hazırlamışlardır.

Çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) ve alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) matris malzemesine farklı oranlarda (0,5; 1; 2,5; 5; 7) ÇDKNT katkısı eklemişler ve hazırladıkları nanokompozitlerinin aşınma davranışlarına ÇDKNT katkısının etkilerini incelemişlerdir. ÇYMAPE polimeri matris olarak seçildiğinde ÇDKNT dağılımının daha iyi olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan oda sıcaklığında nanokompozitlerin içindeki ÇDKNT oranları %0,5 ile %2,5 arasında olduğunda AYPE/ÇDKNT ve ÇYMAPE/ÇDKNT nanokompozitlerinin elektriksel iletkenlik ve aşınma dirençlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Jurczyk ve arkadaşları (2007), epoksi reçineye %0,1 oranında çok duvarlı ÇDKNT ilaveli nanokompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, %0,1'lik ÇDKNT katkısı ile mekanik özelliklerinde iyileşme elde ettiklerini, elastiklik modülünün %20 arttığını belirlemişlerdir. Ancak mekanik iyileştirmeler için daha fazla oranda ÇDKNT katkısı kullanılması gerektiğini açıklamışlardır.

Sirong ve arkadaşları (2007), polimetilmetakrilat matris malzemesine farklı oranlarda (%0,05; 0,1; 0,25; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5) karbon nanotüp ilave ederek hazırladıkları nanokompozitlerle yaptıkları çalışmada, KNT miktarının sürtünme katsayısına etkisi incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sürtünme katsayısındaki azalmayı % KNT miktarının artmasına bağlamışlardır. Özellikle %1'in altında KNT ilavesinin sürtünme katsayısını hızlı bir şekilde düşürdüğü belirlenmiştir. Bu durum, KNT'lerin mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklerine sahip olmasına bağlanmıştır.

Dong ve arkadaşları (2006), çalışmalarında PE matris malzemesine farklı oranlarda (%1, %2, %5) ÇDKNT ilaveli nanokompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda nano katkı miktarının artması ile de sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısındaki azalmayı matris malzemesine ilave edilen ÇDKNT katkısı ile yeni bir mikroyapı oluşması ve PE/ÇDKNT arasındaki ara yüzeyde, yeni ve güçlü bağların oluşması olarak açıklanmıştır.

Wei ve arkadaşları (2006), çalışmalarında yüksek yoğunluklu polietilen matris malzemesine farklı oranlarda (%0,05; 0,1) karbon nanotüp ilaveli nanokompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, matris malzeme içerisine ilave edilen KNT oranının artması ile sürtünme katsayısı azalmıştır.

You ve arkadaşları (2014), çalışmalarında PA6/nano-TiO₂ nanokompozitlerine ilave ettikleri MoS₂, PE ve PTFE katkılı nanokompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PE veya PTFE katkıları ile sürtünme katsayısı ve aşınma değerleri iyileşirken, PA6/TiO₂ nanokompozitine MoS₂ ilave edildiğinde tribolojik özelliklerinin kötüleştiğini belirlenmiştir.

Brian ve arkadaşları (2009), Farklı oranlarda (%1, %3, %5) KNT ilaveli PE nanokompozitlerinin aşınma davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda KNT katkı ile aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir.

Kanagaraj ve arkadaşları (2007), çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen matris malzemesine karbon nanotüp ilaveli nanokompozitlerinin mekanik özellikleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, nanokompozit içerisindeki KNT miktarının artması ile yük transferi etkisinin arttığı ve mekanik özelliklerinin iyileştiği, hacimsel aşınma oranı ve tokluğun ise kararlı yapıda olduğunu açıklamışlardır. ÇYMAPE/KNT nanokompozitinde erime noktası ve oksitlenme sıcaklığının etkilemediği ancak kristallenme oranının arttırdığı belirlemişlerdir.

Xue ve arkadaşları (2006), PE matris malzemesine KNT ilaveli nanokompozitlerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, eklenen KNT ilavesiyle aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir.

McNally ve arkadaşları (2005), ÇDKNT katkılı PE nanokompozitleriyle yaptıkları çalışmada ÇDKNT katkısının mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, nanokompozitlerdeki gerilme direnci ve kopma uzaması ÇDKNT ilavesi ile azalmış, nanokompozitlerin mekanik özellikleri ÇDKNT katkısı ile iyileşme gösterdiğini belirtmişlerdir.

Zou ve arkadaşları (2003), farklı oranlarda (%1-2) ÇDKNT ve SiO₂ katkılı YYPE nanokompozitleriyle yaptıkları çalışmada, ÇDKNT ve SiO₂ katkılarının mekanik ve termal özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, %1'lik ÇDKNT ve SiO₂ katkıları ile nanokompozitlerin mekanik özelliklerinde iyileşme görmüşlerdir. TGA incelemelerinde ise %2'lik ÇDKNT ve SiO₂ katkılı nanokompozit konsantrasyonda sabitlendiğini ve karışım yapılırken vida hızının yüksek olmasının kompozitin dolgu malzemesinin nispeten daha iyi olacağını belirtmişlerdir.

Tang ve arkadaşları (2003), ÇYMAPE/ÇDKNT nanokompozitleriyle yaptıkları çalışmada ÇDKNT katkısının mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, kompozit film içeriğindeki ÇDKNT katkı oranının artması ile sertliğinin, akma mukavemetinin ve kırılma tokluğunun arttığını belirtmişlerdir.

Loos ve arkadaşları (2008), çok duvarlı karbon nanotüp ilaveli epoksi nanokompozitlerini hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda, çekme mukavemetinde meydana gelen önemli değişimleri, epoksi matris içerisine ilave edilen %0,25 ÇDKNT katkılı nanokompozitlerde elde etmişlerdir. Çekme mukavemetindeki bu artışı ÇDKNT'ün mükemmel mekanik özelliklerinden, üretim sırasında matris içerisindeki ÇDKNT dağılımının düzgün olması ve ÇDKNT matris arasında oluşan güçlü yapışma etkisi olarak açıklamışlardır.

Sagar ve arkadaşları (2014), doğal kauçuk matris malzemesine farklı oranlarda (%0; 0,1; 0,3; 0,5; 1) çok duvarlı karbon nanotüp ilaveli nanokompozit numuneler hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda, NR matris içerisindeki ÇDKNT oranının artması ile nanokompozitlerin Tg sıcaklığının arttığını tespit edilmiştir. NR/ÇDKNT nanokompozitlerin başlangıç erime sıcaklığı (T_m) değerlerinin artan ÇDKNT oranını ile arttığı görülmektedir. Bu durumu kauçuk matrisdeki KNT bağlarının, polimer zincir ile nano ölçekte etkileşip faz değişikliklerine karşı direnerek nanokompozitlerin faz geçiş aralığını genişletmesinin sebep olduğu açıklamışlardır.

Lizundia ve arkadaşları (2012), PLLA matris malzemesine farklı oranlarda (%0,75; 1,25; 2,5; 4; 5) ÇDKNT katkılı nanokompozit numunelerin termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, nanokompozitlerin Tg değerleri, ÇDKNT katkısı ile artmıştır. Bu artışın sebebini polimer zincirleri ile ÇDKNT'nin yüzey alanının artması, artan karbon nanotüplerin küçük taneciklerin bir arada kompakt hale getirilmesine sebep olmasından kaynaklanmış olabilirliği açıklamışlardır. Ancak Tm değerleri incelendiğinde PLLA matrise ilave edilen ÇDKNT'nin etkili olmadığı gözlemlenmiştir.

İbrahim ve arkadaşları (2012), PEO matris malzemesine farklı oranlarda LiPF₆, EC ve KNT ilaveli nanokompozitlerin termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, nanokompozitlerin DSC sonuçları, eklenen KNT katkısı matris arasında ısı iletimi artırdığı için Tg değerleri artmış ve kristallik oranı azalmasından dolayı da Tm değerlerini azalttığını belirtmişlerdir.

Ambuken ve arkadaşları (2014), TPU matris malzemesi içerisine farklı oranlarda poliamit 11, Cloisite 30B ve çok duvarlı karbon nanotüp ilaveli nanokompozit numuneler hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda, matris malzemesine ilave edilen CI ve ÇDKNT'nin ısı geçişi sırasında bariyer özelliği göstererek Tg sıcaklığını artırdığı belirtmişlerdir.

Yang ve arkadaşları (2007), bisfenol-A/epoksi matris malzemesine çok duvarlı karbon nanotüp katkılı nanokompozit numuneler hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda, TEM görüntülerine göre ÇDKNT katkılı nanokompozitlerin ince tabaka şeklinde olduğu epoksi matris içindeki ÇDKNT'lerin homojen dağılımı ve epoksi/ÇDKNT etkileşiminin gelişmesine katkı sağladığını belirtmişlerdir. Eklenen nano katkı ile darbe mukavemeti, eğme mukavemeti ve termal özellikler artırılmıştır. Benzer sonuçları Gojny ve arkadaşları (2005), nano takviyeli epoksi/nanokompozitleriyle yaptıkları çalışmalarında elde etmişlerdir.

Lee ve arkadaşları (2009), epoksi/ÇDKNT nanokompozitlerinde ÇDKNT katkının termal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, epoksi/ÇDKNT katkılı nanokompozitlerin depolama modülü, KNT katkısı ile artış göstermiştir.

Meincke ve arkadaşları (2004), PA6/KNT ilaveli nanokompozit numunelerin mekanik ve elektriksel özelliklerinde KNT katkının etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, karbon nanotüp katkılı PA6 nanokompozitlerinin, mekanik özellikleri incelendiğinde KNT katkısı ile çekme dayanımı ve elastiklik modülü sonuçlarında artış elde etmişlerdir. Benzer sonuçları Xia ve arkadaşları (2003), PA6/KNT katkılı nanokompozitlerde elde etmişlerdir.

Liu ve arkadaşları (2004), eriyik harmanlama methodu ile farklı oranlarda ÇDKNT ilaveli PA6 nanokompozitlerini hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda, katkısız PA6 polimerine ÇDKNT ilavesi ile elastiklik modülü ve akma mukavemeti artmıştır. Benzer sonuçları Zhang ve arkadaşları (2003), PA6 nanokompozitleriyle yaptıkları çalışmada elde etmişlerdir.

Hou ve arkadaşları (2005), PAN/ÇDKNT nanokompozit numunelerini hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda, ÇDKNT katkısı, nanokompozit numunelerin paralel yönlendirilmiş olduğunu belirtmişlerdir. ÇDKNT katkı miktarının artması ile mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileşmiştir. Benzer sonuçları Chae ve arkadaşları (2006), PAN/ÇDKNT nanokompozitleriyle yaptıkları çalışmalarında elde etmişlerdir.

Fornes ve arkadaşları (2006), eriyik harmanlama methodu ile hazırladıkları PC/ÇDKNT ve PC/ÇDKNT nanokompozit numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonucunda, ÇDKNT katkısı PC polimeri içinde daha kolay dağıldığını gözlemlemişlerdir. PC polimerine eklenen ÇDKNT'ler, ÇDKNT'lere göre daha fazla sertlik ve mukavemet özelliği göstermiştir.

Zou ve arkadaşları (2004), ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama tekniği ile YYPE/ÇDKNT nanokompozit numunelerini hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda, izod darbe dayanımı ÇDKNT katkısı ile artmıştır. YYPE/ÇDKNT nanokompozitlerinde yaklaşık %1 ÇDKNT konsantrasyonunda gelişmiş mekanik özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir.

Xiao ve arkadaşları (2007), polietilen matris malzemesine çok duvarlı karbon nanotüp ilaveli nanokompozitlerinin mekanik ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, ÇDKNT katkılı numunelerin elastiklik modülü ve çekme mukavemeti arttırdığı belirlenmiştir.

Tong ve arkadaşları (2004), PE matris malzemesine ÇDKNT katkısı ile hazırladıkları nanokompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, ÇDKNT akma dayanımı, gerilme mukavemeti ve modülü, kopma mukavemeti, katkısız PE polimerine göre artış göstermiştir.

Ogasawara ve arkadaşları (2003), PI matris malzemesine ÇDKNT ilaveli nanokompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PI polimerine ilave edilen ÇDKNT katkısı, Tg sıcaklığı, elastiklik modülü ve akma mukavemeti artmıştır. Benzer sonuçları Yu ve arkadaşları (2005), ÇDKNT katkılı PI nanokompozitleri ile yaptıkları çalışmalarda elde etmişlerdir.

Liu ve arkadaşları (2006), polieterimit polimerine ÇDKNT katkılı nanokompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, %1 ÇDKNT ilavesi ile Tg sıcaklığı artmıştır. Mekanik özellikleri incelendiğinde ise eklenen KNT katkısı ile elastiklik modülü artış göstermiştir.

Wang ve arkadaşları (2006), PEO ile uyumlu hale getirilmiş PMMA/ÇDKNT katkılı nanokompozit numunelerin termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, ÇDKNT katkısı ile depolama modülü değerlerinde artış gözlenmiştir. Benzer sonuçları Velasco Santos ve arkadaşları (2003), PMMA/ÇDKNT kompozitleriyle yaptıkları çalışmada da elde etmişlerdir.

Manchado ve arkadaşları (2005), TDKNT katkılı iPP nanokompozitlerinin termal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, eklenen TDKNT miktarı ile kristal yapıda değişiklik olmamıştır. Polimer kristalizasyon oranı ise artmıştır. Mekanik özelliklerin etkisi incelendiğinde ise iPP polimerine ilave edilen TDKNT katkısı ile elastiklik modülü ve gerilme mukavemeti artmıştır.

Shim ve arkadaşları (2010), PP matris malzemesine glisidil metakrilat katkılı ÇDKNT'lerin (PP/GMA/ÇDKNT) etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, ÇDKNT katkısı ile PP/GMA/ÇDKNT nanokompozitlerinin depolama modülü, kayıp modülü ve viskozitesi artmıştır.

Safadi ve arkadaşları (2002), PS polimerine %2,5 oranında ÇDKNT katkılı nanokompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, %2,5 ÇDKNT katkılı nanokompozitlerin çekme mukavemeti artmıştır.

Xiong ve arkadaşları (2006), PU polimerine ÇDKNT ilaveli nanokompozit numunelerin termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, ÇDKNT katkılı nanokompozitlerin Tg değerleri artmıştır.

Tez çalışması kapsamında, %0,1; %0,2 ve %0,3 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı PA6 nanokompozitleri, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon kalıplama yöntemleri ile üretilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında, fiziksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla yoğunluk testleri, termal özelliklerin belirlenmesi amacıyla DSC ve TGA testleri, mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme, eğme ve darbe testleri, tribolojik özelliklerin belirlenmesi amacıyla da aşınma ve sürtünme testleri yapılmıştır. PA6 polimerine ilave edilen farklı oranlardaki %0,1; 0,2; 0,3 ÇDKNT katkının mekanik, termal ve tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Günümüzde geleneksel malzemeler tüm gereksinimleri karşılayamamaktadır. Teknolojinin ilerlemesi ve buna paralel malzeme teknolojisindeki gelişmeler üreticileri ve araştırmacıları yeni malzeme arayışına veya mevcut malzemeleri geliştirmeye yöneltmiştir. Malzemelerden istenilen en önemli özellikler; mukavemet, malzemenin enerjiyi absorbe etme yeteneğini, hafiflik, kolay ulaşılabilirlik, korozyon dayanımı, elektrik iletkenliği, termal dayanım, fiyat, ağırlık ve estetik görünüm olmasıdır.

Geleneksel malzemelerin aşınma, mukavemet, kırılma tokluğu, hafiflik gibi özellikleri ihtiyaçlara cevap verememektedir. Bu yüzden iki veya daha çok malzemenin istenilen özelliklerin tek bir malzemede elde edilmesi veya yeni bir özellik elde edilmesi ile yeni bir malzeme oluşumu, bugün araştırma konularının büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Artıkompozit, 2018).

Kompozit malzemeler, ısı ve neme karşı dayanıklı, metallere göre hafif ve mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Düşük maliyet, yüksek dayanım ve hafifliğini korurken, aşınma direnci, gelişmiş görünüm ve mükemmel ısıl genleşme özellikleriyle en çok tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır.

Kompozitlerin üstün özelliğinin yanında sertlik ve dayanıklılık gibi özelliklerinden dolayı literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Polimer kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı direnç gibi özellikleriyle pek çok avantajlar sunmaktadır. Ayrıca kompozit malzemeler dayanıklılık ve sertlik yönünden metallerle yarışabilecek olmasının yanında çok da hafiftir (Artıkompozit, 2018).

Kompozit malzeme üretiminde aşağıda verilen bazı özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

- Korozyon direnci,
- Kırılma tokluğu,
- Sıcaklığa dayanıklılık,
- Mekanik dayanım, çekme, eğilme, basma, basınç, çarpma dayanımı,
- Isı iletkenliği,
- Yorulma dayanımı, aşınmaya karşı direnç,
- Elektrik iletkenliği,
- Yüksek rijitlik,

- Ağırlığın az olması,
- Estetik ve şık görünüm gibi özellikler şeklinde sıralanabilir (Ersoy, 2001).

Fakat yukarıda belirtilen bu özellikler için gerekli şartlar; uygun matris ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, optimizasyonu bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür. Uygun matris/takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi önemlidir. Çünkü kompozit içerisinde matris tarafından yükün takviye elemanına iletilmesinde matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının da kuvvetli olması gerekmektedir. Ara yüzey bağının kuvvetli olması ise bileşenlerin uyumuna ve matrisin ısılatıla bilirlik özelliğine bağlıdır. Ayrıca, takviye elemanlarının matris içerisinde homojen dağılımı da önemli bir faktördür (Şahin, 2006).

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, takviye elemanı ve matris olmak üzere iki gruptan oluşmaktadır. Bu yapı elemanlarının türleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir (Şahin, 2000). Matris türüne göre kompozitlerin gruplandırılması metalik kompozitler, seramik kompozitler ve polimer kompozitler şeklinde üç gruba ayrılmıştır. Kompozitlerin takviye elemanı açısından gruplandırılması ise takviye elemanının şekline göre belirlenir. Bu yaklaşımla kompozitler; lif/fiber takviyeli kompozitler ve tanecik takviyeli kompozitler şeklinde iki gruba ayrılır.

Çizelge 3.1. Kompozit yapı eleman tipleri (Şahin, 2000).

Matris Malzemeler	Takviye Elemanları	Kompozit Yapının Şekli
Polimer Matrisli	Kil-Kristal	Tabakalar
	Lifler	Filament Sarılmış Yapılar
Metal Matrisli	Yonga	Kaplamalar
Seramik Matrisli	Granül	Fil-Folye
	Pudra	Bal Peteği

Metal matrisli kompozitler için matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilmektedir. Magnezyum, nikel, kobalt, çinko, bakır, titanyum, alüminyum, gibi hafif metal ve alaşımların matris işlevleriyle; boron, karbon ve diğer bazı metal elyaf, parçacık, plakacık, yapısında takviye fazını oluşturmasından meydana gelmektedir (Turhan, 2007).

Seramik matrisli kompozitler, matris malzemelerinin (Al_2S_3 , Ni_3N_4 , SiC gibi), seramik veya plaka, metal parça, elyaf veya kristal olarak takviyesiyle oluşturulan, üstün ısı dayanım ve mukavemete sahip malzemeler gurubudur (Turhan, 2007).

Polimer kompozitler, kompozit malzemelerin %90'ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. İleri plastik/polimer grubu matris malzemelerin çoğunlukla elyaf formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilmeleri bu gruptaki kompozit malzemeleri oluşturur. En tipik örnek, artık günümüzde gelenekselleşmeye başlayan ve “fiberglas” olarak bilinen poliester esaslı reçinelerin cam elyafla takviyesiyle üretilen malzemelerdir. Ancak ileri kompozitler grubunda daha üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaflar kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek dayanım (çekme ve basma dayanımı), yüksek elastiklik modülü ve yüksek tokluğa sahiptir (Ersoy, 2000).

Kompozit malzemede takviye elemanlarının başlıca görevi, matris içinde homojen şekilde dağılıp, matris fiberleri bir arada tutarak fiberlere yük aktarmada köprü görevi görmektedir. Ayrıca matrisin maruz kaldığı gerilmeleri iyileştirerek kompozit malzemenin mukavemetini arttırmaktır. Yapıya formunu koruyarak şekil verir. Matris fiberleri birbirinden izole eder. Böylece fiberler birbirlerinden farklı ve bağımsız davranırlar.

Matris, aşınma gibi mekanik hasarlara ve çeşitli kimyasal etkilere karşı fiberleri korur. Takviye elemanı matris ile reaksiyona girip istenmeyen ürünler oluşturmamalıdır. Takviye malzemesi ve matrisin termal genleşmeleri birbirinden farklı olmamalıdır. Maruz kaldıkları ısı değişiminde birbirlerini zayıflatıcı etki göstermemelidir (Haris, 1986). Takviye elemanları, tanecikli takviye elemanı ve lif/fiber olarak iki gruba ayrılmaktadır. Kıl, silikatlar, mikroküreler, metal tozları veya parçaları, pudra ve tarımsal atıklar kullanılan tanecikli takviye elemanları arasında yer almaktadır. Tanecikli takviye elemanları kompozitlerinin yapımı kolaydır ve fiyat olarak ucuzdur (Saçak, 2002). Makroskobik açıdan homojen olan lifler, boyu kesitinin 100 katı olan esnek malzemeler şeklindedir. Karbon lifi, aramit lifi, farklı cam lifleri gibi değişik yapılı lifler kompozitlerde takviye amacı ile kullanılır. Liften hazırlanmış kompozite ve bu tür polimerlere lif takviyeli polimerik kompozit adı verilir (Saçak, 2002).

3.2. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitlerin en önemli özellikleri özgül elastiklik modülü ve yüksek özgül ağırlık/mukavemettir. Bu üstün özellikleri sayesinde polimer matrisli kompozitler, havacılık ve uzay enstitüsünde alüminyum alaşımların yerine tercih edilebilmektedir. Polimer matrisli kompozit malzemeler maliyet açısından ucuzdur. Mekanik özellikleri yönünden incelendiğinde düşük kullanım sıcaklığı ve düşük elastiklik modülüne sahiptir. Polimer matris

olarak bilinen plastikler; termoplastikler, termosetler ve elastomerlerdir. Termoplastik grubunun yaklaşık %68,3'ünü oluşturan termoplastikler, polipropilen ve poliamit grubudur. Bunların yanı sıra, polieter sulfon, polieter eterketon, hibrid formda polietilen ve polibutilen tereftalat kullanımı da dikkat çekmektedir. Ticari kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan az sayıdaki termoplastiklerden ikisi naylonlar ve polikarbonatlardır. Termosetler grubunda ise ağırlıklı olarak epoksi reçine ve poliester kullanılmaktadır. Kullanımı giderek yaygınlaşan bir diğer termoset grubu ise vinil ester/bisfenol ve fenolik reçinelerdir (Saçak, 2002).

Termoset polimerler gibi elastomerler de çapraz bağlı olan uzun zincir moleküllerinden oluşmaktadır. Çok düşük gerilmelere maruz kaldığı zaman büyük elastik deformasyon yapma yeteneği olan polimerlerdir. %500 ve daha fazla uzama yapan bazı polimerler, tekrar eski şekline dönerler. Çok meşhur olan polimerler ise kauçuktur (Şahin, 2000).

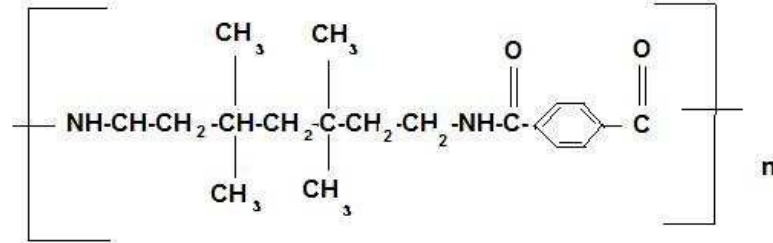
Termoset plastikler yapı olarak sıvı halde bulunurlar. Termosetler ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşır. Termoset polimerinin polimerizasyon süreci geri dönüşü olmayan bir süreç olduğu için termoplastik polimerlerden farklıdır. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar sert yapıdadır (Şahin, 2000).

Oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılan plastikler termoplastiklerdir. Isıtılırsa yumuşar, sıcaklık arttıkça viskozitesi düşer. Bu özelliğinden dolayı termoplastiklerden elde edilen ürünler kolaylıkla şekil alır ve daha ekonomiktir. Tekrar soğutulduğunda ise yeniden sertleşir. Termoplastikler sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda viskozite hali yüksek olduğu için ara yüzey bağı termosetlere göre daha zordur. Ancak şekillendirme olanakları geniş olduğu için termoplastiklerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Şekil olarak termoplastik polimerler şekilsiz (amorf) veya kristalin olabilir. Amorf (şekilsiz) polimerler uzun zincirler şeklinde birçok noktada birbirine dolaşmıştır. Kristal şekilli olanlar ise moleküller büyük uzaklıklarda oldukça düzenli şekildedir (Şahin, 2000).

3.2.1. PA6 polimeri ve özellikleri

Poliamit 6 (PA6) polimeri termoplastik polimer grubu içerisinde yer alan en çok kullanılan poliamit türüdür. Yarı kristalin bir polimerdir. PA6 polimerinin en çok kullanılan poliamit türü olmasının en önemli sebepleri; geniş uygulama alanına sahip olması, hammaddesi olan kaprolaktamın kolay temin edilmesi, polimerin taşınmasının, üretiminin ve geri dönüşümünün ekonomik ve kolay olmasıdır (Morgan, 2005; European, 2007).

Kaprolaktamdan elde edilen poliamit 6 lifleri, sentez sırasında önce kaprolaktam halkası açılarak 6-amino hekzanoik aside [$\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_5\text{-COOH}$] dönüşmektedir. Şekil 3.1’de poliamit 6 polimerinin kimyasal zincir yapısı görülmektedir.



Şekil 3.1. Poliamit 6 polimerinin kimyasal zincir yapısı (Dayıoğlu, 2007).

Termoplastik polimeri olan poliamit 6 diğer geleneksel polimerler ile karşılaştırıldığında, üstün mekaniksel özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık, elektrik/elektronik, tekstil ve ambalaj uygulamalarında sık kullanım alanı bulunan yüksek performanslı polimerdir (Ünal ve Mimaroglu, 2012).

Poliamit 6 polimeri, fazla su emme özelliği, düşük ısı sapma sıcaklığı ve ölçüsel kararsızlığı daha geniş uygulama alanlarında kullanımını sınırlamakta ve dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

Poliamit 6 polimeri sentetik bir termoplastik olup kristallliği yüksek, nem aktivitesi düşük, döküm yöntemi ile imal edilebilen, molekül ağırlığı 80000-100000 arasında değişen naylon türleri içinde fiziksel ve mekanik özellikleri açısından en iyisidir. Bu avantajlı özellikleri sayesinde nem aktivitesi düşük, darbe dayanımı yüksek, işlenebilirliği kolay ve çokça tercih edilen bir termoplastiktir. Poliamit 6 polimerinin erime noktası 220 °C, camsı geçiş sıcaklığı 50 °C ve yoğunluğu 1,12; 1,14 gr/cm³ arasında değişmektedir (Shepherd, 2006).

Poliamit 6 (PA6)’ın monomeri kaprolaktamdır ve polikaprolaktam olarakta bilinir. Altı karbon atomundan oluşan kaprolaktam, bu karbon atomlarının bir ucunda amin grubu, diğer ucunda ise asit grubu bulunmaktadır. Halka yapısında olan kaprolaktam polimerleşerek PA6 polimerini oluşturmaktadır. Poliamit 6 polimerinin üretiminde yüksek saflıkta laktam kullanılmaktadır (Dayıoğlu, 2007).

