

ÇOK DUVARLI KARBON NANO TUP, MOLİBDEN DİSÜLFİT VE SİLİKON KATKILI
KARBON ELYAF/POLİAMİT 66 KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bilal ÖZSARIKAYA

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

Ocak - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Bilal ÖZSARIKAYA tarafından hazırlanan “Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp, Molibden Disülfid ve Silikon Katkılı Karbon Elyaf/Poliamit 66 Kompozitlerinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması, aşağıda belirtilen jüri tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek Oy Birliği ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

23/01/2020

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

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


Dr. Öğr. Üyesi Salih Hakan YETGİN
Danışman, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı


Sınav Komitesi Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Salih Hakan YETGİN
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ahmet ATASOY
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa GÜLEŞEN
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı











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 Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 14 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Dr. Öğr. Üyesi Salih Hakan YETGİN



Bilal ÖZSARIKAYA



ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP, MOLİBDEN DİSÜLFİT VE SİLİKON KATKILI KARBON ELYAF/POLİAMİT 66 KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bilal ÖZSARIKAYA

İleri Teknolojiler, Yüksek Lisans Tezi, 2020

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Salih Hakan YETGİN

ÖZET

Bu çalışmada, %10 karbon elyaf katkılı PA66 (PA66/10KE), %20 karbon elyaf katkılı PA66 (PA66/20KE), %30 karbon elyaf katkılı PA66 (PA66/30KE), %0,5 çok duvarlı karbon nanotüp katkılı PA66/30KE (PA66/30KE/0,5ÇDKNT), %0,5 çok duvarlı karbon nanotüp+%3 molibden disülfid katkılı PA66/30KE (PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂) ve %0,5 çok duvarlı karbon nanotüp+%3 silikon katkılı PA66/30KE (PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon) kompozitleri ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemleri ile üretilmiştir.

Katkıların, matris malzemesinin tribolojik, mekanik ve termal özelliklerine olan etkilerini araştırmak için; elde edilen kompozitlere, mekanik testler, termal analizler ve tribolojik deneyler uygulanmıştır. Kompozitlere uygulanan tribolojik deneyler, pim-on-disk cihazında gerçekleştirilen aşınma ve sürtünme deneyleridir. Deneyler kuru ortam şartlarında yapılmıştır. Deneyler oda sıcaklığına (23°C); yük olarak 20N, 30N ve 40N ve 0,4m/s; 0,8m/s ve 1,2m/s kayma hızlarında, 1000 metre kayma yolunda yapılmıştır. Deneyler sonucunda, polimer ve kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışlarına uygulanan yükün etkisi, hızın etkisi ve katkıların etkileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, PA66 polimeri ilave edilen karbon elyaf, çok duvarlı karbon nanotüp ve silikon katkıları, çekme ve eğme mukavemeti, elastiklik ve eğme modülü değerlerini artırırken kopma uzaması değerlerini azaltmıştır. Tüm numuneler için artan yük ve kayma hızı ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmıştır. PA66 polimerine ilave edilen MoS₂ katkısı sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azalmasında en etkili katkı olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp, Karbon Elyaf, Mekanik Özellikler, Molibden Disülfid, Poliamit 66, Silikon, Tribolojik Özellikler

**INVESTIGATION OF MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF
MULTI-WALL CARBON NANOTUBE, MOLYBDENUM DISULFIDE AND SILICONE
FILLED CARBON FIBER/POLYAMIDE 66 POLYMER COMPOSITES**

Bilal ÖZSARIKAYA

Advanced Technologies, M. S. Thesis, 2020

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

SUMMARY

In this study, 10% carbon fiber filled PA66 (PA66/10CF), 20% carbon fiber filled PA66 (PA66/20CF), 30% carbon fiber filled PA66 (PA66/30CF), 0,5% multi-walled carbon nanotube filled PA66/30CF (PA66/30CF/0,5MWCNT), 0,5% multi-walled carbon nanotube+3% molybdenum disulfide filled PA66/30CF (PA66/30CF/0,5MWCNT/3MoS₂) and 0,5% multi walled carbon nanotube+3% silicone filled PA66/30CF (PA66/30CF/0,5MWCNT/3Silicon) composites are produced by extrusion and injection molding methods.

In this thesis, dry sliding wear characteristics of polyamide 66 and its composites were investigated using a pin-on-disc wear test machine. Wear tests were carried out at the sliding speeds of 0,4m/s; 0,8m/s and 1,2m/s applied loads of 20N, 30N and 40N and under atmospheric conditions of temperature and humidity. At the end of the experiments, effects of load, speed and fillers on the friction and wear behaviour of pure polyamide 66 and its composites were analyzed.

As a result of the studies, carbon fiber, multi-walled carbon nanotube and silicone added to the PA66 polymer increased the tensile and flexural strength, elasticity and flexural modulus while decreased the elongation at breaks. For all materials, it was observed that, the coefficient of friction and wear rate increases linearly with the increase in applied load and sliding speed values. MoS₂ filler has been identified as the most effective filler to the reduction of friction coefficient and wear rate.

Keywords: Carbon Fiber, Mechanical Properties, Molybdenum Disulphide, Multi Walled Carbon Nanotube, Polyamide 66, Silicone, Tribological Properties.

TEŞEKKÜR

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

PA66 kompozitlerin üretiminde makine, laboratuvar ve teçhizat imkânı sağlayan Gama Alfa Plastik İnovasyon San. ve Tic. A.Ş. firmasına ve bu firmadan Deniz TAŞKIN Bey'e teşekkür ederim. HDT ve Vicat testlerini için yardımlarını esirgemeyen, Eurotech firmasından Semra DEMİR Hanıma teşekkür ederim. Ayrıca İstanbul Cerrahpaşa Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Ali DURMUŞ Bey'e DMA, DSC ve TGA testleri ve termogramlarının hazırlanmasındaki desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans programına katılmam ve bu çalışmanın hazırlanmasına kadar geçen tüm evrelerde maddi ve manevi olarak desteklerini hiç esirgemeyen, bünyesinde çalışma hayatımın onaltıncı yılını tamamladığım İhlas Holding A.Ş. firmasının değerli Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Ahmet Mücahid ÖREN Beyefendi'ye ve çalışma arkadaşlarına teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince manevi desteğini esirgemeyen ve yoğun mesailerim müddetince kendilerine vakit ayırmakta güçlük çektiğim halde, ailemin tüm yükünü üzerine alarak desteğini her an yanımda hissettiğim kıymetli eşim, hayat arkadaşım Nihal ÖZSARIKAYA Hanımefendi'ye ve çocuklarıma teşekkür ederim. Ayrıca, ömrüm boyunca benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim kıymetli annem ve babama sonsuz teşekkür eder, bu çalışmayı onlara ithaf ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	9
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	10
3.1.1. Matris malzemeye göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması	11
3.1.2. Takviye malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması	14
3.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	17
3.2.1. Polimer matrisli kompozit malzemelerin açık kalıplama üretim yöntemleri .	17
3.2.2. Polimer matrisli kompozit malzemelerin kapalı kalıplama üretim yöntemleri	18
3.3. Poliamit 66	20
3.4. Karbon Elyaf	25
3.4.1. PAN temelli karbon elyaf üretimi	25
3.4.2. Rayon esaslı karbon elyaflar	29
3.4.3. Zift temelli karbon elyaf	30
3.4.4. Karbon elyafın özellikleri ve kullanım alanları	32
3.5. Karbon Nanotüpler (KNT)	34
3.5.1. Karbon nanotüp çeşitleri	36
3.5.2. Karbon nanotüplerin yapısal özellikleri ve kimyasal davranışları	38
3.5.3. Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri	38
3.5.4. Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri	39
3.5.5. Karbon nanotüplerin ısısal özellikleri	39
3.5.6. Karbon nanotüplerin uygulama alanları	39