E-Kaprolaktamın hidrolitik veya anyonik polimerleşmesi ile elde edilir. Hidrolitik polimerleşme, ticari olarak en çok kullanılan yöntemdir. Anyonik polimerleşme, daha çok döküm tekniği için elverişli bir yöntemdir (Taşdemir, 2007).

Poliamitin elde edilisinde, hidrolitik polimerleşmede başlatıcı olarak su kullanılır. Ancak, kimi süreçlerde poliamit 66 tuzu, E-aminokaproik asit ve başka aminoasitlerde başlatıcı olarak kullanılmaktadır. Tipik bir hidrolitik polimerleşme sürecinde, kaprolaktam, %10 su ve molekül ağırlığı denetleyicisi olarak %0,05 kadar asetik asit ile birlikte 250 °C dolayında bir sıcaklıkta tutulur. Bu sıcaklık ortamda bulunan su, kaprolaktamın kısa bir kısmının hidrolizine yol açar. Hidroliz sonucu oluşan E-aminokaproik aside kaprolaktam katılması ve katılma reaksiyonun basamaklı olarak yinelenmesi ile polimer oluşur. Bu polimerleşme bir denge reaksiyonudur (Taşdemir, 2007).

Monomer/polimer dengesi sonucu %100 dönüşümüne ulaşmaz. Dengede monomer konsantrasyonu koşullara bağlı olarak %5-12 dolayındadır. Bu nedenle elde edilen ürün %10 kadar monomer ve oligomer içerir. Polimerden beklenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için monomer ve oligomerlerin ayrılması gerekir. Monomer ve oligomer sıcak suda çözünabilir polimer ise çözünmez. Bu çözünürlük özelliğinden hareketle, ürünün sıcak su ile yıkanması ile monomer ayrılır. Monomerin ayrılması için bir başka yöntemde vakum damıtmasıdır. Kaprolaktam, imid veya izosiyonat bileşikler gibi aktivatörler eşliğinde kuvvetli bazlarla anyonik olarak da polimerleştirilebilir. 150-200 °C'de çok hızlı olan anyonik polimerleşme, kalıplanması güç olan büyük parçaların döküm yöntemi ile hazırlanmasına olanak verir (Taşdemir, 2007).

Katkısız poliamit 6 polimeri, enerjiyi absorbe etme yeteneği, sürünme ve ısıl deformasyona karşı direnç gösterme gibi özelliklere sahiptir. Piyasada mekanik özellikli poliamit 6'nın 4 farklı çeşidi satılmaktadır. Bunlar; darbe dayanımlı, homopolimer, fiber/mineral karışım ve cam elyaf katkı PA 6'dır. Homopolimer poliamit 6 daha çok darbe dayanımlı, prosesi daha kolay olup genellikle standart ve kristal formda üretilir. Poliamit 6'ya bazı plastikleştiriciler ilave edilerek darbe mukavemeti artırılarak elde edilirler. %5-50 oranlarında cam elyaf katkı poliamit 6 çeşitleri mevcuttur. Cam elyaf/mineral katkıların birlikte kullanılması durumunda toplam %20-40 oranlarında cam elyaf ve mineral ilave edilirler (Kaştan, 2005).

Poliamit 6 polimerinden üretilen parçalarının mekanik özelliklerinde ve çalışma şartlarında bazı önemli noktalar vardır. Örneğin nem oranı ve ortam sıcaklığı poliamit 6 polimerinin mekanik özelliklerini yüksek oranda etkilemektedir. Ortam sıcaklığı özellikle 30-35 °C'nin üzerinde olduğunda, elastiklik modülünde belirgin oranlarda azalmaktadır. Cam elyaf katkı poliamit 6 malzemeler 150 °C'ye kadar olan ortamlarda kullanılabilirler. Çizelge 3.2'de katkısız poliamit 6'nın genel özellikleri verilmiştir (Kaştan, 2005).

Çizelge 3.2. Katkısız poliamit 6'nın genel özellikleri (Kaştan, 2005).

Özellikler	Test Metodu	Birim	Değer
Yoğunluk	-	-	1,14
Basma Dayanımı	DIN 53454	Kg/cm ²	1100
Sertlik	DIN 53505	Shore	85
Darbe Dayanımı	DIN 53453	Kj/cm ²	Kırılmaz
Kopma Uzaması	DIN 53455	%	40
Ergime Noktası	DIN 53736	°C	221
Çekme Dayanımı	DIN 53455	Kg/cm ²	800
Maksimum Kullanım	Sürekli	°C	+120
Sıcaklık	Kısa Süreli	°C	+160
Sürtünme Katsayısı	DIN 53479	μ	0,15
Asitlere Dayanımı	-	-	Zayıf
Bazlara Dayanımı	-	-	İyi

Poliamit 6 diğer polimerlere göre ergime noktası yüksek olan bir polimerdir. Katkısız poliamit 6'nın ergime sıcaklığı (T_m) 220-225 °C'dir. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ise 57 °C'dir. Viskozite, 280 °C'de, karışıma bağlı olarak (katkılı/katkısız) 45'den 300 Ncm²'ye değişir (Taşdemir, 2007).

Poliamit 6'nın düşük nemde ve sıcaklıkta elektriksel yalıtkanlık özelliği vardır. Spesifik direnci 10¹¹-10¹⁵ (ohm)'dur. Yüzey direnci ise 10¹⁰-10¹³ değerindedir. Dielektrik sabiti 3,6-7-10⁶ Hz, dielektrik kayıp faktörü 0,025-0,3-10⁶ Hz, dielektrik direnci 16-150 KV/mm'dir (Kaştan, 2005).

Poliamit 6'nın çevre koşullarına dirençli olduğu bazı malzemeler şunlardır. Boyalara, yakıtlara, yağlayıcılara, temizleyici kimyasallara ve deterjanlara, soğutucu akışanlara, sıcak su ve buhara, hidrolik sıvılara, alifatik ve aromatik çözücülere yüksek sıcaklıktaki çözücülere, sulu çözeltilere ve tuzlara direnç gösterirler. Bu özelliğinden dolayı otomobillerin radyatör kapaklarında kullanılmaktadır. Aromatik esterler, alkol, ketonlar, hidrokarbon, yağlara ve bazlara dirençlidir. Ancak klorlanmış hidrokarbonlara direnci orta ve az seviyededir. Ayrıca UV ışınlarına her poliamit türü gibi poliamit 6'nın da dayanımı düşüktür. Uygun stabilize edici maddelerle UV ışınlarına dayanımı iyileştirilebilir (Kaştan, 2005).

Asitler ve oksidasyonlu maddelerin solüsyonu, formik asit, sülfürik asit, dimetil formamid ve m-kresolsolvent'tir ve bütün poliamit 6'lar için geçerlidir (Ateş, 2002; Erbay, 2006).

Birleştirme parçaları, aşınma plakaları, yataklar, dişliler, silindirler, yatak segmanları, sonsuz vida gibi parçaların imalatında PA6 polimeri kullanımı çok yaygındır. Bazı durumlarda paslanmaz çelik, bronz, çelik ve pirinç gibi malzemelerin yerine tercih edilebilir. Toz, kum vb. bulunan aşındırıcı ortamlarda, az ve orta seviyeli kayma hızlarında poliamit 6'nın çalışma ömrü, çelik, döküm ve bronzdan 2 ile 10 kat daha fazla olabilmektedir (Kaştan, 2005).

Poliamit 6 (PA6), beyaz eşya, havacılık, otomotiv, ulaştırma, elektrik/elektronik, ve ev aletleri olmak üzere mobilya, inşaat, güvenlik malzemeleri, spor ekipmanları, sağlık/medikal alanlarda en çok kullanılan çok düşük kristalinite derecesine sahip ve kolay işlenebilen polimer türüdür. PA6'ı diğer polimerlerden ayıran ve en önemli avantajları ise yüksek darbe dayanımı, asit ve bazlara karşı dayanıklı olması, termal dayanım ve mükemmel mekanik özelliklerinin yanı sıra enjeksiyonla kalıplanabilir olmasıdır.

PA6 polimeri (higroskopik) su toplama özelliği nedeniyle PA6'dan üretilen ürünlerin kullanımı sırasında darbe dayanımı ve titreşimi arttırarak parçaların üretimi esnasında boyutsal kararlılığa ulaşmasını zorlaştırır. PA6'nın düşük sıcaklıklarda darbe mukavemetinin zayıf olması, çentiğe duyarlı olması, yapışma güçlüğü gibi dezavantajları da vardır (Karadeniz, 2006; Öksüz, 2009; Ünal, 2010).

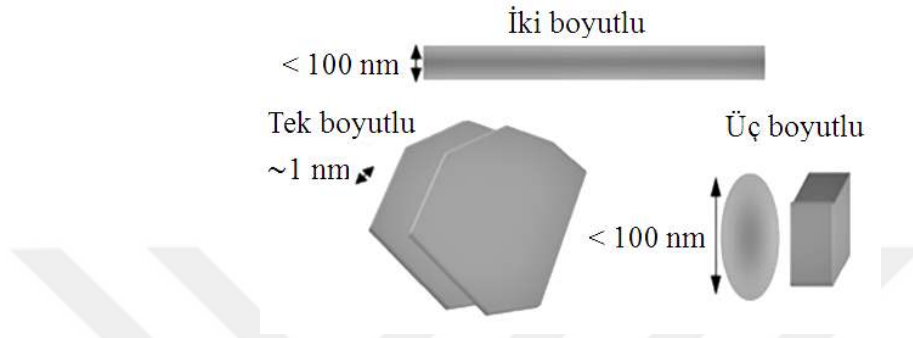
3.3. Nanokompozit Malzemeler

Kompozit malzemeyi elde etmek için kullanılan dolgu maddelerinin en az bir boyutunun nanometre (10⁻⁹) seviyesinde olmasıyla elde edilen ve kompozit malzemelerin yeni bir sınıfı olarak bilinen malzeme grubudur. Bu tür malzemeler makro özellikteki diğer malzemelerden farklı olarak atomik, moleküler ve makromoleküler ölçekte incelenmektedirler. Günümüzde hem sanayide hem de bilimsel çevrede nanokompozit malzemelerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesiyle ilgili yapılan çalışmalar büyük ilgi çekmektedir. Şekil 3.2'de nano boyuta sahip dolgu maddelerinin şematik gösterimi verilmiştir. Nano ebatta kaç boyutu olduklarına bakılarak nanokompozit malzemeler boyutlarına göre sınıflandırılabilir.

Eş boyutlu (isodimensional) nanopartiküllerde nanokompozit üç boyutta da nanometrik seviyededir. Sol-gel metodu veya in-situ ile elde edilen kübik silis nanopartikülleri örnek olarak verilebilir (Bağcı, 2005; Arı, 2009).

Eğer nanokompozit iki boyutta nanometrik ve diğer boyuttan daha büyük boyuttaysa kil kristalleri veya nanotüpler olarak adlandırılır. Bu tip nanokompozitlere örnek olarak karbon nanotüpler ve selülozik fırçalar (whiskers) verilebilir. Bunlar malzemelerin güçlendirilmesinde nano dolgu malzemesi olarak kullanılır (Bağcı, 2005; Arı, 2009).

Üçüncü çeşit nanokompozit ise sadece tek boyutta nanometrik seviyededir. Bu tür nanokompozitlerde dolgu malzemesi bir defter yaprağı gibi tek bir boyutta nanometrik seviyededir, diğer boyutlarda ise yüzlerce ya da binlerce nanometre boyutundadır (Bağcı, 2005; Arı, 2009).



Şekil 3.2. Nano boyuta sahip dolgu maddelerinin şematik gösterimi (Ajayan, 1999).

Nanometrik boyuta sahip partiküllerin dağılımı ile elde edilen nanokompozit malzemelerin termal, mekanik, optik ve fizikokimyasal özellikleri katkısız polimerlere ve geleneksel kompozitlere göre daha üstündür. Nanokompozitlerin malzemeye getirdiği üstünlükler genel olarak; malzemeye gaz sızmasını engellemesi, modülü ve ısı direncini artırması, malzemenin yanıcı özelliğinin azaltılması olarak sıralanabilir. Kullanım alanı olarak incelendiğinde daha çok bina yapımı, otomotiv endüstrisi, havacılık ve uzay sanayi, ambalajlama gibi alanlarda nanokompozit malzemeler sıkça tercih edilmektedir (Bağcı, 2005; Celep, 2007).

3.3.1. Polimer matrisli nanokompozitler

Polimerlerin farklı türde doğal ya da sentetik dolgu maddeleri ile karıştırılması işlemi, ekonomikliği ve kolaylığı nedeniyle kompozit malzemeler olarak tanımlanan yeni malzemelerin üretiminde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Elde edilen “polimer kompozit malzemelerin, uzun yıllardır hem endüstriyel amaçlı kullanımları bilinmekte hem de bilimsel olarak üretim süreçleri ve yapısal özelliklerinin incelenmesi süregelmektedir. Kompozit malzemelerin yeni bir sınıfı olan “nanokompozitler” en az biri nanometre (10⁻⁹ m) seviyesinde boyutlara sahip, farklı yapıdaki iki veya daha fazla fazın bileşimi olarak tanımlanmaktadır. Nanokompozitler plastik, seramik, metal gibi genel malzeme grupları için, moleküler seviyede yapısı düzenlenmiş kompozit malzemelerin isimlendirilmesinde kullanılmaktadır (Ishida, 2000).

Kompozit malzemelerde polimer esaslı matrislerin yanı sıra metal, seramik türevi malzemeler de matris olarak kullanılmaktadır. Diğer matrislerin kullanılmasına rağmen kompozit malzemelerin %90'ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir (Bağcı, 2005).

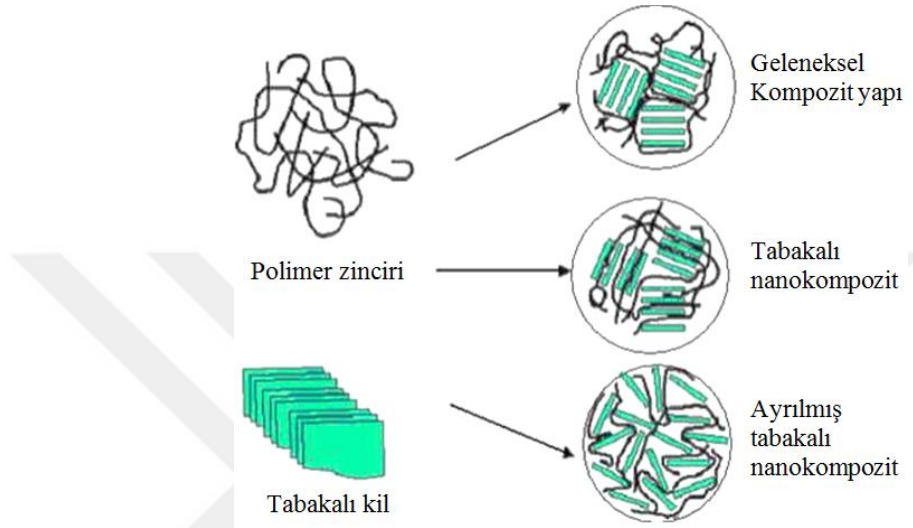
“Polimer matrisli nanokompozit” olarak tanımlanan malzeme grubu ise; “polimer içerisinde dağıtılmış nano boyutlu organik ya da inorganik, doğal/sentetik ikinci bir faz veya katkı/dolgu (elyaf, tanecik, tabaka vs.) maddesi gibi yapılar içeren plastik kompozitleri tanımlamaktadır. Ayrıca “nano dolgulu polimer kompozitler”, “nanokompozitler” ve “anorganik-organik hibrit malzemeler” olarak da adlandırılmaktadır (Baron, 1999).

1987 yılında nanokompozitlerle ilgili yapılan ilk çalışmalar Toyota Araştırma Laboratuvarlarında (Toyota Central Research and Development Laboratories, JAPAN) başlamış ve geliştirilmiştir. Poliamit 6/doğal kil (montmorillonit) nanokompozitinin, poliamit (PA) ve konvansiyonel dolgularla hazırlanan PA kompozitlere göre birçok fiziksel üstünlükleri olduğu belirlenmiştir. 1989 yılında bu çalışmanın sonuçlarının yayınlanmasından sonra tüm dünyada polimer nanokompozit çalışmaları hızla yaygınlaşmış ve farklı yapıdaki polimerlerin ve dolgu maddelerinin nanokompozit yapısı ve özelliklerine etkilerinin araştırılması yönünde büyük bir hız kazanmıştır (Baron, 1999).

Nanokompozitlerin sahip oldukları üstün fiziksel özelliklerinin yanı sıra endüstriyel/ticari polimerleşme yöntemleri ile kolaylıkla şekillendirilebilir olmaları ve genellikle yüksek yoğunluklu olan inorganik kompozit dolgu maddelerinden az miktarlarda kullanılması sebebiyle konvansiyonel kompozitlere göre çok daha hafif malzemeler üretilmiştir. Nanokompozitlerin bu avantajlı özellikleri sayesinde otomotiv sektöründe, hafiflik özelliği etkin kazanımlar için büyük potansiyel oluşturmaktadır (Baron, 1999).

Polimerler tanecikler ve fiberler ile takviye edilmektedir. Fiber takviyeli polimerik kompozit yapılarda, polimer matrisler çeşitli şekillere sahip fiberler ile takviye edilebilmektedir. Ancak günümüzde polimer matrisler nano boyutlara sahip tanecikler ile de takviye edilmeye başlanmıştır. Elde edilen kompozit malzemeler “polimerik nanokompozitler” olarak adlandırılmıştır. Dolgu parçacıklarının nanometrik boyutlarından dolayı nanokompozitler yüksek alan/hacim oranlarına sahiptir ve çok düşük kil yoğunluklarında bile fazlar arası etkileşim alanı çok geniş olduğundan fiziksel ve mekanik özelliklerinde çok önemli artışlar görülebilmektedir (Yılmazbayhan, 2006).

Termoplastik ve termoset polimerlerin nanokompozitlerinin geliştirilmesi için yapılan araştırmalar hızla devam etmektedir. Özellikle apolar yapılı polimerlerin poliolefin nanokompozitlerinin hazırlanması zordur (Durmuş, 2006). Şekil 3.3'te kil taneciklerle takviye edilmiş polimerik kompozit yapının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.3. Kil taneciklerle takviye edilmiş polimerik kompozit yapı (Enteknomaterials, 2018).

3.3.2. Polimer matrisli nanokompozitlerin üretim yöntemleri

Yerinde (in-situ) polimerizasyon yöntemi

Yerinde polimerizasyon yönteminde esas olan, polimer zincirinin büyümesi ile yerinde olarak nanopartiküllerin dağılmasıdır. İlk olarak nanopartiküller, monomer veya monomer çözeltisi ile karıştırılır ve ardından polimerizasyon ısı, radyasyon veya başlatıcı etkisi ile gerçekleştirilir. Böylece genişleyen polimer zincirleri arasında nanopartiküllerin dağılması sağlanır. Yerinde polimerizasyon, tabaka yapılı nanopartiküllerin kullanıldığı nanokompozit yapılarda, polimerizasyonun tabakalar arasında gerçekleşmesi sonucu tabakalar arası mesafelerin artması ve tabakaların oluşan polimer matris içerisinde dağıtılmasını mümkün kılmaktadır. Özetle yerinde polimerizasyon, içerisinde nanopartiküllerin moleküler ölçekte dağıldığı polimer nanokompozitlerin hazırlanmasında kullanılır (Arı, 2009).

Çözeltide harmanlama yöntemi

İlk olarak polimer uygun bir çözücü veya çözücü karışımında çözülür ve sonra nanopartiküller polimer çözeltisine eklenerek karıştırılır ve çözücünün uzaklaştırılması ile ürün elde edilir. Bu yöntemin kullanılmasının amacı; çözücü ve nanopartikül arasındaki etkileşim

sonucu nanopartiküller arasındaki van der waals kuvvetlerinin azalması ve bu durumun polimer zincirlerinin nanopartiküller arasındaki difüzyonunu kolaylaştırmasıdır. Bu yöntemin en büyük dezavantajları daha fazla miktarda çözücü ihtiyacı ve dolayısıyla saflaştırma maliyetlerinde artış olmasıdır. Bu yüzden ticari olarak çok fazla tercih edilmez. Nanopartikül dağılımı ve nanokompozitin özelliklerini etkileyen bazı parametreler vardır. Bunlar; karıştırma koşulları, polimer çözeltisinin derişimi, çözelti viskozitesi, polimer çözücü/nanopartikül etkileşimleridir (Arı, 2009).

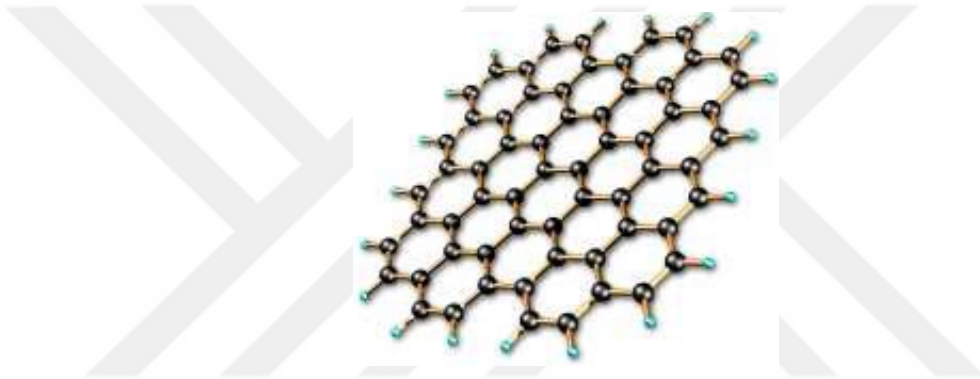
Eriyikte harmanlama yöntemi

Eriyikte harmanlama yöntemi, kompozit ve nanokompozitlerin hazırlamada en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Polimer ile nanopartiküllerin doğrudan karıştırılarak ısıtılması veya nanopartiküllerin polimer eriyiğe katılması esasına dayanır. Yukarıda verilen diğer üretim yöntemlerine göre bazı avantajları vardır. Bunlardan birincisi; çözücüye ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu durum hem maliyet açısından hem de çevre açısından daha temiz bir yöntemdir. İkinci avantajı ise; polimer şekillendirmede kullanılan ticari prosesler olan ekstruder ve enjeksiyon kalıplama işlemleriyle şekillendirilebilir olmasıdır. Çift vidalı ekstruderler polimer ve nanopartikül harmanlamada kullanılan en yaygın prostestir. Nanopartikülün dağılımını etkileyen parametrelerden bazıları vida tasarımı ve ekstruderde kalma süresidir. Genellikle, ekstruderde kalma süresinin artması ve geri karışımın sağlanması ile dağılım iyileşmektedir. Ancak ekstruderlerde kalma süresinin azaltılması durumunda nanopartiküllerin dağılımının istenilen düzeyde sağlanamaması bir dezavantajdır. Yüksek molekül ağırlıklı polimerler ve nanopartikül derişiminin yüksek olduğu nanokompozitler için dağılım iyi olmadığından uygun bir yöntem değildir (Arı, 2009).

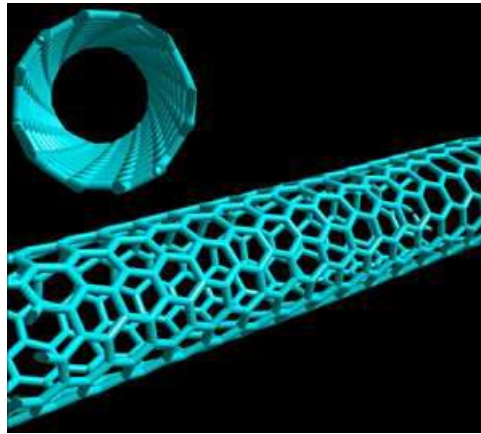
3.4. Karbon Nanotüpler (KNT)

1991 yılında Lijima tarafından bilim dünyası ile tanıştırılan nano boyuttaki partiküller karbon nanotüplerdir. Kısaca, karbon atomlarının oluşturduğu bal peteği şeklindeki levhanın silindirik şekilde sarılması ile meydana gelmektedir. Birbirleri ile sp^2 şeklinde bağlanan atomlar düzgün karbon nanotüp yapılarıdır ve atomlar sadece altıgen geometri oluşturur. Karbon nanotüpler birkaç mikron veya milimetre uzunluğundadır. Karbon elementi; grafit, fulleren ve elmas gibi kristalin, siyah karbon gibi amorf formlarıyla teknolojik materyaller arasında önemli bir yere sahiptir. Grafit yapısına benzeyen karbon nanotüpler, her ne kadar kimyasal bileşimleri ile grafit benzese de, izotropik olmaları ve nanotüpleri diğer karbon yapılardan ayırt eden onlara benzersiz özellikleri veren ağ yapıları mevcuttur (Celep, 2007).

Tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT) tek bir grafit levhanın sarılmasından oluşan tüplerdir. Çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT) ise nanotüplerin eş eksenli olarak iç içe yapılanması sonucu oluşan çoklu karbon silindirlere denir. Büyük yarıçaplara sahip çok duvarlı karbon nanotüpler, tek duvarlı karbon nanotüplere oranla daha az eğilip bükülebilir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin en büyük avantajı, üretimlerinin tek duvarlı karbon nanotüplere göre ekonomik olmasıdır (Örs, 2009). Tek sıra karbon atomundan oluşturulan bir grafin katmanının (Şekil 3.4) silindir şeklinde bükülerek, uçlarının birleştirilmesi ile oluşturulan yapılardır (Şekil 3.5). Silindir şeklinde bir karbon allotropudur. İsminden de anlaşılacağı gibi sadece karbon atomu içerir (Örs, 2009).



Şekil 3.4. Grafin tabakası (Örs, 2009).



Şekil 3.5. Karbon nanotüp (Örs, 2009).

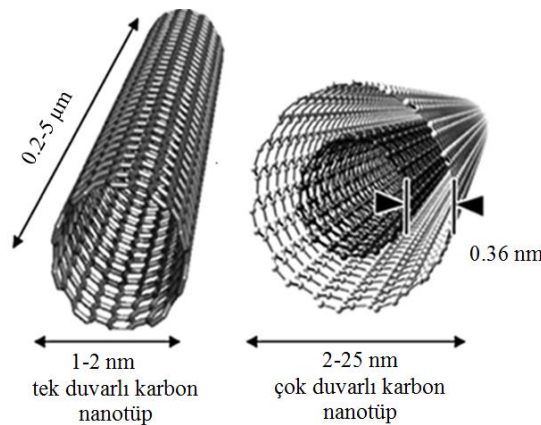
Yeni, oldukça yüksek dayanımlı nanokompozitler için kümelenme olmadan KNT'nin polimer matris içinde düzgün dağılımı ve böylece güçlü KNT polimer matris etkileşimini göstermesi istenmektedir. KNT'nin dağılımına bağlı olarak KNT/polimer nanokompozitlerin üretimindeki zorluklar yüzünden, KNT'nin avantajları kompozitlerde tamamıyla

kullanılmamaktadır. KNT yüzeyinin kovalent bağlı ve kovalent bağısız modifiyesi KNT'nin ıslatabilirlik ve çözünürlüğün geliştirilmesi için kullanılır. Kovalent bağlı olmayan yaklaşım yüzey aktif madde modifiyesini, polimer sarma ve polimer absorpsiyonunu içermektedir ve burada kullanılan polimerler in-situ halka açılması polimerizasyonu veya emülsiyon polimerizasyonla üretilen polimerler şeklindedir. Kovalent bağlı olmayan yaklaşımın avantajı, KNT'nin bozuk olmayan mükemmel yapısı ve mekanik özelliklerinin değişmeden kalmasıdır. Bu yaklaşımın başlıca dezavantajı ise, KNT ile matris arasındaki kuvvetlerin oldukça zayıf olması ve bundan dolayı polimer matristen KNT dolgusuna yük transferinin verimli olamamasıdır (Chen, 2005).