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.6. Molibden Disülfid	39
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler.....	41
4.2. Ekstrüzyon Prosesi	41
4.3. Enjeksiyon Prosesi	43
4.4. Yoğunluk Testi.....	44
4.5. Çekme Deneyi.....	45
4.6. Eğme Deneyi.....	47
4.7. Darbe Deneyi	47
4.8. Yük Altında Eğilme Sıcaklığı Testi (HDT).....	48
4.9. Vicat Yumuşama Sıcaklığı Testi.....	49
4.10. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi	50
4.11. Termal Gravimetrik Analizi (TGA)	51
4.12. Dinamik Mekanik Analizi (DMA).....	52
4.13. Aşınma - Sürtünme testleri	53
4.14. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi	55
5. DENEY SONUÇLARI	57
5.1. Yoğunluk Testi Sonuçları.....	57
5.2. Mekanik Test Sonuçları.....	57
5.3. Termal Test Sonuçları	65
5.4. Termo-Mekanik Test Sonuçları	71
5.5. Aşınma Testi Sonuçları	74

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
6.1. Sonuçlar.....	91
6.2. Öneriler.....	94
KAYNAKLAR DİZİNİ	95
ÖZGEÇMİŞ	



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Kompozit malzeme yapısı	9
3.2. Kompozit malzemelerin takviye edici malzemeye göre sınıflandırılması	14
3.3. PA66'nın kondenzasyon tepkimesi	21
3.4. PAN esaslı karbon elyaf üretim proses adımları	26
3.5. Stabilizasyon esnasındaki renk değişimi görseli	27
3.6. PAN liflerin oksidasyonu	27
3.7. Karbon liflerin karbonizasyonu	28
3.8. Karbon elyafın yüzey işleme prosesi	29
3.9. Grafit tabakası	34
3.10. (a) Tek duvarlı karbon nanotüp, (b) çok duvarlı karbon nanotüp	35
3.11. (a) Koltuk, (b) zikzak ve (c) kiral nanotüplerin şematik gösterimi	35
3.12. Molibden disülfid tabakası görseli	40
4.1. PA66 kompozit numunelerin üretildiği ekstrüder cihazı	41
4.2. Enjeksiyon makinesi	43
4.3. Çekme ve darbe test çubuklarının üretildiği plastik enjeksiyon kalıbı	43
4.4. Çekme ve darbe test çubuklarının görseli	44
4.5. Yoğunluk ölçüm cihazı	45
4.6. Çekme deneyi numune ölçüleri	45
4.7. Çekme deneyi cihazı	46
4.8. Eğme deneyi cihazı	47
4.9. Çentik açma cihazı	47
4.10. Darbe deneyi cihazı	48
4.11. Yük altında eğilme cihazı (HDT)	49
4.12. Vicat yumuşama sıcaklığı tayini şematik gösterimi	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.13. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test cihazı.	51
4.14. Termal gravimetrik analizi (TGA) test cihazı.	52
4.15. Dinamik mekanik analizi (DMA) test cihazı.	53
4.16. Pim-disk aşınma cihazı.	55
4.17. Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı.	55
4.18. Altın kaplama cihazı.	56
5.1. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin çekme mukavemeti-uzama grafiği	58
5.2. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin çekme mukavemeti grafiği.	59
5.3. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin elastiklik modülü grafiği.	61
5.4. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin kopma uzaması grafiği.	62
5.5. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin eğme mukavemeti grafiği.	63
5.6. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerin eğmedeki elastiklik modülü grafiği..	64
5.7. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerin çentikli darbe mukavemeti grafiği.	65
5.8. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin HDT grafiği.	66
5.9. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin Vicat yumuşaklık grafiği.	67
5.10. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerinin ergime sıcaklığı termogramı.	68
5.11. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin kristallenme sıcaklığı termogramı.	68
5.12. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerin kütle kaybı değerleri grafiği.	71
5.13. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin Tan Delta (Tan δ) sonuçları.	72
5.14. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin depolama modülü (E') sonuçları.	73
5.15. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin kayıp modülü (E'') sonuçları.	74
5.16. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin sürtünme katsayısı–yük ilişkisi grafiği, a) 0,4 m/s, b) 0,8 m/s, c) 1,2 m/s.	78
5.17. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin sürtünme katsayısı (μ)–kayma hızı (m/s) ilişkisi grafiği, a) 20 N, b) 30 N, c) 40 N.	77

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.18. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin malzemeye bağlı olarak sürtünme katsayılarındaki değişim grafiği (kayma hızı: 0,8 m/s ve yük:30 N)	81
5.19. PA66 polimeri ve %10-20-30 oranlarında KE katkısı ilaveli PA66 kompozit numunelerinin sürtünme katsayısı - kayma mesafesi ilişkisi..... (kayma hızı: 0,8 m/s, yük: 30 N).....	80
5.20. PA66/30KE kompoziti ve ÇDKNT, MoS ₂ ve silikon katkılı PA66/30KE kompozit numunelerinin sürtünme katsayısı - kayma mesafesi ilişkisi	80
(kayma hızı: 0,8 m/s ve yük: 30 N).....	
5.21. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin aşınma oranı–yük ilişkisi grafiği, a) 0,4 m/s, b) 0,8 m/s, c) 1,2 m/s.	81
5.22. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin aşınma oranı (mm ³ /Nm) – kayma hızı (m/s) ilişkisi grafiği, a) 20 N, b) 30 N, c) 40 N.	82
5.23. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin malzemeye bağlı olarak aşınma oranındaki değişim grafiği (kayma hızı: 0,8m/s ve yük: 30 N)	84
5.24. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin aşınma deneyi disk incelemeleri (kayma hızı: 0,4 m/s ve yük: 40 N).....	85
5.25. PA66 polimeri ve KE katkılı PA66 kompozitlerinin aşınmış pim ve disk yüzeyi elektron mikroskopu mikroyapı görüntüleri (kayma hızı:0,4 m/s ve yük: 40 N).....	87
5.26. ÇDKNT, MoS ₂ ve silikon katkılı PA66/30KE kompozitlerin aşınmış pim ve disk yüzeyi elektron mikroskopu mikroyapı görüntüleri	88
(kayma hızı: 0,4 m/s ve yük: 40 N).....	
5.27. PA66 polimeri ve KE katkılı PA66 kompozitlerinin SEM görüntüleri.....	89
5.28. ÇDKNT, MoS ₂ ve silikon katkılı PA66/30KE kompozitlerinin SEM görüntüleri	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Kompozit yapıların sınıflandırılması.....	11
3.2. Cam elyaf üretimindeki cam çeşitleri ve (% ağırlıkça) bileşimleri	15
3.3. PA66 polimerinin mekanik özellikleri.....	23
3.4. PA66 polimerinin tribolojik özellikleri.....	23
3.5. PA66 polimerinin elektriksel ve termal özellikleri.....	24
3.6. PAN temelli karbon elyafların özellikleri.....	29
3.7. Zift esaslı karbon elyafların özellikleri.....	32
3.8. Tek duvarlı karbon nanotüp özellikleri.....	37
3.9. Çok duvarlı karbon nanotüp özellikleri	37
4.1. Ekstrüzyon makinesi parametreleri.	42
4.2. Polimer malzeme türleri ve kısaltmaları.	42
4.3. Enjeksiyon kalıplama parametreleri.	44
4.4. Aşınma-sürtünme deneyi parametreleri.....	54
5.1. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin yoğunluk sonuçları.	57
5.2. PA66 ve PA66 kompozitlerin kristallenme ve ergime sıcaklığı sonuçları.....	70
5.3. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerinin bozunma başlangıç, %50 bozunma ve bozunma sonu sıcaklık değerleri çizelgesi.	71