Karbon nanotüp içeren iletken nanokompozitlerin, düşük dolgu maddesi miktarlarında, yüksek elektriksel iletkenlik ve gelişmiş mekanik özelliklere sahiptir. Ancak kimyasal olarak aktif olmayan bir yüzeye sahip olmaları, kompozit içerisindeki dağılımlarının ve ara yüzey etkileşimlerinin yetersiz olması karbon nanotüplerin en büyük dezavantajları olarak sıralanabilir. Bu durum, kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin azalmasına sebep olmaktadır. İncelenen literatür çalışmalarında da KNT katkısı ile mekanik özelliklerin azaldığı görülmüştür. Sıkıştırma altında güçlü olmayan karbon nanotüpler, içi boş yapılar oldukları için, yüksek en-boy oranı, basınç, burulma, bükülme ya da stres altında yerleştirildiği zaman çökertme geçmesi eğilimindedir (Jensen vd., 2007).

3.4.1. Karbon nanotüp çeşitleri

Karbon nanotüpler, grafin tabakasının silindir şeklinde yuvarlanması ile tek duvarlı (TDKNT) ve iç içe geçmiş silindirler şeklinde çok duvarlı (ÇDKNT) olmak üzere iki tipe sahiptirler. Şekil 3.6'da tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin şematik hali gösterilmektedir.



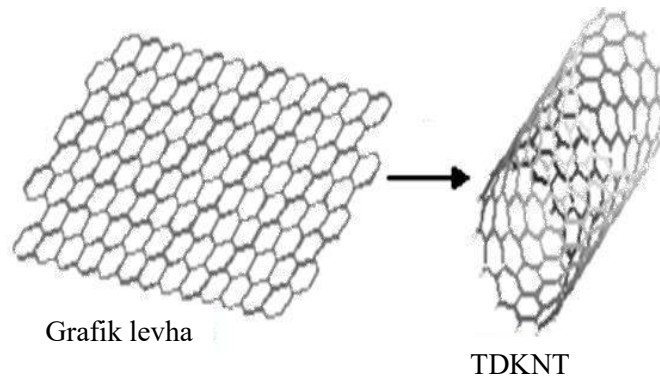
Şekil 3.6. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler (Chen, 2005).

Tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT)

Her iki ucu kapatılmış grafit tüpleri şeklindeki yapılara tek duvarlı karbon nanotüp denir. 1-2 nm aralığında değişir (Ajayan vd., 1999). Gauss dağılımı gösteren çap değerlerine sahiptir (Dresselhaus vd., 2004). Fakat, zeolit gözenekleri içerisinde sentezlenmeleri ile 0,4 nm kadar küçük çaplı tek duvarlı karbon nanotüpler de üretilebilmiştir (Terrones, 2003). TDKNT'ler çoğu kez altıgen paketlenmiş kristalli demetler halinde bulunur (Dresselhaus vd., 2004), demetler birbirlerine van der waals kuvvetleri ile tutunurlar ve altıgen paketlenmiş kristalli demetlerde 100-500 TDKNT içerebilir. Çizelge 3.3'te tek duvarlı karbon nanotüp özellikleri ve Şekil 3.7'de ise grafit levhanın silindirik şekilde sarılması sonucu TDKNT eldesinin şematik gösterimi verilmiştir (Akbulut, 2014).

Çizelge 3.3. Tek duvarlı karbon nanotüp özellikleri (Akbulut, 2014).

TDKNT Dış Çapı	1-2 nm
TDKNT İç Çapı	0,8-1,6 nm
TDKNT Ash	<1,5 wt%
TDKNT saflığı	>90 wt%
Ek TDKNT içeriği	>5 wt%
Amorf Karbon İçeriği	>3 wt%
TDKNT uzunluğu	5-30 μm
TDKNT Spesifik yüzey alanı	407 m^2/g
TDKNT Elektriksel İletkenliği	>10-2 S/cm



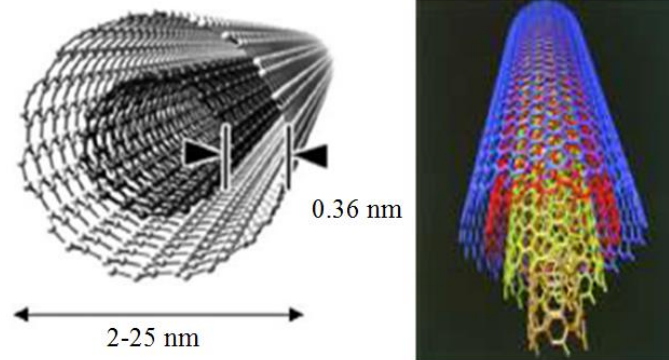
Şekil 3.7. Grafit levhanın silindirik şekilde sarılması sonucu TDKNT eldesi (Akbulut, 2014).

Çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT)

Farklı çaplardaki tek duvarlı karbon nanotüplerin iç içe geçmiş haline çok duvarlı karbon nanotüp adı verilir. Kısacası ÇDKNT, ikiden fazla grafen çepere sahip nanotüplerdir. Tek duvarlı karbon nanotüplerden farklı bazı özellikler gösterirler. ÇDKNT'lerin iç çapları 0,4-5 nm, dış çapları ise yaklaşık 15 nm mertebesinde (Dresselhaus vd., 2004). ÇDKNT'lerde duvarlar arası mesafenin 0,339 nm olacağı kuramsal hesaplamalarla tespit edilmiştir (Kim vd., 2009). ÇDKNT'lerde komşu duvarlar arası etkileşimlerin az olduğuna ve dolayısı ile duvarların birbirlerinden bağımsız dönme ve öteleme hareketleri yapabileceğine işaret etmektedir (Kuchibhatla vd., 2007). Çizelge 3.4'te çok duvarlı karbon nanotüplerin genel özellikleri ve Şekil 3.8'de çok duvarlı karbon nanotüp modelleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çok duvarlı karbon nanotüpün genel özellikleri.

ÇDKNT Dış Çapı	10-20 Nm
ÇDKNT İç Çapı	5-10 Nm
ÇDKNNT Ash	Kütlece <%1,5
ÇDKNT saflığı %	>%95 (karbon nanotüp) >%97 (karbon içeriği)
ÇDKNT uzunluğu	10-30µm
ÇDKNT Spesifik yüzey alanı	>200 m ² /g
ÇDKNT Elektriksel İletkenliği	>10 ⁻² S/cm
Renk	Siyah
Özkütle (True)	~2,1g/cm ³
Özkütle (Tap)	0,22 g/cm ³



Şekil 3.8. Çok duvarlı karbon nanotüp modelleri (Akbulut, 2014).

Birden çok grafen levhanın eş merkezli olacak şekilde iç içe geçmesiyle oluşan yapılara çok duvarlı karbon nanotüp denir. Tek duvarlı karbon nanotüpler için söylenen bir çok özellik çok duvarlı karbon nanotüpler için de geçerlidir (Ren vd., 2011). Çok duvarlı karbon nanotüplerin çekme dayanımları tek duvarlılardan daha düşüktür. Bunun temel sebebi, her bir nanotüp katmanının, karbon nanotüplerin sürtünmesine yakın kinetik özelliklere sahip olmasından dolayı birbiri üzerinden kayarak sıyrılma (pull-out) olarak bilinen özelliğin görülmesidir (Seunghun vd., 2007).

3.5. Karbon Nanotüplerin Yapısal Özellikleri ve Kimyasal Davranışları

Karbon nanotüplerin sahip olduğu özellikler ve kimyasal davranışları incelenirken tek duvarlı veya çok duvarlı ayrımı gözetmeksizin bir değerlendirme yapılacaktır. Çünkü sergilenen davranışları kesin bir çizgiyle birbirinden ayırmak son derece güçtür. Literatür incelendiğinde de tek duvarlı karbon nanotüp özelliklerinin çok duvarlı karbon nanotüpler için de geçerli olduğu vurgusu dikkat çekmektedir (Valcarcel vd., 2007). Karbon nanotüplere ait en belirgin özellikler şöyle özetlenebilir;

Yapıları itibariyle karbon nanotüpler apolar bağlara ve yüksek en/boy oranına (uzunluk/çap) sahiptir. Bu nedenle suda çözünmezler. Karbon nanotüplerin suda çözünemiyor olması saflaştırma ve karakterize etme işlemlerini de zora soktuğu için bu yapıların surfaktan gibi kimyasal düzenleyiciler (modifier) eklenerek disperse olması mümkün hale gelmektedir. Diğer organik moleküller gibi karbon nanotüpler de kovalent bağlanmalarla modifiye hale getirilebilir. Genel olarak karbon nanotüpler herhangi bir işlem uygulamadan reaktiflik göstermezler. Ancak özellikle kuvvetli kimyasal etkileşimlerle yapıya hidroksil ve karboksil grupları bağlanarak fonksiyonel hale getirilebilir. Sahip oldukları büyük yüzey alanı/hacim oranları ve güçlü van der waals etkileşimleri nedeniyle karbon nanotüpler, gaz filtrasyonu, sensör, enerji depolama ve katı faz ek traksiyonda kullanılabilecek güçlü malzeme adayları haline gelmektedir. KNT'ler inert atmosferde 1200 °C ye kadar yüksek termal kararlılık gösterirler. Bu özellikleriyle gaz kromatografisinde durgun faz olarak kullanılabilmektedir (Çalhan, 2015).

Yüksek adsorplama özelliği ve sahip olduğu geniş yüzey alanları ile karbon nanotüplerin, geleneksel olarak kullanılan katı faz adsorban materyallerine yeni ve güçlü bir alternatif olacağı aşîkârdır. Bunun en önemli nedeni karbon nanotüplerin çeşitli şekillerde modifiye edilerek absorplayacağı türe özgü yüzey fonksiyonel gruplarının tasarlanabilmesidir (Niyogi vd., 2002).

3.5.1. Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri

Grafitin tek katmanındaki karbon atomlarının her biri üç komşu atoma güçlü kimyasal bağlanmasıyla düzlemsel bal peteği kafes yapısını oluşturmaktadırlar. Grafitin bu güçlü bağlanmalardan dolayı esneklik katsayısı en büyüktür. Karbon nanotüplerin en dayanıklı fiber olması beklenen ÇDKNT'leri, çeliklere kıyasla daha sağlamdır ve fiziksel kuvvet uygulandığında hasarlara karşı çok dirençlidir. Yapılan deneysel çalışmalara göre karbon nanotüpün young modülünün en az grafitinki kadar yüksek olması, daha küçük çaplı ÇDKNT'lerin young modülünün daha yüksek olduğunu göstermiştir (Hancer, 2010).

Geleneksel mikron boyutlu grafitik fiberlere göre küçük çaplı karbon nanotüpler, önemli mekanik özelliklere sahiptir. Küçük çaplı karbon nanotüplerin en belirgin özellikleri, yüksek dayanıklılık, yüksek sertlik ve yüksek esnekliktir. Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalar, nanotüp üretiminin kolay anlaşılabilmesi ve nanometre boyutundaki malzemelerin kolay işlenememesi nedeniyle deneysel çalışmalardan çok daha ileridedir (Hancer, 2010).

Nanotüpler şekil değişiklikleri yapılabilir. Bükülebilir ve halka haline getirilebilir. KNT'ler bükülmesi ile elastiklik modül artar. Çelikten 1000 kat daha tok malzeme ortaya çıkar ve elmas kadar yüksek elastiklik modülüne sahiptir. En yüksek elastiklik modülü 1,0-1,4 TPa arasındadır. Nanotüpler sıkıştırıldıkları zaman, tekrar eski haline dönerler. Ancak aşırı sıkıştırılmada bükülme kalıcı olur. Karbon atomları arasındaki sp^2 bağı ile gerilme direnci açısından en sert malzemelerdendir. Esneyebilme özelliği çok yüksek olan nanotüplerin aşırı çekilmesi ile plastik bozulma görülmektedir (Hancer, 2010).

Elmas kadar yüksek mukavemetlidir. En yüksek çekme mukavemeti 30 GPa'ya yakındır. Çekme mukavemeti çeliklere kıyasla 100 kat daha yüksektir. 3000 °C'ye kadar kararlı yapıdadır. Yoğunluğu çeliğin 1/6'sı kadardır (Hancer, 2010).

3.5.2. Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri

Yarı metal olan grafitler, sahip olduğu elektriksel özellikleri nedeniyle yarıiletkenlerle metaller arasında yer alır. Çok iyi iletken olan metalik nanotüpler, harici manyetik alanlar vasıtası ile karbon nanotüplerin elektronik özellikleri denetlenebilmektedir (Kiselev vd., 2001).

Karbon nanotüplerin, elektriksel özelliklerinin doğruluğunu test etmek için yapılan deneyler zor şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Çünkü karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri çaplarına bağlıdır. Optik ve elektronik nano ölçeklerle ölçümler yapmanın

zorluklarının yanında, nanotüpün simetrisiyle ilgili bilgilerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Nanotüplerin bulundukları ortamdaki yönelimlerini belirlemeyi amaçlayan deneysel çalışmaların öncülüğünde, nanotüplerin elektriksel özellikleri hakkında temel teorik tahminler doğrulanmaktadır (Kiselev vd., 2001).

3.5.3. Karbon nanotüplerin ısısal özellikleri

Mekanik ve elektronik özellikleriyle büyük ilgi çeken karbon nanotüpler, ısısal özellikleriyle de dikkat çekmektedir. Kuantum etkileri, küçük boyutlara sahip oldukları için önemlidir ve düşük sıcaklık, ısısal iletkenlik ve özgül ısı fonon yapısının tek boyutlu kuvantumlamasının birer kanıtıdır. Bir karbon nanotüpte, fonon sayısını saptamak için düşük sıcaklık özgül ısı ve yığın içinde tüplerin komşuları arası etkileşimi hesaba katılır. Hem kuramsal hem de deneysel olarak incelenen karbon nanotüplerin ısısal özellikleri, kuramsal tahminlere göre, oda sıcaklığında ısısal iletkenlikleri elmas ve grafitten büyüktür. Ölçümler oda sıcaklığında ısısal iletkenliğin ÇDKNT'lerde 300 W/mK'in üstünde, TDKNT'lerde ise 200 W/mK'in üstünde olduğunu göstermiştir (Hone, 2004).

3.5.4. Karbon nanotüplerin uygulama alanları

Mekanik ve elektronik açıdan önemli avantaj sağlayan karbon nanotüpler, teorik olarak pek çok alanda kullanım imkanı sağlamaktadır. KNT'lerin en önemli kullanım alanı olarak KNT katkılı kompozit yapıların sentezi, hidrojen depolama üniteleri yapımı, tıp uygulamaları, elektronik devre parçaları imalatı gösterilmektedir. KNT kompozitlerinin en önemlisi KNT-polimer kompozitlerdir. Elektrik iletkenliği sağlayan malzemeler, KNT-polimer kompozitler ile yapılabilmektedir. Polimer matrise bağlı %5 KNT yükleme yapılması durumunda malzemenin elektrik iletkenliği 0,01; 0,1 S cm aralığında olmaktadır (Yağlıkcı, 2012).

Karbon nanotüpler, gözenekli yüzeylerinin sağladığı elektrokimyasal özelliklerden dolayı, elektrokimyasal cihaz yapımında tercih edilen malzemeler arasındadır. Bu alanda elektrot ve süper kapasitör yapımında KNT'ler sıkça tercih edilmektedir (Yağlıkcı, 2012).

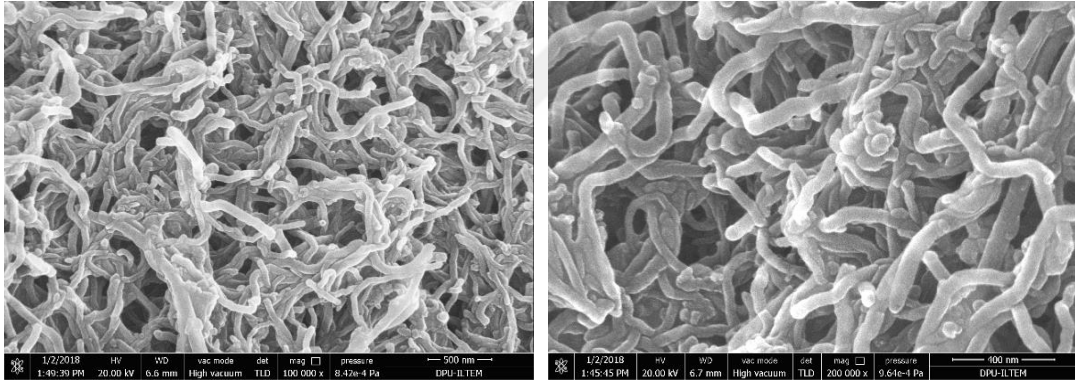
Hidrojen depolama sistemleri olarak ön plana çıkan KNT'ler, geniş yüzey alanlarına sahiptir. İnsan hücrelerinin boyutlarından daha küçük yapılar şeklinde elde edilebilen KNT'ler, tıp alanında hedefe ilaç taşıyıcı ajanlar ve enzimatik biyosensörler olarak kullanılabilir. Pek çok elektronik cihazın yapımında da kullanılmaktadır. Bu tür cihazlara örnek olarak mikrodalga jeneratörleri, düz ekranlar ve gaz boşalım tüpleri verilebilir (Yağlıkcı, 2012).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda NYLEM® 6 koduyla, EMAŞ A.Ş. (Bursa/Türkiye) firmasından temin edilen ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplamaya uygun poliamit 6 (PA6) polimeri kullanılmıştır. Firma verilerine göre kullanılan poliamit 6'nın yoğunluğu ISO 1183 metoduna göre 1,12; 1,16 g/cm³'tür. Viskozitesi (%96 H₂SO₄) ISO 307 metoduna göre 2,40; 2,80'dır. Ergime sıcaklığı ISO 3146 metoduna göre 220 °C ve nem absorpsiyonu (23 °C, %50 RH) ISO 62 metoduna göre %2,50; 3,50'dir.

Çalışmada Detsan A.Ş. (Türkiye) firmasından temin edilen çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) kullanılmıştır. ÇDKNT, %97'den daha yüksek oranda saflığa sahiptir. Seçilen ÇDKNT'lerin ortalama dış çapı 10-20 nm, uzunluğu 10-30 µm ve yüzey alanı >200 m²/g'dır. Şekil 4.1'de ÇDKNT katkının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.1. ÇDKNT katkının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü.

Deneysel çalışmalarda katkısız PA6 polimeri ile ağırlıkça %0,1; 0,2 ve 0,3 oranında ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitleri üretilmiştir. Çizelge 4.1'de deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin isimleri ve kısaltmaları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin isimleri ve kısaltmaları.

Malzeme	Kısaltma
Poliamit 6	PA6
Poliamit 6-%0,1 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp	PA6-%0,1 ÇDKNT
Poliamit 6-%0,2 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp	PA6-%0,2 ÇDKNT
Poliamit 6-%0,3 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp	PA6-%0,3 ÇDKNT

4.2. Ekstrüzyon (Kampaund) Prosesi

Ekstrüzyon prosesi öncesinde nemi almak için PA6 polimeri ve ÇDKNT katkısı 100 °C’de ve 4 saat boyunca kurutulmuştur. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin üretimi Şekil 4.2’de resmi verilen 6 adet ısıtma bölgesi, 22 mm çapa sahip ve L/D oranı (vida boyunun dış çapa bölünmesi) 32 olan çift vidalı ekstruder kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretimlerde 220-230-235-240-245 °C sıcaklık dağılımı kullanılmıştır. Üretimler, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında yapılmıştır.



Şekil 4.2. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin ekstruder üretim süreci.

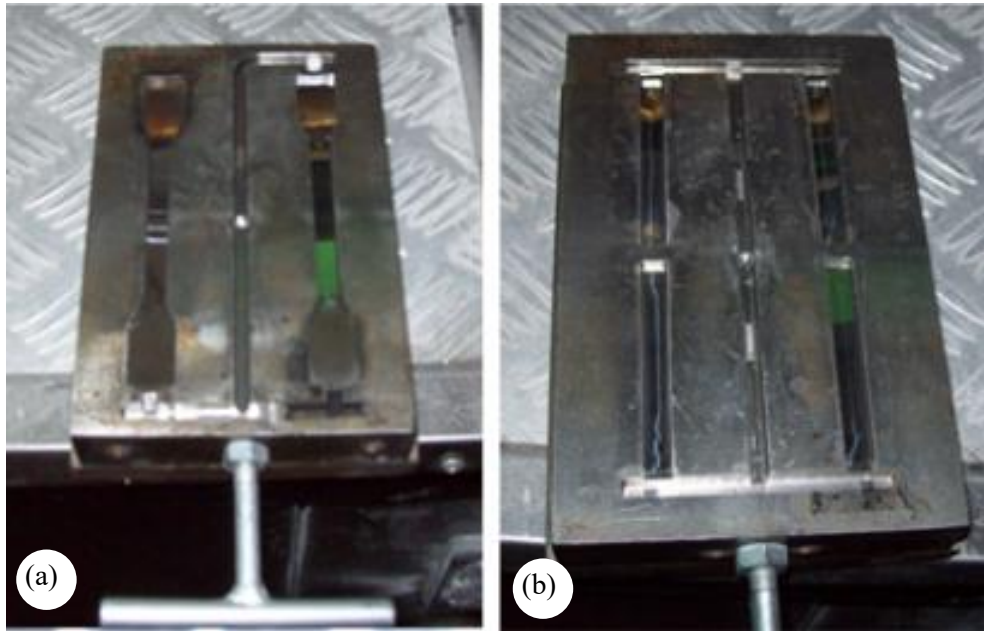
4.3. Enjeksiyon Prosesi ile Üretim

Kampaund üretim yöntemi ile granül haline getirilen PA6 ve nanokompozitleri granüller Şekil 4.3’te verilen Hastec Borché marka enjeksiyon kalıplama makinesi ile standartlara uygun olarak kalıplanmıştır. Kalıplama işlemi için kullanılan kalıpların resimleri Şekil 4.4’te ve kalıplama sonrası elde edilen numunelere ait resimler Şekil 4.5’de verilmiştir.

Üretimler Gama-Alfa Plastik (Gebze) firmasında gerçekleştirilmiştir. Üretim öncesinde, PA6 ve nanokompozitlerin nemi alınması için 100 °C ve 4 saat boyunca etüv fırınında bekletilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile üretimlerde Çizelge 4.2’de verilen Enjeksiyon kalıplama parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Hastec Borche marka enjeksiyon makinası.



Şekil 4.4. Enjeksiyon makinasında kullanılan: a) çekme numunesi kalıbı, b) darbe ve eğilme kalıpları.

4.4. Yoğunluk Testi

ISO 1183 (ASTM D 792) standardı kullanılarak arşimet prensibine göre, PA6 polimeri ve nanokompozitlerinin yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Yoğunluk deneyleri, Şekil 4.6'da gösterilen 0,0001 g hassasiyetli, 220 g kapasiteli SHIMADZU AUX-320 marka dijital bir terazi ile yapılmıştır. Ölçümler %99,7 saflığa ve 0,77 g/cm³ yoğunluğa sahip izopropil alkol (C₃H₈O) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ilk önce havadaki ağırlıkları ve sonrasında isopropil alkol içerisindeki ağırlıkları belirlenmiştir. Eşitlik 4.1'de verilen formül yardımıyla numunelerin yoğunlukları bulunmuştur.



Şekil 4.6. Yoğunluk test cihazı.

$$d = d_{\text{alkol}} \times [A/(A-B)], \text{ d: Yoğunluk, g/cm}^3 \quad (4.1)$$

dalkol: İzopropil alkolün yoğunluğu, g/cm³

A: Numunenin havadaki ağırlığı, gr

B: Numunenin sıvıdaki ağırlığı, gr

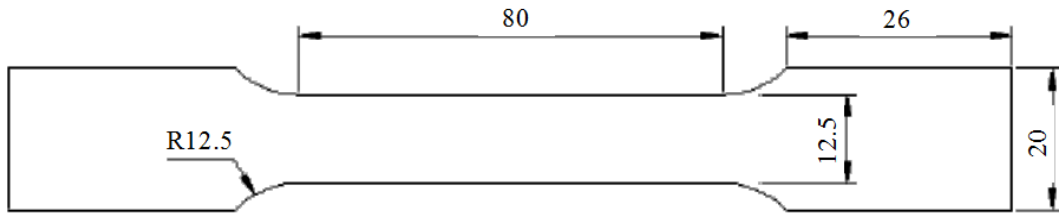
4.5. Çekme Deneyi

Çekme deneyleri, Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarında, Şekil 4.7'de verilen ZWICK/ROELL ICO711001 marka ve modeli çekme deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde TS ISO 527 (ASTM D 638) standardına uygun olarak hazırlanmış ve Şekil 4.8'de ölçüleri verilen numuneler kullanılmıştır.

Çekme testlerinde deneyler oda sıcaklığında (23±2 °C), çekme hızı 5 mm/dak. olarak sabitlenmiş ve yapılmıştır. Çekme deneylerinin sonucunda kopmadaki % uzama miktarı, çekme mukavemeti ve elastiklik modülü değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Çekme deney cihazı.



Şekil 4.8. Çekme deneyi numune ölçüleri (ölçüler mm).

Çekme mukavemetlerinin hesaplanmasında Eşitlik 4.2 kullanılmıştır.

$$\sigma_{\text{ç}} = F/A_0 \quad (4.2)$$

$\sigma_{\text{ç}}$: Çekme mukavemeti, MPa,

F: Yük, N,

A_0 : Numune kesit alanı, mm^2 ,

Elastiklik modülü, malzemenin elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç veya rijitlik anlamına gelmektedir. Elastiklik modülün hesaplanmasında ise Eşitlik 4.3 kullanılmıştır.

$$E = \tan \alpha = \sigma / \epsilon \quad (4.3)$$

Burada;

E: Elastiklik modülü, N/mm^2

σ : Gerilme, N/mm^2

ϵ : Birim şekil değiştirme oranı, olarak ifade edilmektedir.

Kopma uzaması değerinin hesaplanmasında ise Eşitlik 4.4 kullanılmıştır.

$$\% \text{ Uzama} = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (4.4)$$

$$\Delta l = l_s - l_0$$

Burada;

Δl : numunedeki uzama miktarı, $(l_s - l_0)$ mm,

l_0 : numunenin ilk ölçü boyu, mm,

l_s : numunenin son boyu, mm, olarak ifade edilmektedir.

4.6. Eğilme Deneyi

ZWICK/ROELL 1C0711002 marka ve modeldeki çekme ve eğilme cihazı ile standartlara uygun bir şekilde, Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.7. Darbe Deneyi

TS 1005 standardına uygun olarak katkısız PA6 polimeri ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitine izod çentikli darbe deneyleri uygulanmıştır. Darbe deneyi için ZWICK/ROELL HIT 5-5P marka dijital göstergeli bir cihazı kullanılmıştır. İzod çentikli darbe deneyleri, enjeksiyon kalıplama ile üretilen $4 \times 10 \times 80$ mm ebatlarındaki numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Darbe testlerinde $2,75 \text{ kJ/m}^2$ 'lik çekiç kullanılmıştır. En az 5'er adet numune ile darbe testi yapılmış ve sonuçların ortalamaları alınmıştır.

Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarında bulunan cihazlar ile standartlara uygun olarak izod darbe deneyi testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9'da izod darbe deneyi ve çentik açma cihazları verilmiştir.



Şekil 4.9. İzod darbe deneyi ve çentik açma cihazı.

4.8. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi (DSC)

DSC analizinde, biri referans biri de örnek numune için iki hazne bulunmaktadır. Boş DSC örnek kabı (pan) referans haznesine yerleştirilirken içinde polimer bulunan 2. kap örnek haznesine yerleştirilir. Ardından iki hazne de seçilen başlama sıcaklığına ulaşınca kadar ısıtılır ya da soğutulur. Daha sonra bir sıcaklık programı çalışmaya başlar ve haznelerin sıcaklığını belirlenen bir hızla istenilen seviyeye kadar artırır. Bu sırada iki hazne arasında oluşan sıcaklık farkını dengelemek için gerekli ısıtma ya da soğutma işlemi yapılır. İki örneğe de sağlanan enerji arasındaki farkın birim zamana oranlanması ile örneğin ısı kapasitesi elde edilmiş olur. DSC analizleri için örnekler 30 °C'den 350 °C'ye kadar 10 °C/dak hız ile ısıtılmıştır. Katkısız PA6 polimerinin % kristallenme oranı (X_c), Eşitlik 4.5'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır (Ehrenstein vd., 2001). %100 kristalin PA6 polimeri için ergiyik entalpisi 240 j/g dır (Esmizadeh vd., 2017).

$$X_c (\%) = (\Delta H_m / \Delta H_m^0) \times 100 \quad (4.5)$$

ΔH_m = ergiyik entalpisi,

ΔH_m^0 = %100 kristalin PA6 polimeri için ergiyik entalpisi 240 j/g dır.

Eşitlik 4.5'de numunenin toplam ağırlığına bağlı olarak kristalin olmayan bölümleri içeren polimerin genel kristalliliğini vermektedir. Doğal olarak, bu sonuç PA6 fazının kristalliliğini yansıtmamaktadır. Bu yüzden, ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin % kristallenme oranlarını (X_c) bulmak için Eşitlik 4.6'da verilen formül kullanılmıştır.

$$X_c (\%) = (\Delta H_m / \Delta H_m^0 \times W_{\text{polimer}}) \times 100 \quad (4.6)$$

W_{polimer} = polimer matrisin ağırlık oranıdır (Ehrenstein vd., 2001).

TS-EN-ISO-11357-1 (ASTM D 3417) standardına uygun olarak diferansiyel taramalı kalorimetre analiz (DSC) testleri yapılmıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetre analizleri (DSC), Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi laboratuvarında bulunan DSC test cihazında yapılmıştır.

4.9. Termal Gravimetrik Analizi (TGA)

Termal gravimetrik analizi (TGA), numunelerin ağırlık değişimi ve referans ile arasındaki sıcaklık farkının kontrollü bir sıcaklık programı kullanılarak belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Elde edilen sıcaklık-kütle eğrilerine, termogram veya termal bozunma eğrileri denilmektedir. 5-10 mg arasında tartılan deney numuneleri, platin krozeler içerisine yerleştirilmiş ve uygulanan sıcaklığa bağlı olarak kütle kayıpları incelenmiştir. Analizler

20 ml/dak. akış hızında azot gazı ortamında ve ısıtma hızı 10,0 °C/dak olacak şekilde 30-800 °C arasında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda polimerlerin bozunma sıcaklığı °C olarak ve bozunma sıcaklığındaki kütle kaybı yüzde (%) olarak verilmiştir. Polimerlerin kütle kayıpları, ASTM E 1131 standardına göre aşağıda verilen Eşitlik 4.7 ile hesaplanmıştır.

$$A = \frac{\Delta m}{W} \times 100 \quad (4.7)$$

Burada;

A: kütle miktarı, %

Δm : Belirlenen sıcaklıkta ölçülen kütle miktarı, mg

W: Orijinal numune miktarı, mg.

TGA analizleri, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi laboratuvarında bulunan TGA test cihazında yapılmıştır.

4.10. Dinamik Mekanik Analizi (DMA)

Malzemelerin viskoelastik özelliklerini belirlemede kullanılan en önemli yöntem Dinamik Mekanik Analizidir. Malzemeye salınımlı bir kuvvet uygulanması sonucunda, malzemenin bu kuvvete karşı verdiği cevabı analiz eder. Gerilim, malzemeye uygulanan kuvvet, gerinim ise malzemenin uğradığı deformasyon olarak tanımlanır. İdeal elastik malzemeye uygulanan gerilimle oluşan deformasyon arasındaki faz farkı sıfır iken ideal viskoz davranışta gerilim ile deformasyon arasındaki faz farkı 90 °C'dir. Gerçek sistemlerde ise faz açısı (tanjant delta) ve pik genliği incelenerek malzemenin viskozite, modül ve diğer özellikleri belirlenebilir (Gültekin, 2006).

Malzemede depolanan deformasyon enerjisinin ölçütü elastik karakterlerin gösterdiği depolama modülüdür ve E' ile gösterilir. Malzemenin ısı biçiminde kaybettiği deformasyon enerjisi ve viskoz karakterlerinin göstergesi ise E'' ile gösterilen kayıp modülüdür. Malzemede depolanan enerjinin malzeme tarafından dağıtılabılme özelliği ise kayıp modülünün depolama modülüne oranı olarak tanımlanan tanjant delta (tan delta)'dır (Mutlu, 2008).

Dinamik Mekanik Analiz (DMA) testleri, Perkin Elmer marka DMA 8000 model cihazı ile 1 Hz frekans 1 mm Strain değerinde 30 °C'dan 130 °C'ye 3 °C/dk'da yapılmıştır. DMA analizleri Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir.

4.11. X Ray Difraktometresi (XRD)

X Ray Difraktometresi (XRD) tekniği, gama ışınından daha zayıf enerjili, ultraviyole ışından daha kuvvetli ışın kullanılarak yapılan analiz tekniğine denir. XRD sistemi ile yapılan bu karakterizasyonda örnek türüne göre değişik uygulamalar görölmektedir. XRD tekniği çalışma prensibi olarak örneğe X-ışını göndererek kırılma ve dağılma verileri toplaması temel alınmaktadır. Killerin kristal yapısının ve kül bileşiminin belirlenmesinde XRD tekniği önemli bir yer tutmaktadır. Bu analiz sonucunda kilin amorf, kristalin ya da yarı kristalin formların hangisinde olduğu belirlenebilmektedir (Bansal, 2005).

XRD ışını kırınım (XRD) testleri 45 kV ve 40 mA'de çalışabilen Panalytical (Empyrean) model X ışını difraktometre cihazı ile $\lambda=1,5405 \text{ Å}$ dalga boyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ ışınları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarama hızı dakikada 2 °C olacak şekilde 10 °C ile 50 °C arasında yapılmıştır. XRD testleri, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi (İLTEM)'de yapılmıştır.

4.12. Taramalı Elektron Mikroskop Analizi (SEM)

Katkısız PA6 polimerine farklı oranlarda eklenen çok duvarlı karbon nanotüplerin yapı içerisindeki dağılımını incelemek için, çekme testi sonrası elde edilen kırık yüzeyler kullanılmıştır. Analizler; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi (İLTEM) laboratuvarlarında bulunan, Şekil 4.10'da resmi verilen FEI NOVANANOSEM 650 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10. Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı.

Numune yüzeyleri 40Å kalınlığında altın ile kaplanmıştır. 30 mA yük ve argon gazı altında, numunelere 36 sn süre ile kaplama işlemi yapılmıştır. Şekil 4.11’de resmi verilen ve Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Seramografi Laboratuvarında bulunan, Agar Sputter Coater Marka altın kaplama cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.11. Altın kaplama cihazı.

4.13. Aşınma Testleri

Aşınma-sürtünme deneyleri, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi bünyesinde bulunan ve Şekil 4.12’de resmi verilen pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aşınma deneyleri için, çekme testi numuneleri kullanılmıştır. Karşı disk olarak ise Ç1040 çeliği kullanılmıştır. Deneyler kuru kayma şartları altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin sürtünme katsayısı hesabı için bir elektrik motorunun tahriği ile dönen diskin üzerine deneylerde kullanılan disk malzemeler bir vida yardımıyla sabitlenmiştir. Kol üzerinde bulunan bir mekanizma ile çekme testi numunesi kola bağlanmıştır. Makine çalıştırıldığında, çekme testi numunesi diske sürtünmesiyle numunenin bağlı olduğu kol aparatı da diskin dönme yönüne hareket etmek istemektedir. Bu ileriye doğru olan hareket yanal kuvveti vermektedir. Bu yanal kuvvet ise bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Alınan veriler aynı zamanda direk bilgisayarda Excel programında depolanmıştır. Deneylerde dakikada 2000 m yanal yük verisi alınmış aynı zamanda deneylerde kullanılan yüke bölünerek Excel programında grafik haline getirilmiştir. Sürtünme katsayısı yanal kuvvetin, normal uygulanan kuvvete oranı olarak ifade edilir ve Eşitlik 4.8’de belirtilen formülle hesaplanmaktadır.



Şekil 4.12. Pim-disk aşınma cihazı.

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (4.8)$$

Yukarıdaki formülde;

μ : Sürtünme katsayısını,

F_s : Yanal sürtünme kuvveti (N),

F_n : ise Normal kuvveti (N) ifade eder (Ünal, 2018).

Deneylerde 10-20-30 ve 40 N olmak üzere 4 farklı yük ile 0,4; 0,8; 1,2 ve 1,6 m/sn olmak üzere 4 farklı kayma hızı kullanılmıştır. Kayma mesafesi olarak 2000 m belirlenmiştir. Her testten önce (m^1) ve sonra (m^2) numune ağırlıkları ölçülmüş ve ağırlık kaybı (Δ_m) tespit edilmiştir ve Eşitlik 4.9’da verilen formül ile spesifik aşınma oranları (K_0) hesaplanmıştır.

$$K_0 = \frac{\Delta_m}{L \times p \times F} \text{ (m}^2\text{/N)} \quad (4.9)$$

Burada;

Δ_m : Ağırlık kaybı (g)

L: Kayma mesafesi (m)

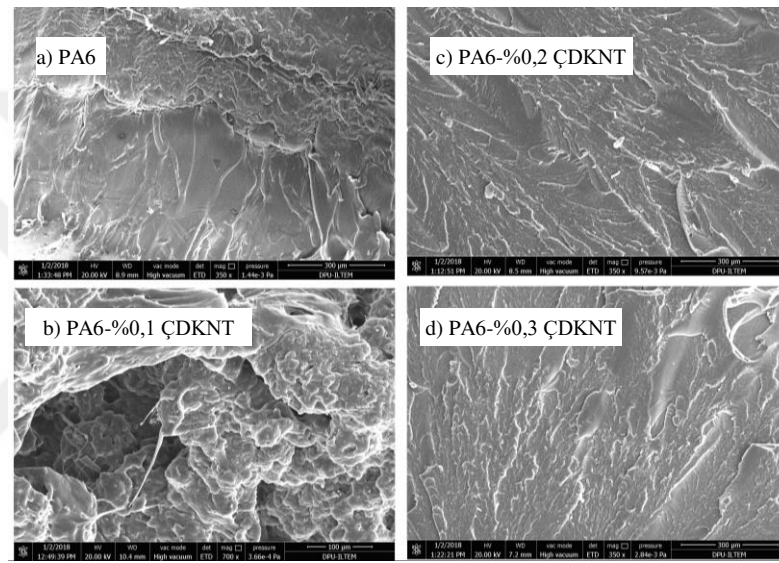
p: Malzemelerin yoğunluğu (g/cm^3)

F: Uygulanan yük (N) (Ünal, 2018).

5. DENEY SONUÇLARI

5.1. Mikro Yapı İncelemeleri

Farklı oranlarda ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin kırık yüzeylerinden alınmış SEM görüntüleri Şekil 5.1’de verilmiştir. PA6 ve ÇDKNT katkılı nanokompozitlerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde sünek olan PA6 polimerinin ÇDKNT eklenmesi ile gevrek davranış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Nanokompozitlerinin kırık yüzey SEM görüntüleri.

5.2. Yoğunluk Testi Sonuçları

PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlerinin yoğunluk testi sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir. PA6 polimerine eklenen farklı oranlardaki ÇDKNT katkısı yoğunluk testi sonuçlarını etkilememiştir. PA6 ve nanokompozitlerin yoğunluk değerleri 1,13; 1,14 g/cm³ civarında elde edilmiştir.

Çizelge 5.1. PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlerin yoğunluk testi sonuçları.

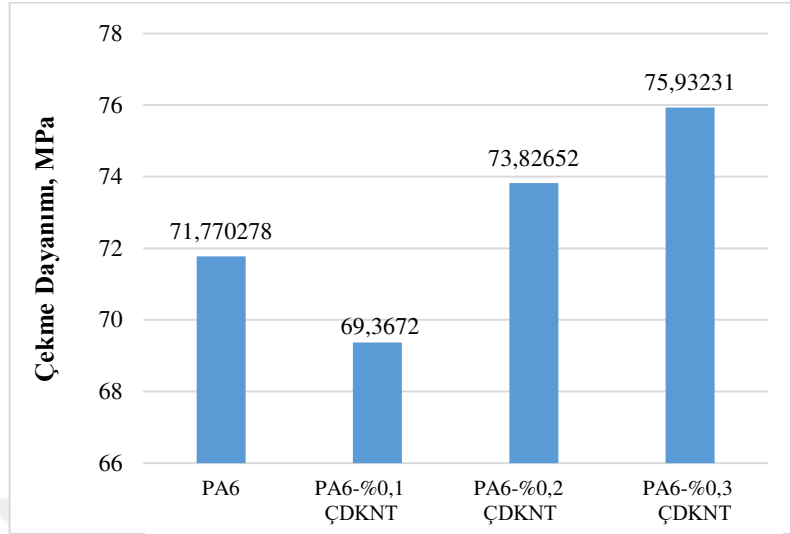
Malzeme	Yoğunluk(g/cm ³)
PA6	1,13
PA6-%0,1 ÇDKNT	1,14
PA6-%0,2 ÇDKNT	1,13
PA6-%0,3 ÇDKNT	1,13

5.3. Mekanik Deney Sonuçları

Şekil 5.2’de PA6 polimeri ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin çekme deneyi sonrasında elde edilen çekme dayanımı değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen %0,1 oranındaki ÇDKNT çekme dayanımını azaltmıştır. 71,7 MPa olan katkısız PA6 polimerinin çekme dayanımı, %3,46 oranında azalarak 69,3 MPa olarak elde edilmiştir. Mekanik özelliklerdeki düşük artış oranı, polimer içerisindeki KNT katkının homojen olmayan dağılımı nedeniyle KNT katkının takviye etkisi zayıf kalmasına bağlanabilir. KNT katkının yüksek yüzey enerjisi topaklanmaya sebep olmuş olabilir. Dolayısıyla bu topaklanmalar, polimer içerisinde homojen olmayan dağılım ve dolayısıyla gerilim yoğunlaşmasına yol açmaktadır (Zhu vd., 2006). Ayrıca polimer matris ile KNT katkı arasında herhangi bir kimyasal veya hidrojen bağının oluşmaması, mekanik özelliklerdeki artış oranını etkilemiş olabilir. Bilindiği gibi, modifiye edilmemiş KNT katkılar daha pürüzsüz/düz (smooth) bir yüzeye sahiptir ve yüzeylerinde fonksiyonel gruplarının (OH, COOH ve NH gibi) bulunmaması nedeniyle polimer matris ile daha zayıf bir etkileşime sahiptir (Zhu vd., 2006).

PA6 polimerine ilave edilen %0,2 ve %0,3 oranındaki ÇDKNT katkısı ise çekme dayanımını sırasıyla %2,86 ve %5,79 oranlarında artırmıştır. Benzer sonuçları (Mirik, 2010), YYPE polimerine farklı oranlarda (%0,1; 0,2; 0,3) KNT ilaveli nanokompozit numunelerin mekanik özelliklerini incelediği çalışmada elde etmiştir. Başka bir çalışmada (Aslan, 2011), %1’lik ÇDKNT ilaveli PLA nanokompozitlerinde, %13 oranında çekme dayanımının arttığı belirtmiştir. Loos ve arkadaşları (2008), epoksi matris içerisine %0,25 tek duvarlı karbon nanotüp katkısı ile çekme mukavemetinin artırdığı belirtmiştir. Bu artışın sebebini ise TDKNT katkının üstün mekanik özelliklerine sahip olmasına, TDKNT’lerin homojen dağılımı ve matris arasındaki etkileşimine bağlamıştır.

ÇDKNT katkılı nanokompozitlerin mekanik özellikleri KNT katkının dağılımından, yönelenmesinden ve en/boy oranından önemli oranda etkilenmektedir (Hassani vd., 2013). Literatürde çekme dayanımlarının sonuçlarına bakıldığında; ağırlıkça %0,2 ile %0,4 arası ÇDKNT katkının en iyi sonuçları verdiği belirtilmiştir (Mirik, 2010). Bu çalışmada da ağırlıkça %0,3’lük ÇDKNT katkının çekme dayanımında en yüksek ($\sigma_{max} = 75,93$ MPa) sonucuyla literatüre uygunluk göstermiştir.



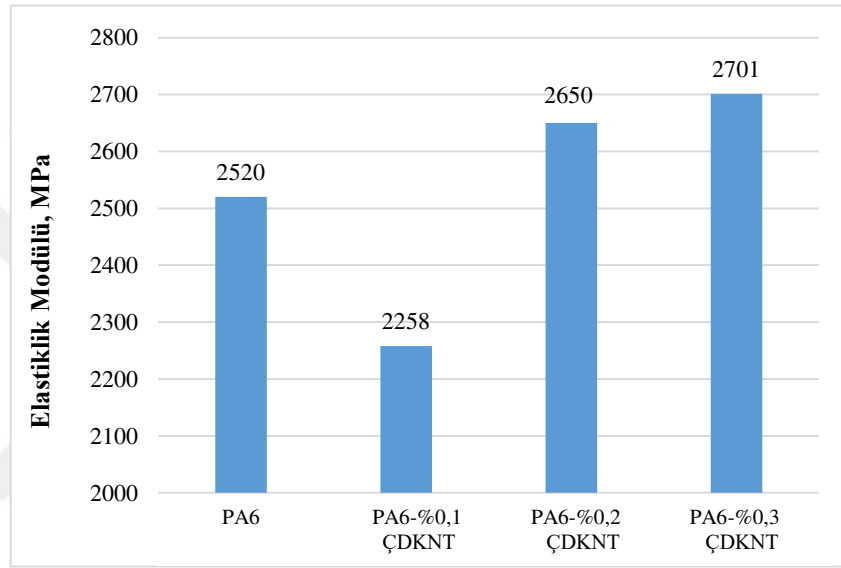
Şekil 5.2. PA6 ve PA6 nanokompozitlerinin çekme dayanımı (MPa) grafiği.

Şekil 5.3'te PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlerinin çekme testi sonucunda elde edilen elastiklik modülü değerleri görülmektedir. Çalışma sonucunda, PA6 polimerine ilave edilen %0,1 oranındaki ÇDKNT katkı elastiklik modülünü azaltmıştır. Öner ve arkadaşları (2017), çalışmasında benzer sonuçlar elde etmiştir. Karbon nanotüp içeren numunelerde, homojen bir karışım sağlanamaması ve topaklanma meydana gelmesi sonucunda elastiklik modülü azaltmıştır. Hu ve arkadaşları (2009), da benzer bir şekilde KNT'lerin demetler halinde topaklanma eğiliminde olduğundan, pratik uygulamalarını büyük ölçüde kısıtlamaktadır. Yüzey aktif maddelerin basit zincirleri genellikle KNT ile nonspesifik hidrofobik etkileşimler oluşturur. Bunun sonucunda ise yüzeydeki aktif madde molekülleri nispeten gevşek bir şekilde KNT etrafında toplanmaya neden olduğunu belirtmiştir. %0,1 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin hem çekme dayanımı hem de elastiklik modülü değerlerinin azalmasının bir diğer sebebi ise numunenin hatalı üretilmiş olabileceğidir. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüsü incelendiğinde, numunede istenmeyen boşlukların oluştuğu ve bu boşlukların mekanik özellikleri etkilediği düşünülmektedir.

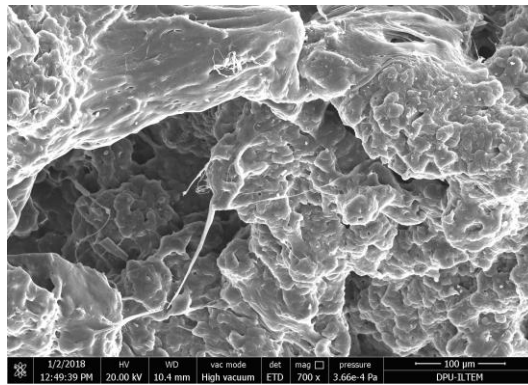
Artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak elastiklik modülünün arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, %0,3 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin elastiklik modülü %7,8 oranında artarak 2701 MPa değerine ulaşmıştır. Hassani ve arkadaşları (2013), da yaptıkları çalışmada benzer sonuçları elde etmişlerdir. Nasir ve arkadaşları (2013), ise elastiklik modülündeki artışı yük transferine bağlamışlardır. Başka bir çalışmada (Şengür, 2013), PES polimerine ÇDKNT ilaveli nanokompozit numunelerin elastiklik modülü değerleri,

katkısız numuneye göre artmıştır. Sebebinin ise, KNT'lerin üstün mekanik özelliklerine sahip olmasına, elastiklik modülü değerleri olumlu yönde geliştirdiği şeklinde açıklamıştır.

Xu ve arkadaşları (2008), epoksi matris içerisine %0,3 ÇDKNT ilaveli nanokompozitlerin elastiklik modülü sonuçları ÇDKNT katkılı numunelerde %20 artmıştır. Mekanik özelliklerinin daha fazla iyileştirmesi için ÇDKNT katkı oranını artırmak gerektiğini belirtmiştir.



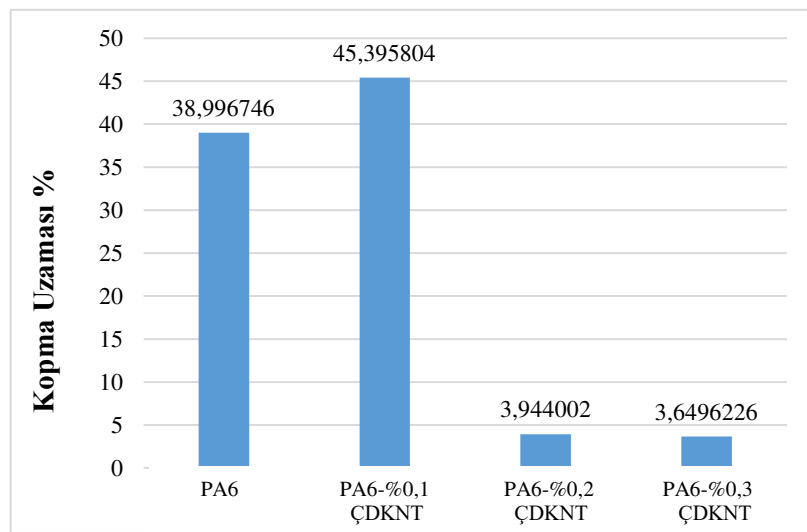
Şekil 5.3. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin elastiklik modülü (MPa) grafiği.



Şekil 5.4. PA6-%0,1 ÇDKNT numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü.

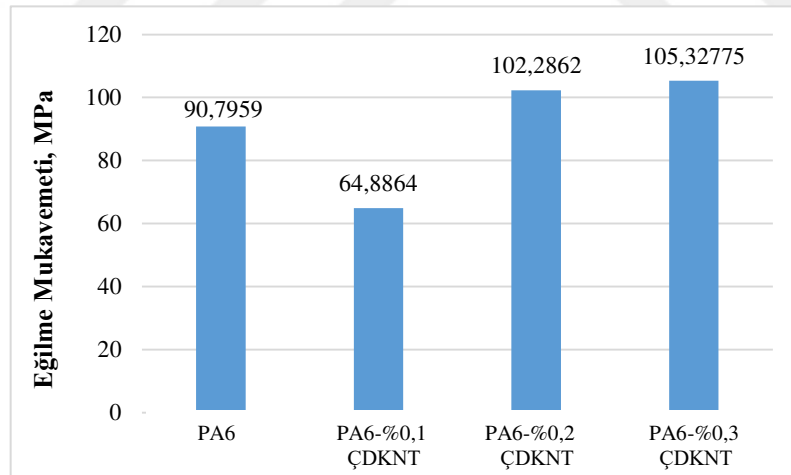
PA6 polimeri ve nanokompozitlerine ait kopma uzaması grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen %0,1 oranındaki ÇDKNT kopma uzamasını artırmıştır. %38,99 olan katkısız PA6 polimerinin kopma uzaması %7,18 oranında artarak

%45,39 olarak elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen %0,2 ve %0,3 oranındaki ÇDKNT ise kopma uzaması değerlerini sırasıyla %888 ve %988 oranlarında azaltmıştır. Benzer sonuçları Liu ve arkadaşları (2004), tarafından yapılan ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinde elde edilmiştir. Kopma uzamasının, katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında yapının gevrek hale gelmesinden dolayı %27 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Vahedi ve arkadaşları (2014), da benzer bir şekilde, ÇDKNT katkının polimer zincir hareketliliğini engelleyerek polimeri daha rijit ve dolayısıyla daha gevrek haline getirdiğini ve kopma uzamasının azaldığını belirtmiştir. Hassani ve arkadaşları (2013), malzemenin tokluk/esneklik olarak bilinen kopma uzaması değerlerinin polimer matrise göre daha rijit olan ÇDKNT ilave edilmesi ile azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kopma uzamasındaki azalmanın, PA6 matrisi içerisinde, KNT katkıların fiziksel olarak çapraz bağlı noktalar gibi davranarak topaklanmasından kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Katti ve arkadaşları (2014), polimer matris içerisinde bulunan yüksek rijitliğe sahip KNT fazının çatlak yayılımını başlatan gerilim konsantrasyonu gibi davrandığını belirtmişlerdir. Artan KNT miktarı ile gerilim konsantrasyonu alanlarının arttığı ve sonuçta kopma uzamasının azaldığını belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada (Şengür, 2013), %20 PES, %5 PVP K30, %2 PVP K90 ve %73 DMF matris malzemesine farklı oranlarda (%0,2; 0,4; 0,8) ÇDKNT ilaveli nanokompozitleri elde etmiştir. Çalışma sonucunda, ÇDKNT katkının reçine/fiber ara yüzey özelliklerini arttırarak kompozite gelen kuvvetlerin fiberlere daha homojen aktarıldığını belirtmiştir. Kuvvetlerin büyük bir kısmı fiberler tarafından taşınmasından dolayı da malzemenin dayanımını arttığı ve kopma uzamasının azaldığını belirtmiştir.



Şekil 5.5. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin kopma uzaması (%) grafiği.