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

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Tan δ	Tan Delta
TPa	Tera Pascal
Tg	Camsı Geçiş Sıcaklığı
Tm	Ergime Sıcaklığı
Xc	Kristallik
Δl	Numunedeki Uzama Miktarı
ϵ	Birim Şekil Değişirme Oranı
σ	Gerilme
$\sigma\epsilon$	Çekme Mukavemeti
μ	Sürtünme Katsayısı
Ω	Ohm
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM	American Society for Testing and Materials
AYPE	Alçak Yoğunluklu Polietilen
CE	Cam Elyaf
COOH	Karboksilik Asit
ÇDKNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
DIN	Deutsches Institut Für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
KKF	Kısa Karbon Elyaf (Short Carbon Fiber)
KNT	Karbon Nanotüp

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MoS ₂	Molibden Disülfid
NC	Nanokil
PA6	Poliamit 6
PA11	Poliamit 11
PA66	Poliamit 66
PAN	Poliakrilonitril
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEEK	Polieter Eterketon
PI	Poliimit
PMMA	Polimetil Metakrilat
PP	Polipropilen
PPS	Poli-Fenilen-Sülfid
PS	Polistren
PTFE	Politetrafloretillen (Teflon)
SEBS	Stiren-Etilen-Bütillen-Stiren
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
SiO ₂	Silisyum Dioksit
TDKNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TGA	Termal Gravimetrik Analizi
TiO ₂	Titanyum Dioksit
TS	Türk Standartları
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

1. GİRİŞ

İnsanoğlu, mevcut yaşamlarını daha kolay ve konforlu bir halde devam ettirebilmek için, yüzyıllar boyunca kullandıkları malzemeleri geliştirme ve değiştirme üzerine bir hayat sürmüşlerdir. Genel olarak insanlar, varoluşundan itibaren başlayan yaşamı süresince ilk olarak taş, kemik, ağaç parçaları ve yer altından buldukları madeni metaller gibi doğal malzemeleri kullanmışlardır. Bu süreç zaman içerisinde gelişme kaydederek 1800' lü yıllarda kauçuk, lastik ve reçine gibi malzemeler üretilmiş ve gelişimini o günden itibaren devam ettirmiştir. 1862 yılında, Alexander Parkes tarafından bulunan ve aynı sene içerisinde Uluslararası Büyük Londra Fuar' ında sergilenen ilk plastik (polimer) malzeme günümüz polimer dünyasının yolunu açmıştır. İlerleyen seneler süresince çok çeşitli plastik malzemeler üretilerek insanlığın kullanımına sunulmuştur (Hatipoğlu, 2014).

Polimer malzemelerin, atmosferik etkilere karşı dayanıklılığı, kolay işlenebilir, düşük maliyetli olmaları gibi avantajları sayesinde kullanım alanları artmaktadır. Polimerler bu avantajlı yönleri sebebiyle, beyaz eşya, spor ekipmanları, taşımacılık ve inşaat sektörleri, sağlık ve ambalaj sektörlerinde tercih edilmektedirler (Hazer, 2018; Plastik, 2018).

Polimerik malzemelerin birçok gelişmiş özelliğinin olmasına karşın, sertlik ve dayanıklılık gibi mekanik kabiliyetlerinin düşük olması, polimerlerin daha da geliştirilmesi ve güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına gerek olduğunu göstermektedir (Arıcasoy, 2006; Demirel, 2007; Özsoy, 2015).

Bu nedenle polimerlerin özellikle mekanik, termal ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi için kopolimerizasyon ve takviyelendirme işlemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Kopolimerizasyon işlemiyle, polimer zinciri içerisinde tekrarlanan monomere dayanıklılık kazandıracak farklı bir monomer ile polimerizasyona uğratılarak gelişmiş özelliklerde bambaşka bir polimer üretilir. Takviyelendirme işleminde ise, matris içerisine, kendisinden daha dayanıklı malzemelerin ilavesi ile performansı daha yüksek polimer kompozit malzemeler üretilmektedir. Kompozit malzeme kullanımı 1950' li yıllarda başlamıştır. Kompozitler, mukavemeti yüksek, boyutsal ve termal kararlılığa sahip, sertliği yüksek, aşınma direnci geliştirilmiş özellikleri sayesinde bu ihtiyacı karşılayabileceğini kanıtlamış ve bu alandaki çalışmaların hızlanmasına yön vermiştir. Aynı zamanda kompozit malzemelerin yoğunluğunun metal malzemelere göre daha düşük olması, üretimi gerçekleştirilen ve ağırlığın büyük bir etken olduğu uzay ve otomotiv sanayilerinde kullanımının artmasında büyük bir etken olmuştur (Arıcasoy, 2006; Demirel, 2007; Kurt, 2010; Saylan, 2010; Özsoy, 2015).

Polimerlerin ve polimer esaslı kompozit malzemelerin başka bir avantajı ise, enjeksiyonla kalıplama, ekstrüzyon, ısı ile şekillendirme, döner kalıplama gibi çeşitli imalat yöntemleri ile kolayca üretilebilmeleridir (Özdemir, 2001; Kurt, 2010).

Polimer kompozitlerin üretiminde kullanılan en önemli elyaf türü karbon elyafıdır. 1960'lı yıllardan itibaren kullanılmaya başlanan karbon elyafların, yoğunluğunun düşük olmasına rağmen çekme mukavemetleri, çekme modülleri diğer elyaflardan yüksek olması belirgin bir avantajıdır (Arıcasoy, 2006; Demirel, 2007).

Bu çalışmada, PA66 polimeri ile, %10-20 ve 30 oranlarına sahip karbon elyaf (KE), %0,5 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT), %3 oranlarında molibden disülfid (MoS_2) ve silikon katkılı PA66 polimer kompozitleri, ekstrüzyon prosesi ile granül şeklinde üretilip, enjeksiyon kalıplama prosesi sonucunda deney numuneleri üretilmiştir. Üretim sonucunda elde edilen deney numunelerine mekanik, termal ve tribolojik testler uygulanarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, PA66 polimeri ve KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı kompozit malzemelerin; mekanik, termal ve tribolojik deney sonuçlarının incelenmiş olduğu çalışmalar belirtilmiştir.

Chen vd., (2007), karbon elyaf (KE) takviyeli poliamit 66 (PA66)/ polifenilensülfid (PPS) kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, 70PA66/30PPS karışımı içerisine, %5-25-30 ve 35 oranlarında KE ilave etmişlerdir. KE takviyesinin, PA66/PPS karışımının mekanik özelliklerini önemli oranda artırdığını, sürtünme katsayısını ise azalttığı belirtilmiştir. %30 karbon fiber içeriğinin altında aşınma direncinin kötüleştiği belirtilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı %30 karbon fiber içeriğinde elde edilmiştir.

Suresha vd., (2010), PA66 ve polipropilen (PP) (50PA66/50PP) karışımı içerisine %2,5 ve %5 oranlarında grafit (Gr), %2-3 oranlarında nanokil (NC) ve %10 oranında kısa karbon elyaf (KKE) takviyeleri ile elde ettikleri kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Tüm kompozitleri, çift vidalı bir ekstruder ve ardından enjeksiyonla kalıplama yöntemi kullanarak imal etmişlerdir. Çalışmalarında KKE katkısının, karışımın sırası ile çekme mukavemeti %92,5; eğme mukavemeti %60 ve elastiklik modülünü %51 oranlarında artırdığını, ayrıca darbe mukavemetini de %55,3 oranında azalttığını tespit etmişlerdir. Bu mekanik iyileşmeleri kısa karbon liflerinin karışım içerisinde iyi bir şekilde dağılmasından kaynaklandığını ve fiziksel olarak da polimerin artan ağ yoğunluğu şeklinde açıklamışlardır. Ayrıca KKE katkısı ile karışımın aşınma direncinin de önemli oranda iyileştiğini belirtmişlerdir. Mikro ve nano-katkıların aşınma oranını azalttığı, artan kayma hızı ile ağırlık kayıplarının arttığı belirtilmiştir. Yükün artması ile hem sürtünme katsayısının hem de aşınma oranının arttığı belirtilmiştir. PA66/PP kompozitlerin aşınma direncinin karşı disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakasından etkilendiği belirtilmiştir.