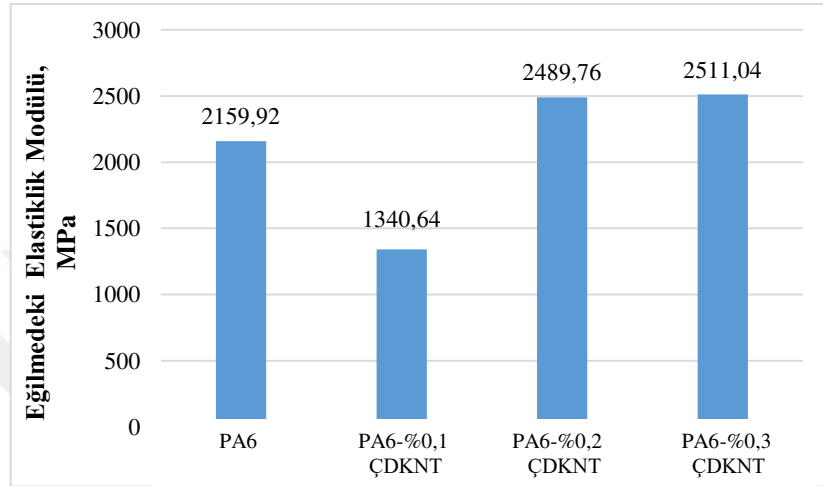
ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin eğilme mukavemeti sonuçları Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde elde edilen sonuçların çekme mukavemeti ve çekmedeki elastiklik modülü değerleri ile benzer oldukları görülmektedir. Katkısız PA6 polimerinin 90,79 MPa olan eğilme mukavemeti, %0,1 ÇDKNT ilavesi ile %39,9 oranında azalarak 64,88 MPa olarak elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen %0,2 ve %0,3 oranlarındaki ÇDKNT katkısı ise eğilme mukavemetini artırmıştır. Bu artış, katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, %0,2 ÇDKNT için %12,65 oranında elde edilirken %0,3 ÇDKNT için %16 oranında elde edilmiştir. Benzer sonuçları (Ramana vd., 2010; Katti vd., 2014), tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Katkısız PA6 polimerinin 90,7959 MPa olan eğilme mukavemeti, %0,1 ÇDKNT ilavesi ile %39,9 oranında azalarak 64,8864 MPa değerine düşmektedir. Başka bir çalışmada (Öner, 2017), benzer sonuçlar elde edilmiştir. Eklenen KNT ilavesi ile eğilme mukavemeti azalmıştır. (Zhou, 2008), çalışmasında matris malzemesine ÇDKNT ilaveli nanokompozitlerin, eğilme mukavemeti ve eğilmedeki elastiklik modülü değerlerinin, ÇDKNT katkısı ile arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebini ise matris malzeme eklenen ÇDKNT'ün köprü etkisi göstererek çatlak oluşumunu engellemesinden kaynaklandığını belirtmiştir.



Şekil 5.6. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin eğilme mukavemeti (MPa) grafiği.

Şekil 5.7'de PA6 polimeri ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozit numunelerin eğilmedeki elastiklik modülü sonuçları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde %0,1 ÇDKNT katkılı numunelerin eğilmedeki elastiklik modülü, katkısız numunelere göre %61,13 azalmıştır. Benzer sonuçları Öner ve arkadaşları (2017), ÇDKNT katkılı nanokompozit numunelerle yaptığı çalışmasında elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen %0,2 ve %0,3 oranındaki ÇDKNT katkısı ise sırasıyla %15 ve %16 oranlarında artmıştır. Kim ve arkadaşları (2009), epoksi matris

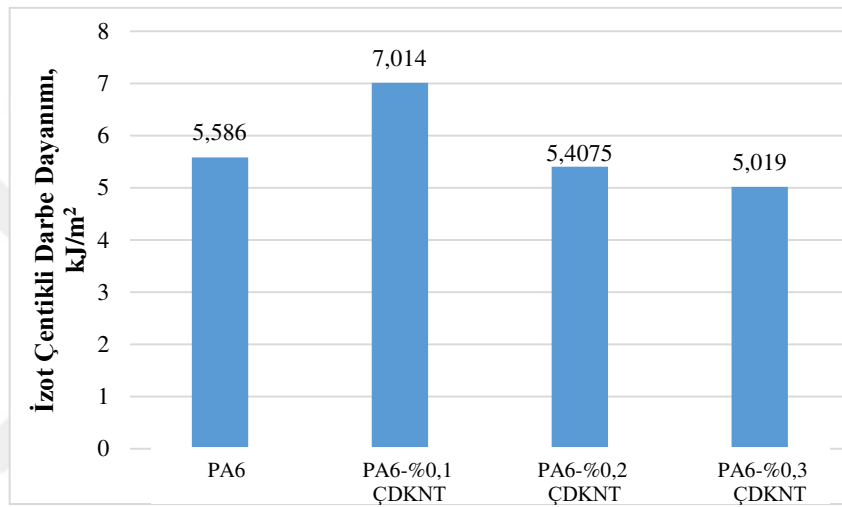
malzemesine ilave ettikleri ÇDKNT katkının mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, epoksi matris içerine %0,3 KNT ilaveli nanokompozitlerin eğilmedeki elastiklik modülü artmıştır. Malzeme kusurlarındaki azalmayı, mekanik özelliklerin iyileşmesini, nano katkı miktarını arttırarak elde edileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 5.7. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin eğilmedeki elastiklik modülü (MPa) grafiği.

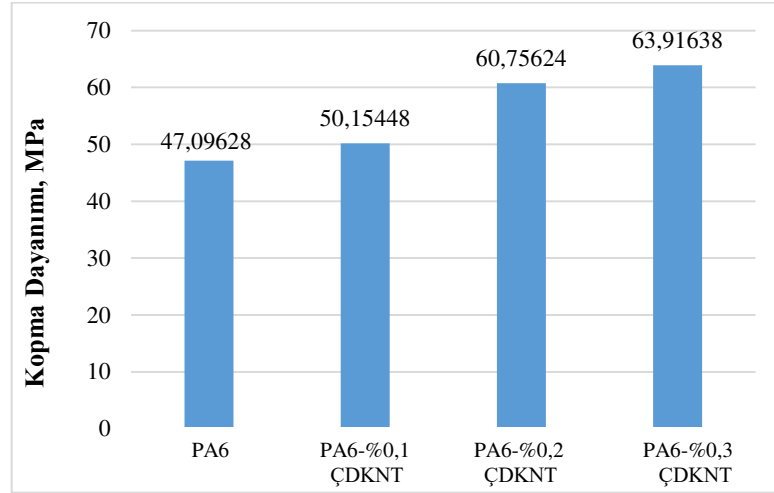
Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı PA6 nanokompozitlerinin izod çentikli darbe dayanımı sonrasında elde edilen değerleri Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, katkısız PA6 polimerinin $5,5 \text{ kJ/m}^2$ olan darbe dayanımı %0,1 ÇDKNT ilave edilmesiyle %25 oranında artarak $7,01 \text{ kJ/m}^2$ olarak elde edilmiştir. %0,2 ve %0,3 ÇDKNT ilavesi ile katkısız PA6 polimeri karşılaştırıldığında, darbe dayanımının değişmediği belirlenmiştir. Genel olarak, ÇDKNT katkılı nanokompozitler darbe hasarlarından önemli oranda etkilenmektedir. Kompozitte darbe etkisi sırasında, hasar bölgesi, matrisin çatlaması nedeniyle gerilim yığılmasını lokal olarak büyütmeye çalışmaktadır. Ancak, darbe etkisiyle oluşan bu hasar kompozit yapı içerisinde bulunan ÇDKNT katkı ile engellenebilmektedir. Bu yüzden, kompozitte bulunan ÇDKNT katkının artan miktarı ile darbe mukavemeti artırılabilir. Bu durum aynı zamanda kompozitlerin kırılma tokluğu ile yakından ilişkilidir. Diğer bir ifade ile ÇDKNT katkı ile polimer arasındaki ara yüzey bağı ne kadar kuvvetli ise darbe dayanımı da o kadar yüksek olmaktadır. ÇDKNT katkının %10-30 arasında olduğu tahmin edilen kırılma şekil değiştirmesi, eğilme ve burkulmaya izin vermektedir. Bu yüksek esneklik ÇDKNT katkılı nanokompozitler için yüksek darbe dayanımı için katkı sağlamaktadır. Lin ve arkadaşları (2011), %5 ve %10 ÇDKNT katkılı PS nanokompozitlerinin darbe dayanımlarını inceledikleri çalışmada, %5 oranındaki ÇDKNT katkısının darbe dayanımını %300 oranında artırdığını ancak

artan ÇDKNT miktarı ile darbe dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. Benzer bir çalışmada (Kaştan, 2016), artan nano katkı miktarına bağlı olarak izod darbe dayanımlarının azaldığını belirtmişlerdir. Bunun sebebinin ise polimer zincirlerinin olumsuz etkilenmesine, matris içerisinde yapısal hata ve boşluk oluşumuna bağlamışlardır. Başka bir çalışmada ise (Mirik, 2010), kompozit içerisine farklı oranlarda eklenen KNT katkı miktarı arttıkça izod darbe dayanımı azalmıştır. Bu azalmanın sebebinin artan KNT miktarı ile nanokompozitlerin daha tok, kırılğan bir yapıya dönüştüğünü belirtmiştir.



Şekil 5.8. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin izod çentikli darbe dayanımı (kJ/m²) grafiği.

Şekil 5.9’da PA6 ve PA6 nanokompozitlerinin kopma dayanımı sonrasında elde edilen değerleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, %0,1 oranındaki ÇDKNT katkısı ile kopma dayanımı %6,5 artarak 50,15 MPa elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen %0,2 ve %0,3 oranındaki ÇDKNT katkısı ile kopma dayanımı sırasıyla %29 ve %35 oranlarında artmıştır. Benzer sonuçları (Türedi, 2015), tarafından yapılan çalışmada elde edilmiştir. Epoksi matris malzemesine ÇDKNT ilavesi ile kopma dayanımı artmıştır. Bu artışın sebebi, seramik gibi kırılğan malzemelerde, düşük basınçlar altında çatlamalar olmaktadır. Sert ve kırılğan polimerin, elastiklik modülü yüksek, kopma uzaması düşük olmalıdır. Yumuşak ve dayanıklı polimerin ise elastiklik modülü düşük, kopmada uzaması yüksek olması gerektiği şeklinde açıklamıştır (Türedi, 2015).



Şekil 5.9. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin kopma dayanımı (MPa) grafiği.

5.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analiz (DSC) Sonuçları

Amorf fazın yanı sıra, yarı kristal özelliğe sahip poliamit 6 polimerinde, kararlı monoklinik α formu, metastabil pseudoheksagonal β formu ve kararsız monoklinik γ formu olmak üzere üç ana kristalin form oluşabilmektedir. α -fazında, zincirler anti-paralel bir şekilde düzenlenmiş genişletilmiş konformasyonda iken, γ -fazında zincirlerinde paralel düzenleme ve zincirler üzerindeki-NH grupları düzlemsel genişletilmiş konformasyondan yaklaşık 60° döndürülür. Şekil 5.10'da katkısız PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlere ait endotermik termogram sonucu verilmiştir. Çizelge 5.2'de ise bu termogram kullanılarak elde edilen ergime sıcaklığı, ergime entalpisi, camsı geçiş sıcaklığı ve % kristallik değerleri verilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT ile PA6 polimerinin ergime sıcaklığı 225°C civarında sabit kalırken kristallenme oranlarının arttığı belirlenmiştir. ÇDKNT katkılı polimer malzemelerin ergime sıcaklığı ve kristallenme oranları üzerine farklı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda, artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak ergime sıcaklığı ve kristallenme oranlarının sabit kaldığı, azaldığı veya hafif bir şekilde arttığı belirtilmiştir (Mahmood vd., 2013).

Mahmood ve arkadaşlarının (2013), yaptığı çalışmada, ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin ergime sıcaklığının arttığı belirtilmiştir. Polimer matris içerisinde ÇDKNT katkının bulunmasının PA6 zincirlerinin hareketini kısıtladığı, dolayısıyla PA6-%0,5KNT katkılı nanokompozitin ergime sıcaklığının yaklaşık 17°C arttığı belirtilmiştir. Aynı zamanda, ergiyik ekstrüzyon yöntemi ile karşılaştırıldığında, proses süresince polimer yapısına zarar vermediği için solüsyon karıştırma yönteminin çekirdeklenmeyi ve daha az kararlı olan γ -formuna göre α -formunun oluşumunu desteklediği ve sonuç olarak kristallenme sıcaklığının arttığı belirtilmiştir.

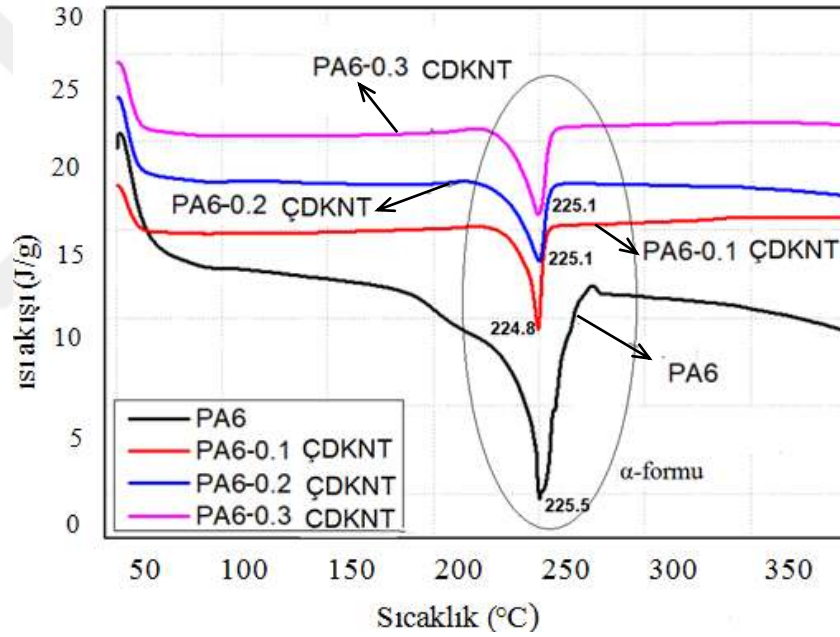
Ayrıca, karbon nanotüplerin (modifiyeli veya modifiyesiz) çekirdeklenme alanları oluşturarak PA6 polimerinin kristallenme özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir.

Mahmood ve arkadaşları (2013), PA6 numunelerin ergime sıcaklığının artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak azalarak, 220 °C civarında elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu durumun, kristallerin boyutunun küçük olduğunun veya oldukça az sayıda düzenli paketlenmenin oluşmasıyla meydana geldiğini belirtmişlerdir. PA6 polimerinin %24,78 olan kristallenme oranı %0,1; %0,2 ve %0,3 oranlarında ÇDKNT ilave edilmesi ile %25,07; %28,51 ve %25,39 oranlarında elde edilmiştir. Marini ve arkadaşları (2017), MMT katkılı PA6 nanokompozitlerin kristallenme özelliklerini inceledikleri çalışmada, modifiye edilmemiş PA6/MMT nanokompozitlerin sabit şartlar altında katkısız PA6 polimerinden daha yüksek kristallenme oranına sahip olduğunu, diğer yandan modifiye edilen MMT katkılı PA6 nanokompozitlerin ise daha düşük kristallenme oranına sahip olduklarını belirtmişlerdir. Xu ve arkadaşlarının (2014), yaptıkları çalışmada, nano-SiO₂ katkının PA6 polimerinin ergime sıcaklığını etkilemediği belirtilmiştir. Ancak, artan nano-SiO₂ miktarına bağlı olarak kristallenme sıcaklığının azaldığı belirtilmiştir. Bu durumun, PA6 moleküler zincirlerinin hareketinin nano-SiO₂ katkı tarafından engellendiğinin bir göstergesi olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda, nano-SiO₂ katkının kuvvetli bir heterojen çekirdeklenme kapasitesine sahip olmasından dolayı PA6 nanokompozitlerin kristallenme oranlarının PA6 polimerine göre hafifçe yükseldiği de belirtilmiştir. Hassani ve arkadaşları (2013), KNT katkılı PA6 nanokompozitinin kristallenme özelliklerini inceledikleri çalışmada artan KNT miktarına bağlı olarak ergime sıcaklığının arttığını belirtmişlerdir. KNT katkının polimer matris içerisinde çekirdekleyici ajan gibi davrandığı belirtilmiştir. %0,2 KNT miktarına kadar kristallenme oranının arttığı, bu değerden sonraki KNT miktarlarında ise azaldığı belirtilmiştir. Düşük oranlarda KNT katkının çekirdekleyici ajan gibi davrandığı ancak artan KNT miktarlarında rastgele dağılan KNT katkının kristallenmeyi engellediği ve böylece kristal büyümesinin kısıtlandığı belirtilmiştir.

Çizelge 5.2 incelendiğinde PA6 polimerinin 43,2 °C olan camsı geçiş sıcaklığı farklı oranlarda ÇDKNT ilave edilmesiyle 48,4; 59,9 ve 60,2 °C olarak elde edilmiştir. PA6 polimeri içerisinde iyi dağılan nanotüplerin birbirleriyle etkileşiminin artacağı ve polimer zincirlerinin hareketini kısıtlayarak camsı geçiş sıcaklığının artacağı belirtilmiştir. Aynı zamanda, artan camsı geçiş sıcaklığının kompozitin elastiklik modülü ve çekme dayanımını artıracığı belirtilmiştir (Mahmood vd., 2013).

Şekil 5.10'da verilen termogram incelendiğinde tüm numunelerin tek bir pik gösterdiği belirlenmiştir. Bu tek ergime piki, PA6 polimerinin sadece α -formunda kristal yapıya sahip

olduğunun bir göstergesidir. Benzer bir sonuç Mahmood ve arkadaşları (2013), tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Hou ve arkadaşları (2013), tarafından fonksiyonelleştirilmiş grafen katkılı PA6 nanokompozitlerinde de tek bir ergime pikinin olduğu, PA6 polimerinin kristallenmesi süresince çekirdekleyici ajan gibi davranan iyi dağılmış grafen plakalarının kristallenme sıcaklığını önemli oranda artırdığı belirtilmiştir. Hassani ve arkadaşları (2013), yüksek KNT içeriğinde, KNT katkının yüksek ısı iletkenliğinden dolayı ergime sıcaklığının azalacağı ve kristal parçalara ısı transferinin kolaylaşacağı ve dolayısıyla ergime sıcaklığının azalacağı belirtilmiştir. Yapılan çalışmada, PA6 polimerinin kaba bir pik ve 215 °C'de γ -formunu temsil eden küçük bir pik olmak üzere iki pik oluşturduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.10. PA6 ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin ergime (endotermik) termogramları.

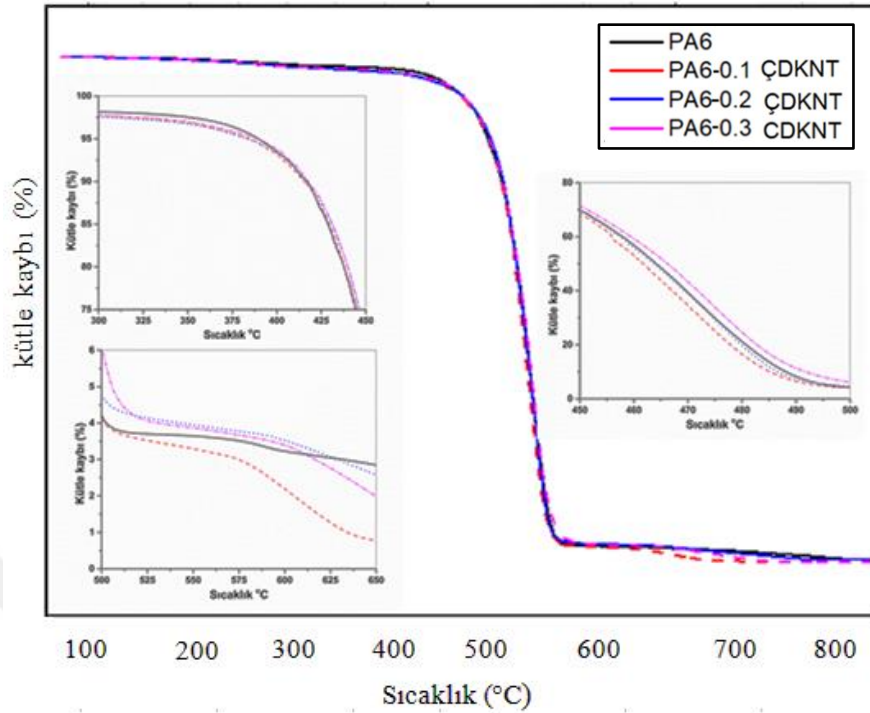
Çizelge 5.2. Endotermik DSC sonuçlarına göre numunelerin ergime sıcaklığı, camı geçiş sıcaklığı ve kristallenme oranları.

Numune	Ergime sıcaklığı, (°C)	Ergime entalpisi, (J/g)	Camsı geçiş sıcaklığı, (°C)	% Kristallik
	T_m	ΔH_m	T_g	X_c
PA6	225,5	59,4736	43,26	24,78
PA6-%0,1 ÇDKNT	224,8	60,1268	48,41	25,07
PA6-%0,2 ÇDKNT	225,1	68,2992	59,94	28,51
PA6-%0,3 ÇDKNT	225,1	60,7643	60,26	25,39

5.5. Termal Gravimetrik Analiz (TGA) Sonuçları

Termal gravimetrik analizi (TGA), numunelerin ağırlık değişimi ve referans ile arasındaki sıcaklık farkını belirlemek için yapılmıştır. Analizler 20 ml/dak. akış hızında azot gazı ortamında ve ısıtma hızı 10,0 °C/dak olacak şekilde 30-800 °C arasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.11’de görüldüğü gibi PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitleri benzer bir termal bozunma davranışı göstermişlerdir. Kütle kayıpları yaklaşık olarak 350 °C’de başlamış ve 500 °C’de tamamlanmıştır. Araujo ve arkadaşları (2011), ağırlıkça %3 OMMT katkılı PA6 nanokompozitlerin kütle kayıplarının 400-520 °C arasında gerçekleştiğini ve PA6 ile PA6 nanokompozitlerin benzer termal davranış sergilediğini belirtmişlerdir. Mahmood ve arkadaşları (2013), saf ve fonksiyonelleştirilmiş ÇDKNT katkılı PA6 polimerinin termal özelliklerini inceledikleri çalışmada, PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, %0,5 oranında modifiyesiz ÇDKNT katkılı PA6 polimer nanokompozitin termal bozunma sıcaklığını 10 °C arttırdığını, fonksiyonelleştirilmiş ÇDKNT katkılı PA6 polimerinin ise termal özellikleri hafif bir şekilde kötüleştirdiği belirtilmiştir.

Katkısız ÇDKNT katkının α -formundaki kristallerin oluşumunu ve kristallenme derecesini artırdığını belirtmişlerdir. Artan ÇDKNT miktarı (%1,0) ile PA6 matris içerisinde nanotüplerin üniform dağılımının zorlaşması sebebiyle, termal özelliklerin aynı kaldığı veya hafif bir şekilde iyileştiği belirtilmiştir. Pratikte, yapısal kararsızlığın bir göstergesi olan numunelerin %50 ağırlık kayıplarındaki bozunma sıcaklığı hesaplanmalıdır. PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlerin %50 kütle kaybındaki sıcaklıkları incelendiğinde, %0,3 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin daha yüksek sıcaklıklarda kütle kaybına uğradığı belirlenmiştir. Bu durum, ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin termal bozunma özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir. Hızlı kütle kaybından (500 °C’den) sonra kalan kütle miktarları incelendiğinde, tüm numunelerin bağıl olarak %3’ten daha az miktarla düştüğü görülmektedir.



Şekil 5.11. PA6 ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin kütle kaybı grafiği.

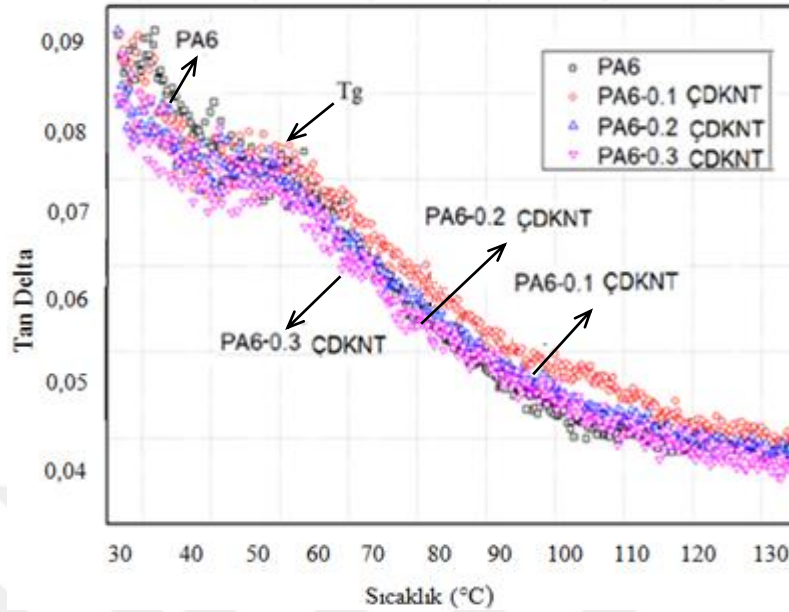
5.6. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Sonuçları

Malzemeleri kalıcı deformasyona uğratmadan belirli termal şartlar altında sinüzoidal yük uygulayarak viskoelastik davranışın incelendiği deney çeşidi Dinamik Mekanik Analiz (DMA)'dır. Zamana bağlı şekil değiştirme ile elastik toparlanmanın birlikte olduğu davranış ise viskoelastik davranıştır. Malzemenin modül olarak isimlendirilen bükülme ve sönümleme özellikleri DMA ile ölçülmektedir. Yükün uygulandığı frekans ve numunenin sıcaklığı malzemenin modülünde birtakım değişiklikler meydana getirmektedir. Yükleme durumundaki modüle 'depolama modülü' (storage modulus-E') ve tam tersine ise 'kayıp modülü' (loss modulus-E'') denmektedir. Depolama modülü malzemenin elastik tepkisini bir başka deyişle depoladığı enerjiyi ifade eder. Kayıp modülü ise malzemenin viskoz tepkisini yani ısı olarak kaybolan enerjiyi vermektedir. Kaybın depolama enerjisine olan oranına ise tan delta ($\tan\delta$) denmektedir ve enerji kaybolu ölçüsü (sönüm) olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 5.12'de PA6 polimeri ile ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin sıcaklığa bağlı olarak $\tan\delta$ sonuçları verilmiştir. $\tan\delta$ eğrisinin pik noktaları malzemenin camsı geçiş sıcaklığını (T_g) vermektedir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 polimerinin camsı geçiş sıcaklığı 51,4 °C elde edilirken %0,1; %0,2 ve %0,3 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin camsı geçiş sıcaklıkları 50,53; 52,79 ve 53,46 °C elde edilmiştir. Benzer sonuçlar Logakis ve Kanapitsas

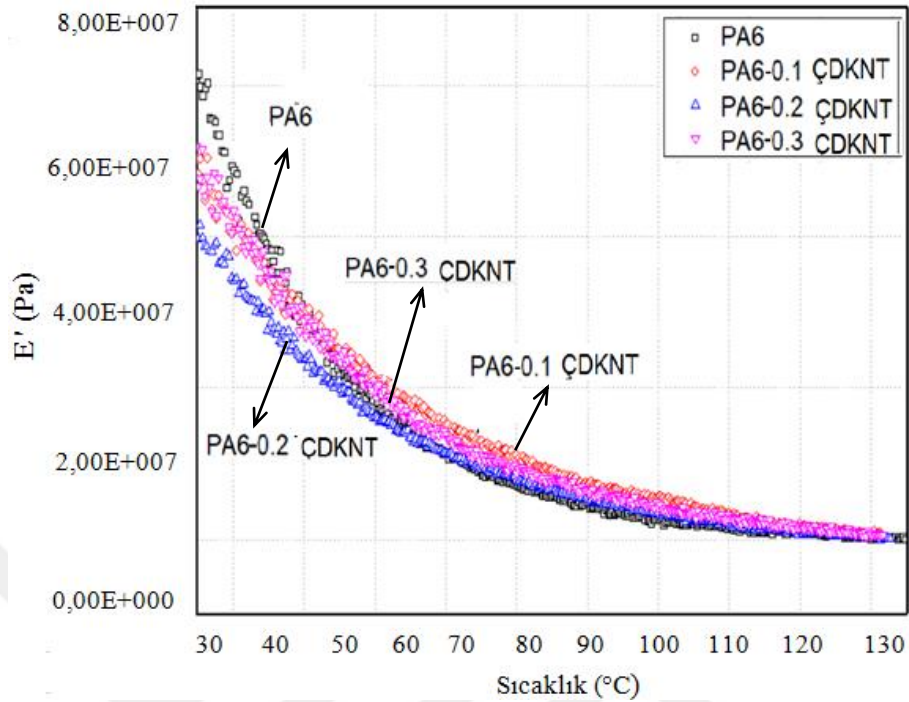
(2009), tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Nanotüplerin PA6 polimerine ilave edilmesi ve iyi bir şekilde dağılması sonucunda nanotüplerin birbirleriyle olan etkileşimini artıracak ve polimer zincirlerinin hareketini kısıtlayarak camsı geçiş sıcaklığının artacağı belirtilmiştir. Aynı zamanda, artan camsı geçiş sıcaklığının elastiklik modülü ve çekme dayanımını geliştireceği belirtilmiştir (Nasir vd., 2013), elde edilen camsı geçiş sıcaklığı değerlerinin DSC analizi ile elde edilen değerler ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Logakis ve arkadaşları (2009), katkılı PMMA nanokompozitlerinin DMA analizi ile elde ettikleri camsı geçiş sıcaklığı değerlerinin DSC analizi sonuçlarına göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durum, DMA analizindeki (1 Hz) ölçümlerin DSC analizindeki (10^{-2} - 10^{-3} Hz) ölçümlere göre daha yüksek frekansta yapılmasına bağlanmıştır (Vatalis vd., 2001). Esmizadeh ve arkadaşları (2017), PA6/ECO polimerine ilave ettikleri ÇDKNT katkının polimer zincir hareketliliğini kısıtladığı ve dolayısıyla PA6 ve ECO bileşenlerinin sönümlleme performanslarının azaldığını belirtmişlerdir. KNT katkılı polimer numunelerde daha yüksek camsı geçiş sıcaklığı elde edilmekle birlikte $\tan\delta$ tepe değerlerini azalttığı belirtilmiştir.

Kanapitsas ve arkadaşları (2009), KNT katkılı PA6 nanokompoziti ve ÇDKNT katkılı iPP nanokompozitinin DMTA sonuçlarını inceledikleri çalışmada, PA6 polimerine ilave edilen KNT katkının depolama modülünü %30 oranında artırdığını ancak camsı geçiş sıcaklığını azalttığını belirtmişlerdir. iPP polimerine ilave edilen ÇDKNT katkısının ise depolama modülünü %60 oranında artırdığını ancak camsı geçiş sıcaklığının değişmediğini belirtmişlerdir. Sorrentino ve arkadaşları (2010), PS polimerine ilave ettikleri ÇDKNT katkının depolama modülünü artırdığını, camsı geçiş sıcaklığını ise ani bir şekilde azalttığını, camsı geçiş sıcaklığının artan ÇDKNT miktarı ile de arttığını belirtmişlerdir. PS matrisinin kristallenmesi, karbon nanotüpler tarafından immobilize (bir bölgenin hareketsiz hale getirilmesi) edilmiş katı amorf fazın gevşetilmesi ve fazlar arası etkileşimler ile farklı etkilerin örtüşmesine karşılık gelir (Pantani vd., 2005). Düşük KNT miktarlarında, serbest hacmin artması ile zincir hareketliliğinin arttığı ve camsı geçiş sıcaklığının azaldığı belirtilmiştir. Artan KNT miktarlarında ise polimer zincir hareketinin kısıtlanmasının arttığı ve bu durumun ise ani düşüşten sonra artan KNT miktarına bağlı olarak artan camsı geçiş sıcaklığını açıkladığı belirtilmiştir.



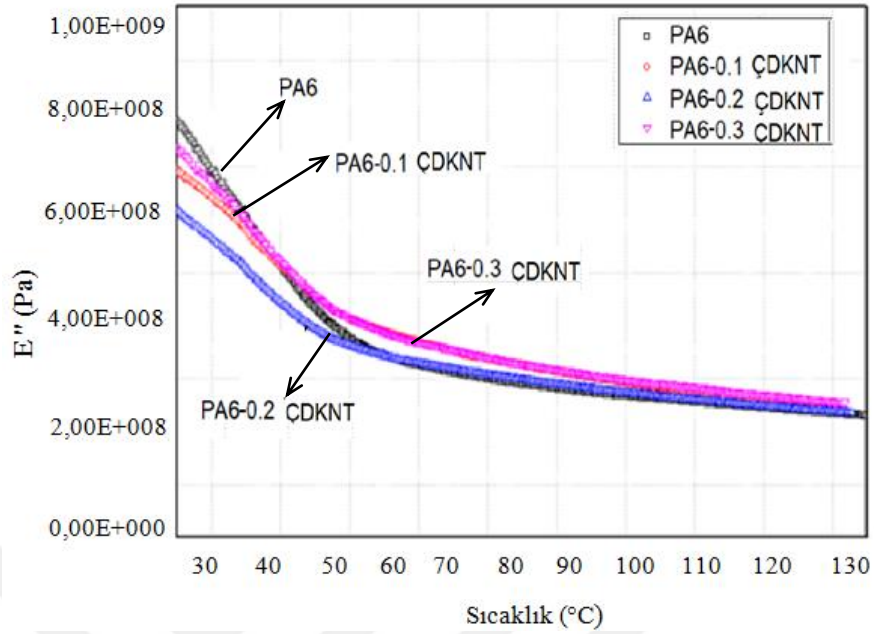
Şekil 5.12. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin Tan Delta (Tan δ) sonuçları.

Şekil 5.13'te PA6 ve PA6 nanokompozitlerin sıcaklığa bağlı olarak depolama modülü değerleri verilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen farklı oranlardaki ÇDKNT katkısı PA6 polimerinin depolama modülünü artırmıştır. Katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında bu artışlar %0,1; %0,2 ve %0,3 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitleri için %16,2; %3,75; %16,1 oranlarında elde edilmiştir. Bunun sebebi, karbon nanotüpün yüksek rijitliğe sahip olması ve aynı zamanda polimer zincirlerinin hareketliliğini kısıtlamasından kaynaklanmaktadır (Aso vd., 2007; Szymczyk vd., 2011). Benzer bir açıklama, Jin ve arkadaşları (2001), ağırlıkça %4-26 oranlarında ÇDKNT katkılı PMMA nanokompozit numuneleri içinde yapılmıştır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, KNT katkının yüksek rijitlik özelliğine sahip olmasının depolama modülünü artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, KNT katkının bulunmasının matrisin yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek modül değerlerini sürdürmesini sağladığı belirtilmiştir. Liu ve arkadaşları (2004), PA6 polimerine ilave ettikleri farklı oranlardaki KNT katkıların depolama modülü sonuçlarını incelemişlerdir. Camsı bölgede (0 °C), 2,08 GPa olan PA6 polimerinin depolama modülü, %2 KNT katkılı PA6 nanokompozitleri için %43 oranında artarak 2,97 GPa elde edilmiştir. Kauçuğumsu bölgede (120 °C) ise 350 MPa değerinden %57 oranında artarak 550 MPa değerine ulaşmıştır. Depolama modülündeki artış, yüksek en/boy oranına sahip KNT katkının homojen dağılımına ve yüksek mekanik özelliklerine bağlanmıştır. Camsı geçiş sıcaklığı sonuçları incelendiğinde ise 65 °C civarında kaldığı belirlenmiştir. Benzer bir sonuç, Esmizadeh ve arkadaşları (2017), tarafından yapılan ağırlıkça %1,5 oranında ÇDKNT katkılı PA6/OEC nanokompozitlerinde de elde edilmiştir.



Şekil 5.13. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin depolama modülü (E') sonuçları.

Şekil 5.14'te PA6 polimer ve PA6 nanokompozitlerin sıcaklığa bağlı olarak kayıp modülü değerleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT katkıları artan sıcaklık ile birlikte kayıp modülü değerlerini artırmıştır. Bose ve arkadaşları (2008), ağırlıkça 50/50 PA6/ABS polimerine ilave ettikleri ÇDKNT katkının depolama modülü ve kayıp modüllerini incelemişlerdir. ÇDKNT katkılı (PA6/ABS/ÇDKNT) polimerinde, düşük sıcaklıklarda yüksek depolama modülü elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, modifiyeli ÇDKNT katkının, özellikle camısı bölgede, modifiyesiz ÇDKNT katkıya göre daha yüksek depolama modülü elde edildiği, bunun sebebini ise modifiyeli KNT katkının homojen olarak dağılmasına bağlamışlardır. Depolama modülü sonuçları incelendiğinde, zincir hareketliliğini sınırlandıran ÇDKNT katkının ilave edilmesi ile T_{α} 'nın (amorf fazın camısı geçiş sıcaklığı) hafifçe arttığı belirtilmiştir.

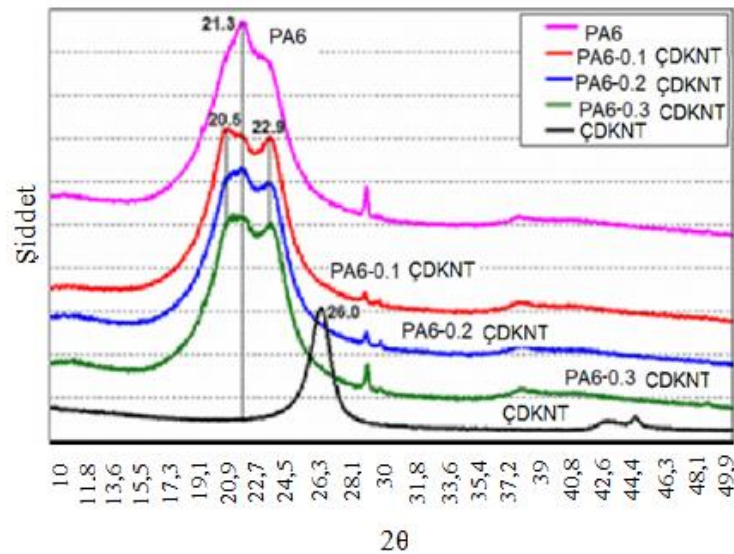


Şekil 5.14. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin kayıp modülü (E'') sonuçları.

5.7. X Ray Difraktometresi (XRD) Sonuçları

Şekil 5.15’de, ÇDKNT, PA6 polimeri ile PA6 nanokompozitlerin XRD grafiği verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 polimerinin $2\theta:21,3^\circ$ ’de kuvvetli γ -formu oluşturduğu, PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT katkıların ise $2\theta:20,5^\circ$ ve $2\theta:22,9^\circ$ ’de α -formu oluştuğu belirlenmiştir. ÇDKNT katkı, α -formunu daha şiddetli hale getirirken γ -formunun şiddetini azaltmıştır. Ayrıca, karbon nanotüplerin karakteristik pik şiddeti $2\theta:26,0^\circ$ ’de elde edilmiştir. Khanna ve Kuhn’a (1997), göre, poliamit 6 polimeri, α -monoklinik ve γ -pseudoheksagonal olmak üzere iki farklı kristalografik form alabilmektedir. α -formunda hidrojen bağları anti-paralel zincirler arasında, γ -formunun hidrojen bağları ile paralel zincirler arasında oluştuğu belirtilmiştir. Mahmood ve arkadaşları (2013), PA6 polimerinin XRD analizleri sonucunda, $2\theta:21,28^\circ$ ’de oluşan kuvvetli pikin γ -formu, $2\theta:20,48^\circ$ (200) ve $2\theta:23,24^\circ$ ’de (002,022) oluşan iki küçük pikin ise α -formu olduğunu belirtmişlerdir. Katkısız PA6 polimerinde γ -formu ana faz olmak üzere α -formu ve γ -formundan oluştuğunu belirtmişlerdir. α -formunun anti-paralel olarak paketlenmiş hidrojen bağlı zincir tabakalarından oluşan termodinamik olarak kararlı bir faz olduğu, γ -formunun ise paralel zincirler arasındaki hidrojen bağlarının sonucu olarak şekillenen daha az kararlı faz olduğunu belirtmişlerdir. PA6 polimerine ilave edilen KNT katkının α -formunu daha şiddetli hale getirirken γ -formunun şiddetini azalttığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, nanokompozitlerde baskın fazın α -fazı olduğu belirtilmiştir (Liu vd., 2004). PA6 ve grafen oksit katkılı PA6 nanokompozitlerin XRD analizleri sonucunda, PA6 polimerinin

α -formu yansımalarını α_1 , $2\theta:20^\circ$ (200) ve α_2 , $2\theta:24^\circ$ (002/202) elde ettiklerini, karakteristik yansıma olan γ -formunun ($2\theta:21,3^\circ$) ise oluşmadığını belirtmişlerdir. α_1 pikinin şiddetinin grafen oksit ilavesi ile zayıfladığını, α_2 pikinin şiddetinin ise hafifçe değiştiğini belirtmişlerdir. PA6 polimerinin (200) ve (002/202) yansımalarına karşılık gelen α pikinin şiddetinin aynı zamanda kristallerin büyümesini gösterdiğini belirtmişlerdir. Hassani ve arkadaşları (2013), katkısız PA6 polimerinin $2\theta:21,4^\circ$ 'de baskın faz olan γ -formunu, ve yaklaşık $2\theta:20^\circ$ ve $2\theta:23,7^\circ$ 'de α -formunu oluşturduklarını belirtmişlerdir. KNT katkının (002) düzleminde yapılarındaki grafitik düzlemleri doğrulayan $2\theta:26^\circ$ 'de pik elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan nanokompozitlerin, (200), (002) ve (220) Sahoo ve Zhang (2009), veya (100), (010) ve (110) (Li vd., 2007), düzlemlerine karşılık gelen $2\theta:20,5^\circ$ ve $2\theta:23,9^\circ$ 'de α -formunu oluşturduklarını belirtmişlerdir. Bu piklerin, PA6 nanokompozit yapı içerisinde KNT tarafından α kristal formunun tetiklendiğini göstermektedir. Zhang ve arkadaşları (2014), yaptıkları çalışmada, PA6 polimerinin kararlı olan α -formunu ve γ -formunu oluşturduklarını belirtmişlerdir. Paralel ve anti-paralel zincir düzenindeki H-bağlarının, sırasıyla monoklinik γ -formunun ve monoklinik α -formunun bir karakteristiği olduğunu belirtmişlerdir (Bilotti vd., 2009). PA6 polimerinin $2\theta:19,8^\circ$ ve $23,7^\circ$ 'de α fazını, $2\theta:21,8^\circ$ 'de ise γ fazını oluşturduklarını belirtmişlerdir. Shi ve arkadaşları (2015), PA6 polimerinin (200)/(001) düzleminde $2\theta:21,5^\circ$ 'de γ -fazını oluşturduklarını, yönlendirilen numunelerde ise PA6 polimerinin α -formunun (200) ve (002)/(202) düzlemlerinde $2\theta:20^\circ$ ve $2\theta:23^\circ$ 'de pik oluşturduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca, $2\theta:23^\circ$ 'deki pik şiddetinin arttığı ve bunun γ -fazının α -fazına dönüştüğünün bir göstergesi olduğunu belirtmişlerdir.

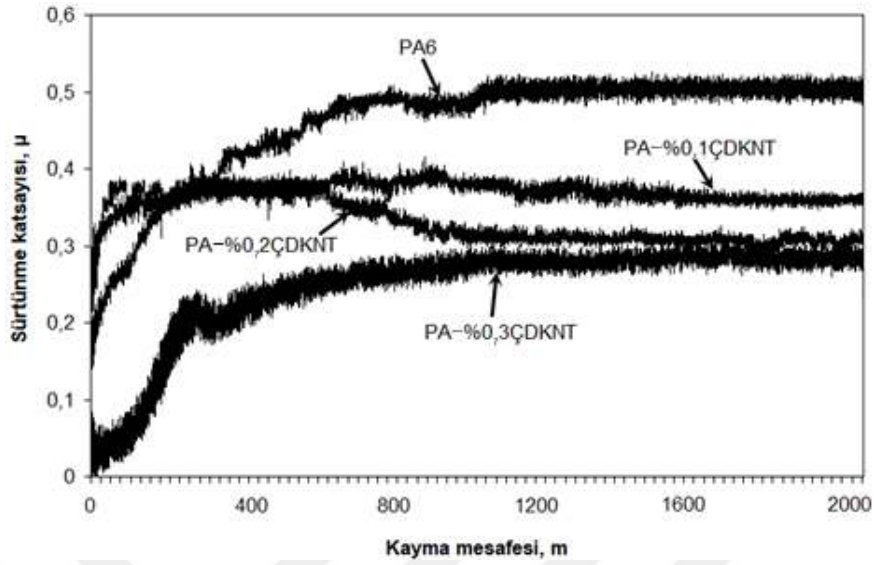


Şekil 5.15. ÇDKNT, PA6 polimeri ile PA6 nanokompozitlerin XRD grafiği.

5.8. Aşınma ve Sürtünme Deneyinin Sonuçları

Katkısız PA6 polimeri ile farklı oranlarda (%0,1; %0,2; %0,3) ÇDKNT katlı PA6 nanokompozitlerinin 0,4 m/s kayma hızında ve 30 N yük altındaki kayma mesafesi-sürtünme katsayısı arasındaki ilişki Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 ve PA6 nanokompozitlerinin sürtünme katsayısı değişimi başlangıç aşaması ve kararlı hal aşaması olmak üzere iki aşamada meydana gelmiştir. Sürtünme katsayıları başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde artmış ve 500 m gibi bir mesafede kararlı hal aşamasına ulaşmıştır. Hem katkısız PA6 polimeri hem de PA6 nanokompozitleri için sürtünme katsayısı benzer değişim göstermiştir. PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT, sürtünme katsayısını önemli oranda azaltmıştır. Bunun sebebi ise çelik disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası ve katkı miktarına bağlı olarak transfer film tabakası kalınlığının değişmesine bağlanmıştır. Oluşan transfer film tabakası polimer pim ile çelik disk yüzeyi arasında ince bir film tabakası oluşturarak pim ve disk yüzeylerinin temasını kesmiş ve sürtünme katsayısının önemli oranda azalmasına sebep olmuştur. Kumar ve arkadaşları (2015), çalışmalarında sürtünme katsayısındaki azalmayı KNT'lerin sürtünme sırasında katı yağlayıcı etkisi göstermesi olarak açıklamışlardır. Çünkü nano boyuttaki KNT tabakaları birbirine güçlü van der Waals bağları ile bağlanmıştır. Bu durum sürtünme sırasında tabakaların parçalanmasını zorlaştırmaktadır. Sürtünme katsayısındaki azalmanın bir diğer sebebi yüzeydeki KNT'lerin, pürüzlerin arasına girip yuvarlanma etkisi göstererek sürtünmeyi azaltması olarak açıklamışlardır. Ayrıca KNT-polimer arasında bağ oluşumunda ve sürtünmede en/boy oranının önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Wei ve arkadaşları (2006), çalışmalarında ÇYMAPE matris malzemesine farklı oranlarda ÇDKNT ilaveli nanokompozitlerle bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, ÇYMAPE/ÇDKNT nanokompozitin sürtünme katsayısının katkısız ÇYMAPE'ye göre azaldığını tespit etmişlerdir. ÇDKNT miktarı arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır. Sürtünme katsayısının azalmasını matris malzemeye ilave edilen ÇDKNT ile yeni bir mikroyapı oluşması, ÇYMAPE/ÇDKNT arasındaki ara yüzeyde yeni ve güçlü bağların oluşması olarak açıklamışlardır. Sirong ve arkadaşları (2007), çalışmalarında PMMA matris malzemesine farklı oranlarda KNT ilavesinin sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda PMMA/KNT nanokompozitlerin sürtünme katsayısı % KNT'nin artması ile azalmıştır. KNT miktarının artması ile sürtünme katsayısı daha kararlı hale gelmiştir. Bu durumu, KNT'lerin mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklerine sahip olmasına bağlamışlardır.



Şekil 5.16. Katkısız PA6 ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (kayma hızı: 0,4 m/s, uygulanan yük: 30 N).

Şekil 5.17 (a-d)'de katkısız PA6 polimeri ile %0,1; %0,2; %0,3 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin, sırasıyla 0,4; 0,8; 1,2 ve 1,6 m/sn kayma hızlarında, 10 N-40 N yüke karşı sürtünme katsayıları verilmiştir. Genel olarak şekiller incelendiğinde, uygulanan yükün artmasıyla, sürtünme katsayısının arttığı gözlenmiştir. 0,4 m/s kayma hızında uygulanan yükün 10 N'dan 40 N'a artması ile katkısız PA6 polimerinin sürtünme katsayısı %62,5 oranında artarken, %0,1; 0,2; 0,3 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin sürtünme katsayıları sırasıyla %41,3; %34,6; %45,4 artmıştır.

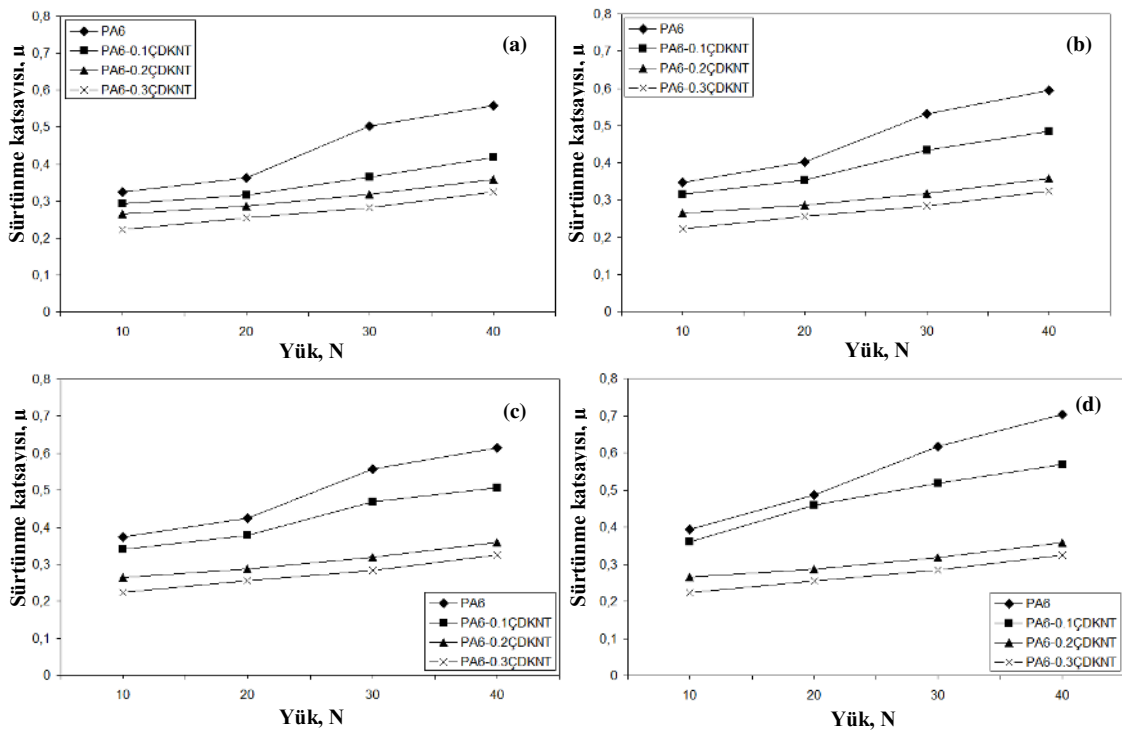
Benzer bir çalışmada (Kaştan, 2015), artan yük ve kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısının arttığını belirtmiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak pim ile diskin teması sonucunda ısındığını ve bu durumun temas noktasındaki sıcaklığını arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca artan sıcaklık ile PA6 polimerinin yumuşadığını, PA6 polimerinden küçük partüküllerin koptuğunu ve plastik deformasyonun meydana geldiğini belirtmiştir. Bunun sonucu olarak yüksek yüklerin ve hızların sürtünme katsayısında artışa neden olduğunu açıklamıştır.

1,2 m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimerinin 0,3731 μ olan sürtünme katsayısı değeri %64,3 oranında artarak 0,6133 μ değeri elde edilmiştir. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerindeki bu artış sırasıyla %34,3; %34,6 ve %42,5 oranlarında elde edilmiştir.

PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT katkının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir.

1,2 m/s kayma hızında, 30 N yük altında, PA6 polimerine ilave edilen farklı oranlardaki (%0,1, %0,2 ve %0,3) ÇDKNT katkısı, sürtünme katsayısını %29,9; %39,8 ve %51,8 azaltmıştır. Benzer sonuçları Lee ve arkadaşları (2014), tarafından da elde edilmiştir. Artan KNT miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki azalmayı, karbon nanotüplerin yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde aşınma yüzeyindeki ısınmanın azalması olarak açıklamışlardır. Yang ve arkadaşları (2005), çalışmalarında PMMA matris malzemesine farklı oranlarda KNT ilavesinin sürtünme katsayısına etkisini incelemiştir. Sürtünme katsayısı % KNT miktarının artması ile azalmıştır. Bu durumu, KNT'lerin mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklerine sahip olmasına bağlamışlardır.

Uygulanan kayma hızı ve yük arasındaki en yüksek sürtünme katsayısı 1,6 m/s kayma hızı ve 40 N yük altında 0,7026 μ değeri ile katkısız PA6 polimerinde elde edilirken, en düşük sürtünme katsayısı 0,4 m/s kayma hızında, 10 N yük altında 0,2231 μ değeri ile PA6-%0,3 ÇDKNT katkılı nanokompozitlerde elde edilmiştir.

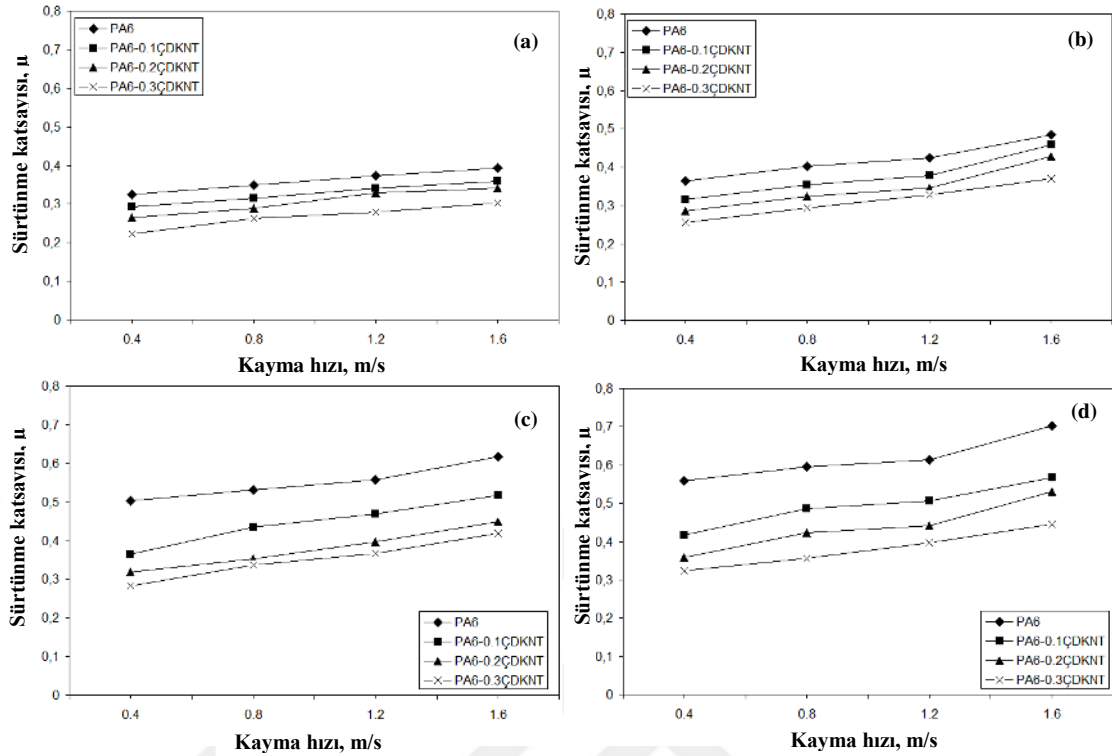


Şekil 5.17. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi: a) 0,4 m/sn, b) 0,8 m/sn, c) 1,2 m/sn, d) 1,6 m/sn.

Şekil 5.18’de katkısız PA6 polimeri ile %0,1; %0,2 ve %0,3 ÇDKNT ilaveli PA6 nanokompozit numunelerin, 10 N, 20 N, 30 N ve 40 N yük altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Genel olarak şekiller incelendiğinde, kayma hızının artması ile sürtünme katsayısının artmıştır. Katkısız PA6 polimeri için 0,4 m/s kayma hızında sürtünme katsayısı 0,3242 μ değerindeyken hızın 4 katına çıkartılması ile %21 artmıştır. Farklı oranlarda (%0,1; 0,2; 0,3) eklenen ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin kayma hızı-sürtünme katsayısı ilişkisi incelendiğinde ise kayma hızı arttıkça sürtünme katsayıları artmıştır. Suresha ve arkadaşları (2010), mikro ve nano katkılı PA66/PP nanokompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışmada, artan kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısının arttığını, tribolojik özelliklerin nano katkının eklenmesi ile geliştiğini belirtmişlerdir.

PA6 polimeri 40 N yük ve 0,4 m/s kayma hızı altında 0,4174 μ olan sürtünme katsayısı, %0,1 ÇDKNT ilavesi ile %36 artmıştır. PA6 polimerine eklenen katkı miktarı arttıkça (%0,2; 0,3) PA6 nanokompozitlerinin, artan kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayıları artmıştır. Benzer bir çalışma da Sirong ve arkadaşları (2014), tarafından yapılmıştır. PA66 matris malzemeye farklı oranlarda nano katkı ve uyumlaştırıcı olarak SEBS-g-MA ilave ederek hazırlanmış oldukları nanokompozitlerin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, farklı oranlarda eklenen nano katkı ilavesi ile kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısının arttığını belirtmişlerdir.

Tüm şekiller incelendiğinde, katkısız PA6 polimeri ve PA6 nanokompozitlerinde artan kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. En fazla artış 40 N yük altında kayma hızının 4 katına çıkartılmasıyla birlikte sürtünme katsayısı %25 artarak katkısız PA6 polimerinde elde edilmiştir.



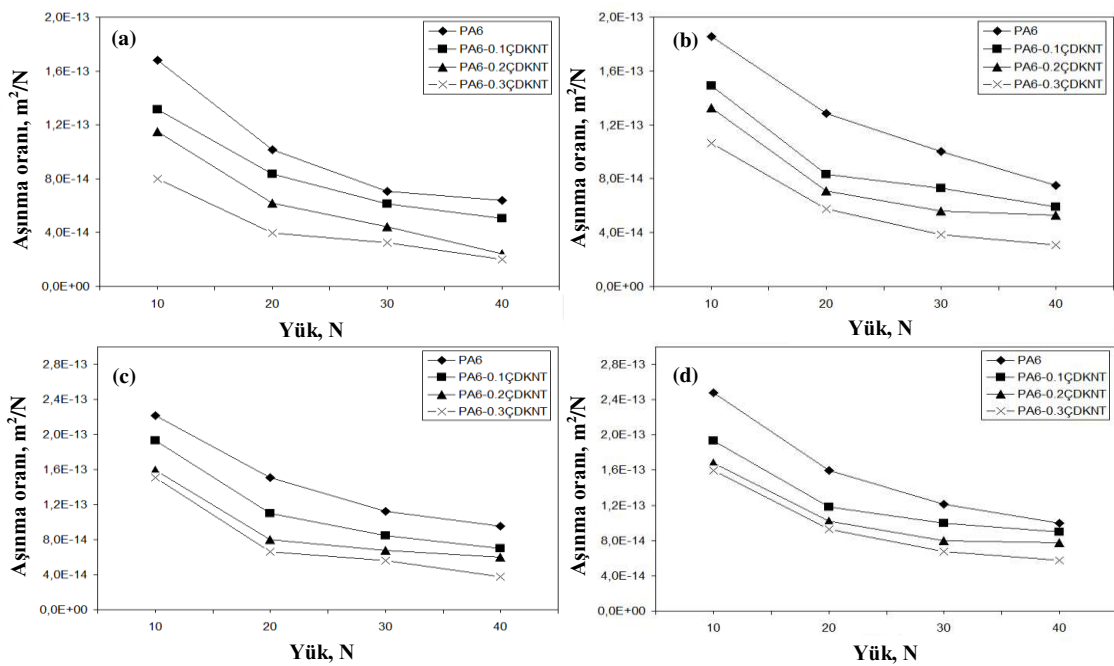
Şekil 5.18. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi: a) 10 N, b) 20 N, c) 30 N, d) 40 N.

Şekil 5.19’da katkısız PA6 polimeri ile %0,1; %0,2 ve %0,3 ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin farklı kayma hızları altında, 10 N-40 N yüklerle karşı aşınma oranlarındaki değişim verilmiştir. Genel olarak şekiller incelendiğinde yükün artması ile aşınma oranlarının azaldığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimeri, 0,4 m/s kayma hızında uygulanan yükün 10 N’den 40 N’a artırılması ile spesifik aşınma oranı %165 azalmıştır. PA6 polimerine eklenen (%0,1; %0,2 ve %0,3) ÇDKNT katkısı ile aşınma oranları ise %160, %372 ve %300 azalmıştır.

PA6 ve nanokompozitlerinin 1,2 m/s kayma hızında aşınma oranlarındaki değişim incelendiğinde benzer sonuçlar gözlenmiştir. Uygulanan yük arttıkça aşınma miktarı azalmıştır. Katkısız PA6 polimerinin 10 N yük altında $2,212E^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ olan aşınma değeri yükün 40 N’a çıkartılması ile birlikte %131 oranında azalarak $9,513E^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT katkının aşınma oranı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. 1,2 m/s kayma hızında ve 20 N yük altında, katkısız PA6 polimerine ilave edilen %0,1; %0,2 ve %0,3 oranlarındaki ÇDKNT katkısı, aşınma oranında %36, %87,5 ve %127 oranında azaltmıştır. Brian ve arkadaşları (2009), çalışmalarında benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Yüksek yoğunluklu polietilen matris malzemesine farklı oranlarda eklenen KNT ilaveli nanokompozitlerinin aşınma davranışını

incelemişlerdir. Çalışma sonucunda KNT miktarı arttıkça aşınma değerlerinin azalmıştır. Başka bir çalışmada ise Liu ve arkadaşları (2000), matris malzemesine eklenen nano parçacıkların, bir film tabakası oluşturarak aşınma direncinin arttığını belirtmişlerdir.

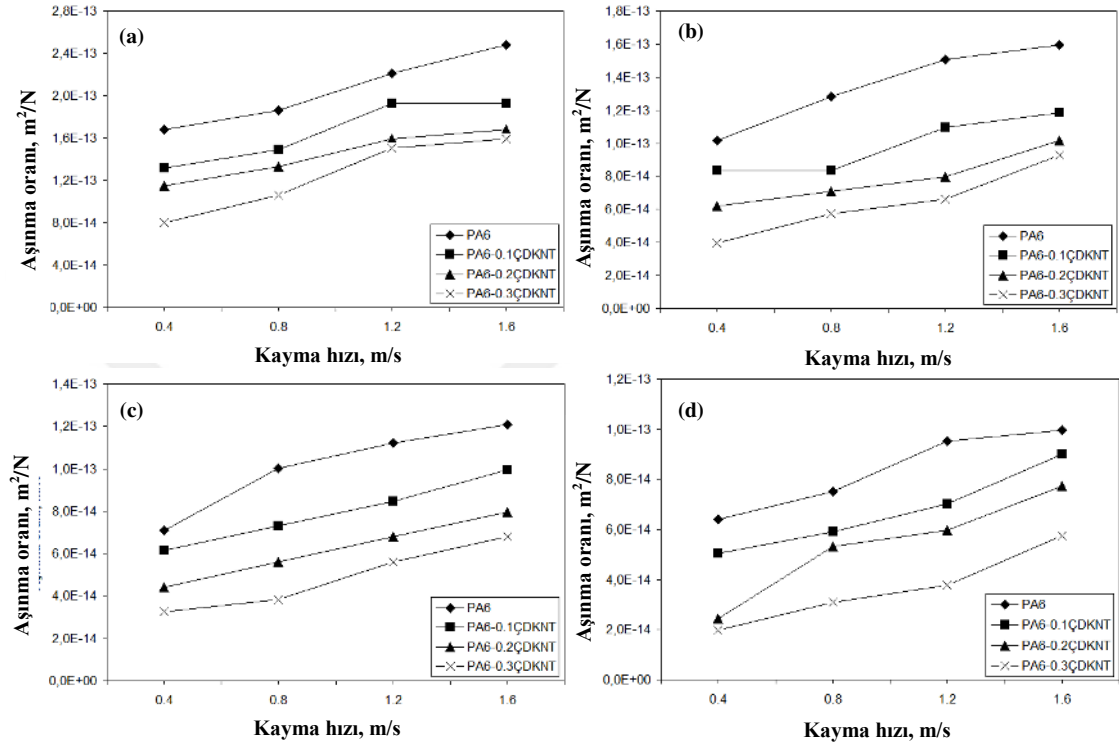
Genel olarak şekiller incelendiğinde en düşük aşınma oranı 1,6 m/s kayma hızında ve 30 N yük altında, $9,941E^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile 0,1 ÇDKNT ilaveli PA6 nanokompozitinde elde edilmiştir. En yüksek aşınma oranı ise 1,6 m/s kayma hızında, 10 N yük altında $2,477E^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ katkısız PA6 polimerinde elde edilmiştir.



Şekil 5.19. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi: a) 0,4 m/sn, b) 0,8 m/sn, c) 1,2 m/sn, d) 1,6 m/sn.

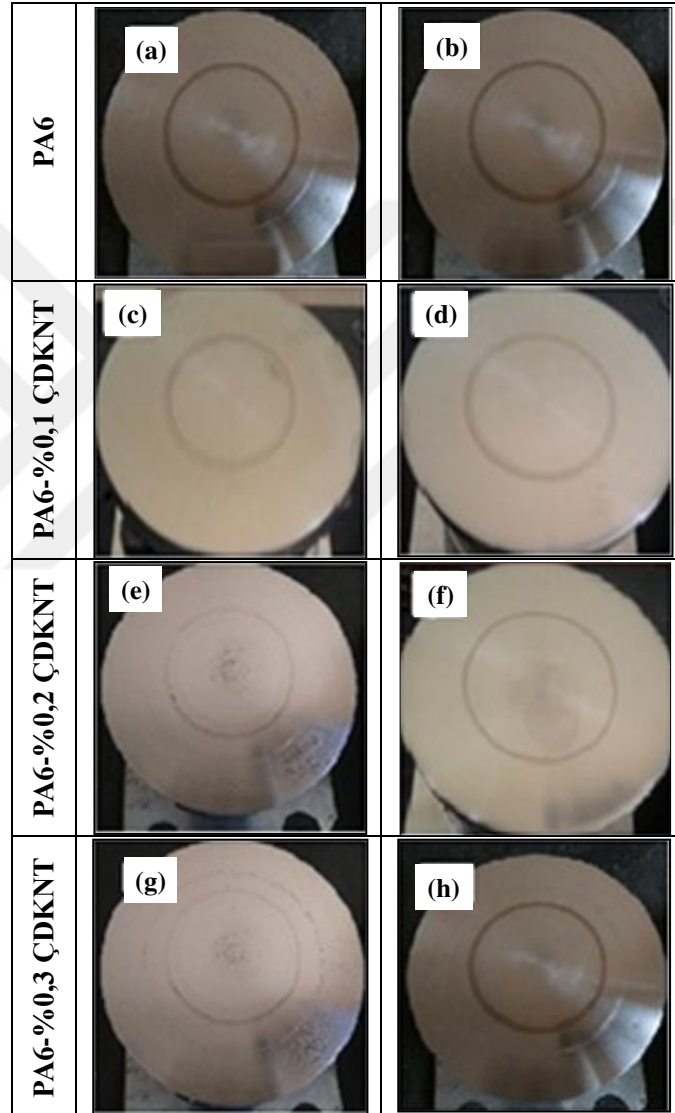
Şekil 5.20’de katkısız PA6 polimeri ile %0,1; %0,2; %0,3 ÇDKNT ilaveli PA6 nanokompozitlerinin 0,4; 0,8; 1,2 ve 1,6 m/sn kayma hızları altında aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Genel olarak şekiller incelendiğinde, kayma hızının artması ile aşınma oranı artmıştır. Katkısız PA6 polimeri için 0,4 m/s kayma hızında 10 N yük altındaki aşınma oranı, kayma hızı artırılarak 1,6 m/s’ye çıkartılmasıyla %47 artmıştır. PA6 polimerine eklenen 0,1 ÇDKNT ilavesi ile 10 N yük altında kayma hızı 0,4 m/s’den 1,2 m/s’ye çıkartıldığında ise aşınma oranı %46 artmıştır. Benzer sonuçları Xia ve arkadaşları (2004), polipropilen matris malzemesine farklı oranlarda KNT ilaveli PP nanokompozitlerinin aşınma oranlarını inceledikleri çalışmada elde etmişlerdir. Eklenen KNT katkısı ile aşınma direncinde artış olduğunu belirtmiştir.

%0,2 ve %0,3 ÇDKNT ilavesi ile 40 N yük altında kayma hızı 0,8 m/sn'den 1,6 m/s'ye çıkartıldığında aşınma oranları sırasıyla %45 ve %87 artmıştır. İncelenen literatür çalışmalarında eklenen KNT katkı miktarının artması ile aşınma direncinde artı olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.20. PA6 ve PA6 nanokompozitlerin aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi: a) 10 N, b) 20 N, c) 30 N, d) 40 N.

Şekil 5.21’de PA6 polimeri (a-b) ve PA6 nanokompozitlerine (c-h) ait karşı yüzey disk resimleri verilmiştir. Disk resimleri incelendiğinde tüm numuneler için karşı disk yüzeyinde transfer film tabakasının oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu transfer film tabakası ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranları üzerine etkisi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.21. PA6 polimeri (a-b), PA6 nanokompozitlerine (c-h) ait disk resimleri.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Katkısız PA6 polimerine farklı oranlarda eklenen %0,1; %0,2 ve %0,3 çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılarıyla oluşturulan nanokompozitlerinin mekanik, termal, karakterizasyon deneyleri ve tribolojik özelliklerinin etkileri incelenmiştir.

PA6 ve PA6'ya ilave edilen ÇDKNT katkısı ile numunelerin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla çekme testleri sonucunda;

1. PA6 polimerine ilave edilen %0,1 oranındaki ÇDKNT çekme dayanımını azaltırken artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak çekme dayanımı artmıştır.
2. PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT katkısı yapıyı gevrek hale getirmiştir. Katkısız PA6 polimerinin izod darbe dayanımı, %0,1 ÇDKNT ilave edilmesiyle %25 oranında artmıştır. %0,2 ve %0,3 ÇDKNT ilavesinde ise katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, izod darbe dayanımının değişmediği belirlenmiştir.
3. Katkısız PA6 polimerine ilave edilen %0,1 oranındaki ÇDKNT, elastiklik modülünü %12 azaltmıştır. %0,2 ve %0,3 ÇDKNT katkısı ile elastiklik modülü sırasıyla %6 ve %8 artmıştır.
4. PA6 polimerine %0,1 oranındaki ÇDKNT ilavesi ile kopma uzaması artmıştır. Ancak %0,2 ÇDKNT ve %0,3 ÇDKNT katkısı ile azalmıştır. PA6 polimerine ilave edilen ÇDKNT katkısı yüksek oranlarda yapıyı gevrek hale getirmiştir.
5. PA6 polimerine ilave edilen %0,2 ve %0,3 oranlarındaki ÇDKNT katkının hem eğilme mukavemetini hem de eğilmedeki elastiklik modülünü artırdığı belirlenmiştir.
6. Ağırlıkça %0,1 ÇDKNT takviyeli PA6 nanokompozitleri katkısız PA6'ya göre nispeten daha düşük bir bozunma sıcaklığına sahipken, ağırlıkça %0,2 ve %0,3 ÇDKNT takviyeli PA6 göre daha yüksek bozunma sıcaklığına sahiptir.
7. DSC analiz sonuçları incelendiğinde, Katkısız PA6 polimeri ve farklı oranlarda ÇDKNT katkısı ile PA6 nanokompozitlerinin ergime sıcaklıklarında belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Çok duvarlı karbon nanotüp miktarının artması ile camsı geçiş sıcaklığının arttığı, ergime entalpisinin ve % kristalliğin azaldığı gözlenmiştir.
8. TGA analizleri incelendiğinde, ağırlıkça %0,1 ÇDKNT takviyeli PA6 nanokompozitler saf PA6'ya göre nispeten daha düşük bir bozunma sıcaklığına sahipken, ağırlıkça %0,2 ve %0,3 ÇDKNT takviyeli PA6 nanokompozitlerine göre daha yüksek bozunma sıcaklığına sahiptir. Ağırlıkça %0,1 KNT takviyeli PA6 nanokompozitler %2'lik

bozunma miktarına düşebilmiş, saf PA6 matrislide dahil olmak üzere ağırlıkça %0,2 ve %0,3 ÇDKNT takviyeli PA6 nanokompozitleri %3 bozunma miktarında kalmıştır.

9. Yapılan sürtünme ve aşınma deneyleri sonuçlarına göre: 2000 m yol, 0,4-1,6 m/sn kayma hızlarında ve 10 N-40 N aralığındaki yüklerde, uygulanan yüke karşı sürtünme katsayılarındaki değişim gözlemlenmiştir. 0,4 m/s kayma hızı ve 40 N yük altında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) eklenmesi ile sürtünme katsayısı azaltmıştır. %0,3 ÇDKNT ilavesi PA6 polimerinin sürtünme katsayısını %7,23 oranında azaltmıştır.
10. Farklı yükler altında (10 N-40 N) PA6 polimeri ile ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerinin sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi değişimleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda, artan kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir. En düşük sürtünme katsayısının PA6-%0,3 ÇDKNT nanokompozitinde olduğu gözlemlenmiştir.
11. PA6 polimer ve PA6 nanokompozitlerinin farklı kayma hızlarında, uygulanan yüke karşı aşınma oranlarındaki değişimi incelenmiş, tüm malzemelerde uygulanan yükün artmasıyla, aşınma oranının azaldığı gözlenmiştir. Katkısız PA6 polimer ve PA6 nanokompozit numunelerin, farklı yüklerdeki kayma hızına bağlı olarak aşınma oranlarındaki değişim incelendiğinde ise, artan kayma hızına bağlı olarak aşınma oranları artmıştır.

6.2. Öneriler

- Çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) miktarı artırılarak mekanik, termal, tribolojik sonuçlar değerlendirilebilir.
- PA6 polimeri ile ÇDKNT arasındaki uyumu artırmak için PA6-g-SEBS gibi uyumlaştırıcı ajan kullanılabilir.
- Aşınma ve sürtünme katsayısını azaltmak için, PTFE, MoS₂ ve silikon gibi katı yağlayıcı katkıları kullanılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ajayan, P. M., Schadler, B. P., (1999), Carbon Nanotubes, Carbon Nanotubes From Macromolecules to Nanotechnology, cilt 96, s.14199-14200.

Akbulut, H., (2014), Nano Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ders Notu Slaytı, Erişim Tarihi: 9.8.2018.

Ambuken, P. V., Stretz, H. A., Koo, J. H., Messman, J. M., Wong, D., (2014), Effect of Addition of Montmorillonite and Carbon Nanotubes on a Thermoplastic Polyurethane, High Temperature Thermomechanical Properties, Polymer Degradation and Stability, cilt 102, s.160-169.

Araujo, E. M., Damiao, A. M., Paz, R. A., Medeiros, V. N., Melo, T. J. A., Lira, H. L., (2011), Polyamide 6 Nanocomposites with Inorganic Particles Modified with Three Quaternary Ammonium Salts, Journal Materials, cilt 4, s.1956-1966.

Arburg.com.tr. Erişim Tarihi: 18.08.2018.

Arı, A. G., (2009), Polimer Nanokompozitlerin Özelliklerine Değişik Nanopartiküllerin Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.4, 7-8, 11-13.

Arıcasoy, O., (2006), Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.

Artikompozit.com.tr. Erişim Tarihi: 25.12.2018

Aslan, F., (2011), Karbon Nanotüp Takviyeli Polimer Nanokompozitlerin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Aso, O., Eguiaz A. J., Nazabal, J., (2007), The Influence of Surface Modification on the Structure and Properties of a Nanosilica Filled Thermoplastic Elastomer Composites, Science and Technology, cilt 67, s.2854-2863.

Ateş, N., (2002), Makine İmalat Sanayinde Kullanılan %30 Cam Elyafıyla Kuvvetlendirilmiş PA Malzemesinin (PA6.6/GF 30) Üretim Sartlarına Bağlı Olarak Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Bağcı, İ., (2005), Epoksi Reçinesi ile Nanokompozit Sentezi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.13-15, Ankara.

Bansal, R. C., Goyal, M., (2005), Activated Carbon Adsorption, Taylor and Francis, London.

Baron, P. C., Wnag, Z., Pinnavaia, T. J., (1999), Polymer-layered Silicate Nanocomposites: An overview, Applied Clay Science, cilt 15, s.11-29.

Bilotti, E., Zhang, R., Deng, H., Quero, F., Fischer, H. R., Peijs, T., (2009), Sepiolite Needle like Clay for PA6 Nanocomposites: An alternative to Layered Silicates, Composites Science and Technology, cilt 69, s.2587-2595.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bose, S., Bhattacharyya, A. R., Khare, R. A., Kulkarni, A. R., Patro, T. U., Sivaraman, P., (2008), Tuning the Dission of Multiwall CNTs in Co-Continuous Polymer Blends, A Generic Approach, Nanotechnology, cilt 19, sayı 33, s.3304-3312.

Brian, B., Johnson, M. H., Santare, J. E., Novotny, S., Advani, G., (2009), Wear Behavior of Carbon Nanotube High Density Polyethylene Composites, Mechanics of Materials, cilt 41, s.1108-1115.

Celep, Ş., (2007), Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.109-116, 120-121, Adana.

Chae, H. G., Minus, M. L., Kumar, S., (2006), Oriented and Exfoliated Single Wall Carbon Nanotubes in Polyacrylonitrile, Polymer, cilt 47, s.3494-3498.

Chen, G. X., Kim, H. S., Park, B. H., Yoon, J. S., (2005), Controlled Functionalization of Multi walled Carbon Nanotubes with Various Molecular-Weight Poly Lactic Acid, The Journal Of Physical Chemistry, cilt 109, s.22237-22243.

Çalhan, D. S., (2015), Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler Kullanılarak Ağır Metal İyonlarının Zenginleştirilmesi, Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

Dayıoğlu, H., Canbaz, K. H., (2007), Elyaf Bilgisi, Teknik Fuarçılık, İstanbul.

Demirel, A., (2007), Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Dong, B., Wang, C., He, L., Li, L., (2006), Preparation and Tribological Properties of Poly Methylmethacrylate/Styrene/ MWNTs Copolymer Nanocomposites, Journal of Applied Polymer Science, cilt 108, s.1675-1679.

Dong, B., Wang, C., Gao, G. Y., Xu, M. W., (2008), A Study on Microhardness and Tribological Behavior of Carbon Nanotubes Reinforced MWCNTs Copolymer Nanocomposites, Materials Science and Engineering A, cilt 478, s.314-318.

Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Jorio, A., (2004), Unusual Properties and Structure of Carbon Nanotubes, Annual Reviews Material, cilt 34, s.247-278.

Durmuş, A., Kaşgöz, A., Macosko, C. W., (2006), Eriyik Harmanlama ile Hazırlanmış Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen Organokil Nanokompozitleri, Proceedings of 11 th International Materials Symposium, s.295-300, Denizli.

Ehrenstein, G. W., (2001), Polymeric Materials, Structure, Properties, applications, Hanser Gardner Publications, cilt 18, sayı 4, s.46.

Enteknomaterials.com/polimerler icin katkilar, Erişim Tarihi: 25.12.2018.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Erbay, B., (2006), Nemin %30 Cam Elyaf ile Takviye Edilmiş Poliamid 66 Malzemede Sıkıştırılabilirlik Mukavemeti Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Ersoy, H. Y., (2000), Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, s.11-15, 95-105, 110-116, İstanbul.

Ersoy, H. Y., (2001), Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları, cilt 66, s. 3-13.

Esmizadeh, E., Irani, A., Naderi, G., Ghoreishy, M. H. R., Dobious, C., (2017), Effect of Carbon Nanotube on PA6/ECO Composites. Morphology Development, Rheological and Thermal Properties, Journal of Applied Polymer Science, cilt 135, sayı 12, s.45977.

European Commision., (2007), Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers, s.139. Erişim Tarihi:21.8.2018.

Fornes, T. D., Baur, J. W., Sabba, Y., Thomas, E. L., (2006), Morphology and Properties of Melt-spun Polycarbonate Fibers Containing Single and Multi-walled Carbon Nanotubes, Polymer, cilt 47, s.1704-1714.

Gojny, F. H., Wichmann, M. G., Fiedler, B., Schulte, K., (2005), Influence of Different Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Epoxy Matrix Composites Comparative Study, Composites Science and Technology, cilt 65, sayı 15-16, s.2300-2313.

Gültekin, G., (2006), Yara Örtü Malzemesi Uygulamaları için Yağ Asidi Temelli Poliüretan Filmlerin Üretimi, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Hancer, S., (2010), Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Mekanik Özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Haris, B., (1986), Engineering Composite Materials, The Institute of Metals, cilt 25, s.1-15: 84-91, London.

Hassani, J., Mohd, I. Z. A., Mohamed, A. R., (2013), Preparation and Characterization of Polyamide 6 Nanocomposites Using MWCNTs Based on Bimetallic Co-Mo/MgO catalyst, Polymer Letters, cilt 8, s.177-186.

Hatipoğlu, G., (2014), Polifitalamid Kompozitlerin Mekanik, Termal ve Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Hone, J., (2004), Carbon nanotubes, Thermal properties, Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Materials Under Extreme Conditions, Recent Trends and Future Prospects, cilt 28, s.751-760.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hou, H., Ge, J. J., Zeng, J., Li, Q., Reneker, D. H., Greiner, A., Cheng, S. Z. D., (2005), Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers Containing a High Concentration of Well-aligned Multiwalled Carbon Nanotubes, *Chemistry Material*, cilt 17, s.967-973.

Hou, W., Tang, B., Lingling, L., Sun, J., Wang, J., Qin, C., Dai, L., (2013), Preparation and Physico-Mechanical Properties of Amine-Functionalized Graphene/Polyamide 6 Nanocomposite Fiber as a High Performance, *The Journal RSC Advances*, cilt 4, s.4848-4855.

Hu, C. Y., Xu, Y. J., Duo, S. W., Zhang, R. F., Li, M. S., Chin, J., (2009), Multifunctionality of Polymer Composites, *Journal of the Chinese Chemical Society*, cilt 56, s.234-255.

Ibrahim, S., Johan, M. R., (2012), Thermolysis and Conductivity Studies of Polyethylene Oxide (PEO) Based Polymer Electrolytes Doped with Carbon Nanotube, *International Journal of Electrochemical Science*, cilt 7, s.2596-2615.

Ishida, H., Campbell, S., Blackwell, J., (2000), General Approach Tonanocomposite Preparation, *Chemistry of Materials*, cilt 12, s.1260-1267.

Jensen, K., Mickelson, W., Kis, A., Zettl, A., (2007), Buckling and Kinking Force Measurements on Individual Multiwalled Carbon Nanotubes, *Physical Review B*, cilt 76, sayı 19, s.1954-1958.

Jin, Z. X., Pramoda, K. P., Goh, S. H., (2001), Dynamic Mechanical Behaviour of Melt Mixed Polymer Nanocomposite, *Chemical Physics Letter*, cilt 337, s.41-47.

Jurczyk, M. U., Kumar, A., Srinivasan, S., Stefanakos, E., (2007), Poly Aniline based Nanocomposite Materials for Hydrogen Storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, cilt 32, sayı 8, s.1010-1015.

Kanagaraj, S., Varanda, F. R., Zhiltsova, T. V., Oliveira, M. S. A., Simoes, J. A. O., (2007), Mechanical Properties of High Density Polyethylene/Carbon Nanotube Composites, *Composites Science and Technology*, cilt 67, s.3071-3077.

Kanapitsas, A., Tsonos, C., (2009), Study of Electrical/Dielectric and Thermomechanical Properties of Polymer-Carbon Nanotubes Nanocomposites, *Research Gate*, cilt 45, s.978-960-474-059-8.

Karadeniz, E., (2006), Poliamid/Polipropilen Karışımlarının Yapı ve Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kaştan, A., (2005), Grafit Katkılı Poliamit (PA6)'nın Aşınma Davranışlarının Deneysel İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Kaştan, A., (2015), PA6/PE/Nano-kil Kompozitlerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kaştan, A., (2016), Polimerik Malzemelerin Darbe Dayanımına Nano Katkıların Etkisi, Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, Bartın Üniversitesi, s.231-243.
- Katti, S. R., Sridhara, B. K., Krishnamurthy, L., Shekar, G. L., (2014), Mechanical Behaviour of Multi Walled Carbon nanotube Filled Polypropylene Thermoplastic Composites Centre for Nanotechnology, The National Institute of Engineering, Indian Journal of Advances in Chemical Science, cilt 2, s.6-8.
- Khanna, Y. P., Khun, W. P., (1997), Measurement of crystalline Index in Nylons by DSC Complexities and Recommendations, Journal of Polymer Science, cilt 35, s.2219-2231.
- Kim, K. S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S. Y., Kim, J. M., Kim, K. S., Ahn, J. H., Kim, P., Choi, J. Y., Hong, B. H., (2009), Large-Scale Pattern Growth of Graphene Films for Stretchable Transparent Electrodes. Nature, cilt 457, s.706-710.
- Kiselev, N. A., Zakharov, D. N., (2001), Electron Microscopy of Carbon Nanotubes, Crystallography Reports, cilt 46, sayı 4, s.577-585.
- Konovalova, O., Suchaneka, J., Taticeka, F., Puchninb, M., (2014), Tribological Analysis of the Nanomodified Industrial Polymer, Procedia Engineering, cilt 69, s.1481-1489.
- Kuchibhatla, S. V., (2007), One Dimensional Nanostructured Materials, Progress in Materials Science, cilt 52, s.699-913.
- Kumar, R. M., Sharma, S. K., Kumar, B. V. M., Lahiri, D., (2015), Effects of Carbon Nanotube Aspect Ratio on Strengthening and Tribological Behavior of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite, Journal of Polymer Science, cilt 76, s.62-72.
- Kurt, M., (2010), Pa6 Kompozitlerinin Termal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Lee, Y. S., Im, J. S., Yun, S. M., Nho, Y. C., Kang, P. H., Jin, H., (2009), X-ray Photoelectron Spectroscopic Analysis of Modified MWCNT and Dynamic Mechanical Properties of e-beam Cured Epoxy Resins with the MWCNT, Carbon Letters, cilt 10, s.314-319.
- Lee, S. M., Shin, M. W., Jang, H., (2014), Effect of Carbon-Nanotube Length on Friction and Wear of Polyamide 66 Nano composites, cilt 32, s.103-110.
- Li, J., Fang, Z., Zhu, Y., Tong, L., Gu, A., Liu, F., (2007), Isothermal Crystallization Kinetics and Melting Behavior of Multiwalled Carbon Nanotubes/polyamide-6 Composites, Journal of Applied Polymer Science, cilt 105, s.3531-3542.
- Lin, Y., Ng, K. M., Chan, C. M., Sun, G., Wu, J., (2011), High-Impact Polystyrene/Halloysite Nanocomposites Prepared By Emulsion Polymerization Using Sodium Dodecyl Sulfate As Surfactant, Journal of Colloid And Interface Science, cilt 358, s.423-429.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Liu, W., Chen, S., (2000), An Investigation of the Tribological Behaviour of Surface Modified ZnS Nanoparticles in Liquid Paraffin, *Wear*, cilt 238, s.120-124.

Liu, P. I. Y., Shen, L., Chow, S. Y., Zhang, W. D., (2004), Morphology and Mechanical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6 Composites. *Macromolecules*, cilt 19, s.7214-7222.

Liu, T., Tong, Y., Zhang, W. D., (2006), Preparation and Characterization of Carbon Nanotube/polyetherimide Nanocomposite Films, *Composites Science and Technology*, cilt 67, s.406-412.

Lizundia, E., Oleaga, A., Salazar, A., Sarasua, J. R., (2012), Nano and Microstructural Effects on Thermal Properties of Poly Lactide Multi walled Carbon Nanotube Composites, *Journals Books Polymer*, cilt 53, sayı 12, s.2412-2421.

Logakis, E., Pollatos, E., Pandis C., Peoglos, V., Zuburtikudis, I., Delides, C. G., Vatalis, A., Gjoka, M., Syskakis, E., Viras, K., Pissis, P., (2009), Structure property Relationships in Isotactic Polypropylene Multiwalled Carbon Nanotubes Nanocomposites, *Composites Science and Technology*, cilt 70, s.328-335.

Logakis, E., Pandis, C., Pissis, P., Pionteck, P., Pötschke, P., (2012), Highly Conducting Poly Methyl Methacrylate Carbon Nanotubes Composites, Investigation on Their Thermal, Dynamic-Mechanical, Electrical and Dielectric Properties, *Submitted Composites Science and Technology*, cilt, 71, s.854-862.

Loos, M. R., Pezzin, S. H., Amico, S. C., Bergman, C. P., Coelho, L. A. F., (2008), The Matrix Stiffness Role on Tensile and Thermal Properties of Carbon Nanotubes Epoxy Composites, *Journal of Materials Science*, cilt 43, s.6064-6069.

Mahmood, N., Islam, M., Hameed, A., Saeed, S., (2013), Polyamide 6/Multiwalled Carbon Nanotubes Nanocomposites with Modified Morphology and Thermal Properties, *Polymers*, cilt 5, sayı 4, s.1380-1391.

Manchado, M. A. L., Valentini, L., Biagiotti, J., Kenny, J. M., (2005), Thermal and Mechanical Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes-Polypropylene Composites Prepared by Melt Processing, *Carbon*, cilt 43, s.1499-1505.

Marini, J., Suman, B. R. E., (2017), Optical Properties of Blown Films of PA6/MMT Nanocomposites, *Materials Research*, s.53-60.

McNally, T., Pötschke, P., Halley, P., Murphy, M., Martin, D., Bell, S. E. J., Brennan, G. P., Bein, D., Lemoine, P., Quinn, J. P., (2005), Polyethylene Multiwalled Carbon Nanotube Composites, *Polymer*, cilt 46, s.8222-8232.

Meincke, O., Kaempfer, D., Weickmann, H., Friedrich, C., Vathauer, M., Warth, H., (2004), Mechanical Properties and Electrical Conductivity of Carbon Nanotube Filled Polyamide 6 and its Blends with Acrylonitrile Butadiene Styrene, *Polymer*, cilt 45, s.739-760.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Mirik, M., (2010), Karbon Nanotüp Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) Nanokompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Morgan, P., (2005), Carbon Fibers and Their Composites, Taylor-Francis Group, cilt 41, s.501-549.

Mutlu, B. H., (2008), Hint Yağı Temelli Poliüretan Hidrojel Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Nasir, M., Mohammad, I., Asad, H., Shaukat, S., Ahmad, N. K., (2013), Polyamide-6-based Composites Reinforced with Pristine or Functionalized Multi-walled Carbon Nanotubes Produced Using Melt Extrusion Technique, Journal of Composite Materials, cilt 74, s.750-780.

Nıyogı, S., Hamon, M. A., Hu, H., Zhao, B., Bhowmik, P., Sen, R., Itkis, M. E., Haddon, R. C., (2002), Chemistry of Single-Walled Carbon Nanotubes, Accounts of Chemical Research cilt 35, s.1105-1113.

Ogasawara, T., Ishida, Y., Ishikawa, T., Yokota, R., (2003), Characterization of Multi-walled Carbon Nanotube Phenylethynyl Terminated Polyimide Composites, Journal Books, cilt 35, sayı 1, s.67-74.

Öksüz, M., Yıldırım, H., (2009), Katkı ve Dolgu Maddelerinin Plastiklere Kazandırdığı Özellikler, Yazılmış Yayınlanmamış Ders Notları, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Öner, G., Ünal, H. Y., Pekbey, Y., (2017), Karbon Nanotüp Katkılı Cam lifi Epoksi Kompozitlerin Termal ve Eğilme Özelliklerinin Araştırılması, Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Örs, A., (2009), Karbon Nanotüplerin Polimerler ile Fonksiyonlaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, cilt 5, s.18-23, İstanbul.

Özsoy, N., (2015), Polimer Esaslı Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Tribolojik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

Pantani, R., Sorrentino, A., (2005), Pressure Effect on Viscosity for Atactic and Syndiotactic Polystyrene, Polymer Bulletin, cilt 54, s.365-376.

Plastikyasamlarbyolut.blogspot.com.tr Erişim Tarihi: 22.06.2018.

Ren, X., Chen, C., Nagatsu, M., Wang, X., (2011), Carbon Nanotubes as Adsorbents in Environmental Pollution Management A review, Chemical Engineering Journal, cilt 170, s.395-410.

Rivlin, J., (1992), The Dyeing of Textile Fibres Theory and Practice, Philadelphia, cilt 25, s.170-175.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Saçak, M., (2002), Polimer Kimyası, Gazi Kitabevi, s.85-89, 221-224, 275-297, 393-397 Ankara.

Safadi, B., Andrews, R., Grulke, E. A., (2002), Multiwalled Carbon Nanotube Polymer Composites Synthesis and Characterization of Thin Films, Journal of Applied Polymer Science, cilt 84, s.2660-2663.

Sagar, S., Iqbal, N., Magsood, A., Bassyouni, M., (2014), MWCNTS Incorporated Natural Rubber Composites. Thermal Insulation, Phase Transition and Mechanical Properties. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, cilt 6, s.3-5.

Sahoo, N. G., Cheng, H. K. F., Cai, J., Li, L., Chan, S. H., Zhao, J. Y., (2009), Improvement of Mechanical and Thermal Properties of Carbon Nanotube Composites Through Nanotube Functionalization and Processing Methods, Materials Chemistry and Physics, cilt 117, s.313-320.

Saylan, T., (2010), Poliamit 6 Kompozitlerin Termal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Seunghun, H., Myung, S., (2007), Nanotube Electronics, A Flexible Approach to Mobility, Nature Nanotechnology, cilt 2, s.207-208.

Shepherd J. E., McDowell D. L., Jacob K. I., (2006), Modeling Morphology Evolution and Mechanical Behavior During Thermo-Mechanical Processing of Semi-crystalline Polymers, Journal of Mechanics and Physics Solids, cilt 54, s.467-489.

Shi, K., Ye, L., Li, G., (2015), Structure and Hydrothermal Stability of Highly Oriented Polyamide 6 Produced by Solid hot Stretching. Journal on the Science, cilt 5, s. 30160-30169.

Shim, Y. S., Park, S. J., (2010), Influence of Glycidyl Methacrylate Grafted Multiwalled Carbon Nanotubes on Viscoelastic Behaviors of Polypropylene Nanocomposites, Carbon Letters, cilt 11, bölüm 4, s.311-315.

Sirong, Y., Zhongzhen, Y., Wing, M. Y., (2007), Effects of SEBS-g-MA on Tribological Behaviour of Nylon 66 Prganoclay Nanocomposites. Tribology International, cilt 40, s.855-862.

Sorrentino, A., Vertuccio, L., Vittoria V., (2010), Influence of Multi-walled Carbon Nanotubes on the β form Crystallization of Syndiotactic Polystyrene at Low Temperature. Polymer Letters cilt 4, s.339-345.

Suresha, B. N., Kumar, R., Venkataramareddy, M., Jayaraju, T., (2010), Role of Micro Nano Fillers on Mechanical and Tribological Properties of Polyamide 66 Polypropylene Composites, Materials Design, cilt 31, s.1993-2000.

Szymczyk, A., Roslaniec, Z., Zenker, C., Senderek, E., Funari S., (2011), Crystalization Behaviour of Poly Trimethylene Terephthalate SWNT Nanocomposites, Express Polymer Letters, cilt 5, s.977.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Şahin, Y., (2000), Kompozit Malzemeler Giriş, Gazi Kitabevi, s.13-17, 25-32, 65-68, 327, Ankara.

Şahin, Y., (2006), Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayıncılık, s.27-32, Ankara.

Şengür, R., (2013), Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Katkılı (Pes) İçi Boşluklu Ultrafiltrasyon Membran Üretimi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Tang, W., Santare, M. H., Advani, S. G., (2003), Melt Processing and Mechanical Property Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotube High Density Polyethylene (MWNT/HDPE) Composite Films, Carbon, cilt 41, s.2779-2785.

Taşdemir, M., (2007), Mühendislik Plastikleri, Metal öğretmenliği, Ders Notları, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Terrones, M., (2003), Science and Technology of the Twenty-First Century, Synthesis, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes, Annual Review Materials Research, cilt 33, s.419-501.

Tong, X., Liu, C., Cheng, H. M., Zhao, H., Yang, F., Zhang, X., (2004), Surface Modification of Single-walled Carbon Nanotubes with Polyethylene Via in Situ Ziegler-Natta polymerization, Journal of Applied Polymer Science, cilt 92, s.3697.

Turhan, M., (2007), Karbon nanotüplerin Mekanik Özelliklerine Elyaf Hacim Oranlarının Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Türedi, H. E., (2015), Epoksi/ÇDKNT ve Epoksi/BN Kompozit malzemeler , Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Ünal, H., Yetgin, S. H., (2010), ÇYMAPE ve PA6 Mühendislik Polimerlerinin Aşınma ve Sürtünme Davranışlarının İncelenmesi, TUBAV Bilim Dergisi, cilt 3, sayı 2, s.145-152.

Ünal, H., Mimaroglu, A., (2012), Friction and Wear Performance of Polyamide 6 and Graphite and Wax Polyamide 6 Composites Under Dry Sliding Conditions, Wear, cilt 289, s.132-137.

Ünal, H., (2018), PA6/PTFE Karışımlarının Tribolojik Performanslarının İncelenmesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Technological Applied Sciences, cilt 13, Sayı 2, ss.89 – 97.

Vahedi, F., Shahverdi, H. R., Shokrieh, M., Esmkhani, M., (2014), Effects of Carbon Nanotube Content on the Mechanical and Electrical Properties of Epoxy-Based Composites, Iran University of Science and Technology, New Carbon Materials, cilt 29, sayı 6, s.419-425.

Valcarcel, M., Cardenas, S., Simonet, B. M., (2007), Role of Carbon Nanotubes in Analytical Science Analytica, Chemistry, cilt 79, s.4788-4797.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Valentino, O., Sarno, M., Rainone, N. G., Nobile, M. R., Ciambelli, P., Neitzert, H. C., Simon, G. P., (2008), Influence of the Polymer Structure and Nanotube Concentration on the Conductivity and Rheological Properties of Polyethylene/CNT Composites, *Physica E*, cilt 40, s.2440-2445.

Vatalis, A. S., Kanapitsas, A., Delides, C. G., Pissis, P., (2001), Relaxation Phenomena and Morphology in Polymer Blends Based on Polyurethanes Investigated by Various Techniques, *Thermochim Acta*, cilt 372, sayı 1-2, s.33-38.

Velasco, C., Martinez, A. L., Fisher, F. T., Ruoff, R., Castano, V. M., (2003), Improvement of Thermal and Mechanical Properties of Carbon Nanotube Composites Through Chemical Functionalization, *Chemistry of Materials*, cilt 15, s.4470-4472.

Venkata, R. G., Balaji, P., Naresh, K. R., Prabhakar, K. V. P., Jain, P. K., (2010), Mechanical Properties of Multi-walled Carbon Nanotubes Reinforced Polymer Nanocomposites, *Indian Journal of Engineering Materials Sciences*, cilt 17, s.331-337.

Wang, M., Pramoda, K. P., Goh, S. H., (2006), Enhancement of Interfacial Adhesion and Dynamic Mechanical Properties of Poly Methyl Methacrylate Multiwalled Carbon Nanotube Composites with Amine Terminated Poly Ethylene Oxide, *Carbon*, cilt 44, s.613.

Wei, Z., Zhao, Y. P., Ruan, S. L., Gao, P., Yu, T. X., (2006), A Study of the Tribological Behavior of Carbon Nanotube Reinforced Ultra High molecule Weight Polyethylene Composites, *Surface and Interface Analysis*, cilt 38, s.883-886.

Xia, H., Wang, Q., Qiu, G., (2003), Polymer-encapsulated Carbon Nanotubes Prepared Through Ultrasonically Initiated in situ Emulsion Polymerization, *Chemistry of Materials*, cilt 15, s.3879.

Xia, H., Wang, Q., Li, K. H., (2004), Preparation of Polypropylene Carbon Nanotube Composite Powder with a solid-state Mechanochemical Pulverization Process, *Journal of Applied Polymer Science*, cilt 93, s.378-386.

Xiao, K. Q., Zhang, L. C., Zarudi, I., (2007), Mechanical and Rheological Properties of Carbon Nanotube-Reinforced Polyethylene Composites, *Composites Science and Technology*, cilt 67, s.177.

Xiong, J., Zheng, Z., Qin, X., Li, M., Li, H., Wang, X., (2006), The Thermal and Mechanical Properties of a Polyurethane Multiwalled Carbon Nanotube Composite, *Carbon*, cilt 44, s.2701-2703.

Xu, Y., Van, H. S., (2008), Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Clay Nano Composites, *Composites Science and Technology*, cilt 68, s.854-861.

Xu Q., Xiaohong, L., Fangfei, C., Zhijun Z., (2014), Improving the Mechanical Properties of Polyamide 6-Nanosilica Nanocomposites by Combining Masterbatch Technique with in situ Polymerization, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, cilt 25, sayı 7, s.1218-1225.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Xue, Y., Wu, W., Jacobs, O., Schadel, B., (2006), Tribological Behaviour of UHMWPE/HDPE Blends Reinforced with Multi-Wall Carbon Nanotubes, *Polymer Testing*, cilt 25, s.221-229.

Yağlıkcı, S., (2012), Karbon Nanotüp Üretiminde Katalizörün Gaz Fazlı Derişim Profiline Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Yang, M., Gao, Y., Li, H., Adronov, A., (2007), Functionalization of Multiwalled Carbon Nanotubes with Polyamide 6 by Anionic Ring-Opening Polymerization, *Carbon*, cilt 45, s.232.

Yang, Z., Dong, B., Huang, Y., Liu, L., Yan, F. Y., Li, H. L., (2005), A Study on Carbon Nanotubes Reinforced Poly Methyl Methacrylate Nanocomposites, *Materials Letters*, cilt 59, s.2128-2132.

Yılmazbayhan, A., (2006), Maleik Anhidritle Graftlanmış Oligomerlerin ve İPP/Silikat Nanokompozitlerin Tepkimeli Ekstrüzyon Yöntemiyle Sentezi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

You, Y. L., Du, X. L., Gao, S., Deng, X., (2014), Investigation of the Influence of Solid Lubricants on the Tribological Properties of Polyamide 6 Nanocomposite, *Wear*, cilt 311, s.57-64.

Yu, A., Hu, H., Bekyarova, E., Itkis, M., Gao, J., Zhao, B., Haddon, R. C., (2006), Incorporation of Highly Dispersed Single-walled Carbon Nanotubes in a Polyimide Matrix, *Composites Science and Technology*, cilt 66, s.1190-1197.

Zhang, F., Zhou, L., Xiong, Y., Liu, G., Xu, W., (2009), Isothermal Crystallization Kinetics of High-flow Nylon 6 by Differential Scanning Calorimetry, *Journal of Applied Polymer Science*, cilt 111, s.2930-2937.

Zhang, M., Lu, S., Xu, E., He, M., Yu, J., (2014), A new Method for Preparation of Low Melting Point Polyamide-6 and Properties of Compatibilized Blends of PA6/Glass Beads/Styrene and Maleic Anhydride Copolymer, *Science and Engineering of Composite Materials*, cilt 22, s.72-80.

Zhang, W. D., Shen, L., Phang, I. Y., Liu, T., (2003), Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6 Composite Prepared by Simple Melt-Compounding, *Macromolecules*, cilt 37, s.256-259.

Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., Jeelani, S., (2008), Fabrication and Characterization of Carbon Epoxy Composites Mixed with Multi-walled Carbon Nanotubes, *Materials Science Engineering A*, cilt 475, s.157-165.

Zhu, B. K., Xie, S. H., Xu, Z. K., Xu, Y. Y., (2006), Preparation and Properties of the Polyimide Multi-walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) Nanocomposites, *Composites Science and Technology*, cilt 66, s.548-554.

Zou, Y., Feng, Y., Wang, L., Liu, X., (2004), Processing and Properties of MWCNT/HDPE Composites, *Carbon*, cilt 42, s.271-277.

EKLER

Ek-1. Uygulanan yük ve kayma hızına bağlı olarak poliamit 6 (PA6) ve çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı PA6 nanokompozitlerinin sürtünme katsayısı değerleri

Malzeme	Yük, N	Kayma hızı, m/s			
		0,4	0,8	1,2	1,6
		Sürtünme katsayısı, μ			
PA6	10	0,3242	0,3481	0,3731	0,3936
	20	0,3631	0,4018	0,4247	0,4854
	30	0,5025	0,5311	0,5566	0,6166
	40	0,5589	0,5949	0,6133	0,7026
PA6-%0,1 ÇDKNT	10	0,2932	0,3151	0,3405	0,3592
	20	0,3158	0,3536	0,377	0,4585
	30	0,3653	0,4345	0,4682	0,5181
	40	0,4174	0,4851	0,5073	0,5681
PA6-%0,2 ÇDKNT	10	0,2644	0,2893	0,3279	0,3402
	20	0,2864	0,3238	0,3461	0,4291
	30	0,3102	0,3525	0,3979	0,4491
	40	0,3582	0,4241	0,4415	0,5314
PA6-%0,3 ÇDKNT	10	0,2231	0,2632	0,2783	0,3033
	20	0,2554	0,2926	0,3282	0,3691
	30	0,2832	0,3361	0,3666	0,4194
	40	0,3242	0,3566	0,3967	0,4452

Ek-2. Uygulanan yük ve kayma hızına bağlı olarak poliamit 6 (PA6) ve çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkı PA6 nanokompozitlerinin aşınma oranı değerleri

Malzeme	Yük, N	Kayma hızı, m/s			
		0,4	0,8	1,2	1,6
		Spesifik aşınma oranları m ² /N			
PA6	10	1,681E ⁻¹³	1,858E ⁻¹³	2,212E ⁻¹³	2,477E ⁻¹³
	20	1,017E ⁻¹³	1,283E ⁻¹³	1,504E ⁻¹³	1,592E ⁻¹³
	30	7,079E ⁻¹⁴	1,002E ⁻¹³	1,120E ⁻¹³	1,209E ⁻¹³
	40	6,415E ⁻¹⁴	7,522E ⁻¹⁴	9,513E ⁻¹⁴	9,955E ⁻¹³
PA6-%0,1 ÇDKNT	10	1,315E ⁻¹³	1,491E ⁻¹³	1,929E ⁻¹³	1,929E ⁻¹³
	20	8,333E ⁻¹⁴	8,333E ⁻¹⁴	1,096E ⁻¹³	1,184E ⁻¹³
	30	6,140E ⁻¹⁴	7,309E ⁻¹⁴	8,479E ⁻¹⁴	9,941E ⁻¹⁴
	40	5,043E ⁻¹⁴	5,921E ⁻¹⁴	7,017E ⁻¹⁴	8,991E ⁻¹⁴
PA6-%0,2 ÇDKNT	10	1,150E ⁻¹³	1,327E ⁻¹³	1,592E ⁻¹³	1,681E ⁻¹³
	20	6,194E ⁻¹⁴	7,079E ⁻¹⁴	7,964E ⁻¹⁴	1,017E ⁻¹³
	30	4,424E ⁻¹⁴	5,604E ⁻¹⁴	6,784E ⁻¹⁴	7,964E ⁻¹⁴
	40	2,433E ⁻¹⁴	5,309E ⁻¹⁴	5,973E ⁻¹⁴	7,743E ⁻¹⁴
PA6-%0,3 ÇDKNT	10	7,964E ⁻¹⁴	1,061E ⁻¹³	1,504E ⁻¹³	1,592E ⁻¹³
	20	3,982E ⁻¹⁴	5,752E ⁻¹⁴	6,637E ⁻¹⁴	9,292E ⁻¹⁴
	30	3,244E ⁻¹⁴	3,834E ⁻¹⁴	5,604E ⁻¹⁴	6,784E ⁻¹⁴
	40	1,991E ⁻¹⁴	3,097E ⁻¹⁴	3,761E ⁻¹⁴	5,752E ⁻¹⁴

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı ve Adı : KUŞ, Gözde
Doğum Tarihi ve Yeri : 06.05.1988-Simav/Kütahya
E-mail : gozde__kus88@hotmail.com

Eğitim Durumu

Yüksek lisans : DPÜ Fen Bilimleri Enst. İleri Tek. Makine devam ediyor
Lisans : KBÜ Karabük T.E.F. Tasarım ve Konstrüksiyon Öğrt., 2014
Lise : Simav A.M.L. Bilgisayar, 2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-....	Kazancıoğlu Otomotiv	Teknik Ressam

Yabancı Dil : İngilizce