Liang vd., (2014), ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemleri ile elde ettikleri PA6/KE kompozit deney numunelerini mekanik ve tribolojik olarak incelemişlerdir. PA6 polimerine ilave edilen farklı oranlardaki KE katkısı çekme dayanımını ve elastiklik modülünü artırmıştır. %20 KE içeriğinde çekme dayanımının %50, elastiklik modülünün ise %60 oranlarında arttığı belirtilmiştir. Elyafların, kompozitin dayanımının artmasında önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Karbon elyafların, PA6 polimerinden daha yüksek dayanıma sahip olmasının bu artışta etkili olduğunu belirtmişlerdir. Elyaf ve matris arasındaki iyi bağlanmanın yük uygulandığında gerilim transferini artırdığını belirtmişlerdir.

Rezaei vd., (2007), tarafından yapılan çalışmada, PP polimeri içerisine ilave ettikleri kısa karbon elyafli kompozitlerin çekme mukavemeti ve sertlik özellikleri ile darbe mukavemetlerini, kompozit içerisindeki elyaf ağırlık oranı ve ortalama elyaf uzunluklarını da dikkate alarak incelenmişlerdir. Çentiksiz kompozit numuneler kullanarak darbe mukavemeti deneylerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, artan karbon elyaf miktarıyla kompozitlerin dayanım özelliklerinin, sertliklerinin ve izod darbe mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Zhou vd., (2013), çift vidalı ekstrüderde elde ettikleri granüllerle enjeksiyon kalıplama yöntemi ile %5-10-15 oranlarında KE katkılı PA6/PPS kompozit deney numuneleri üretmişlerdir. Elde edilen numuneler ile mekanik ve tribolojik testler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda artan karbon elyaf miktarına bağlı olarak çekme dayanımı, çekme modülü, eğme dayanımı, eğme modülü, sertlik değerleri artarken kopma uzaması ve darbe dayanımı azalmıştır. Karbon elyaf miktarı arttıkça sürtünme katsayısı azalırken aşınma oranı artış göstermiştir. Aynı zamanda, yükün artması ile sürtünme katsayısı artmıştır. Kayma hızının artması ile sürtünme katsayısı azalırken aşınma oranı artmıştır.

Raajeshkrishna vd., (2019), kısa basalt elyaf (%2,5 ve %5) takviyeli PA6 ve PP kompozitlerinin mekanik ve tribolojik olarak incelemiştir. Çalışmada, basalt ilavesi ile çekme dayanımı, çekme modülü, eğme dayanımı, eğme modülü ve izod darbe dayanımı artmıştır. PA6 ve PP karışımındaki farklı oranlarda basalt malzemesi sürtünme katsayısını azaltmıştır. Ayrıca, artan yük ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı azalmıştır.

Autay vd., (2019), kısa cam elyaf (%10-20 ve 30) katkılı PA66 polimerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, cam elyaf oranının artması ile çekme dayanımı, eğme dayanımı ve elastiklik modülü artarken kopma uzaması azalmıştır. Artan cam elyaf miktarı ile sürtünme katsayısı azalırken aşınma oranı artmıştır. Ayrıca, uygulanan yükün artmasıyla aşınma oranının arttığı belirlenmiştir.

Fu vd., (2001) yaptıkları çalışmalarında, ekstrüzyon ve enjeksiyonla kalıplama tekniklerini kullanarak elde ettikleri kısa cam ve karbon elyaf katkılı polipropilen kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, kompozitler içerisindeki hacimce karbon elyaf miktarı arttıkça, çekme dayanımı ve modülünün arttığı ancak kopma uzaması değerinin azaldığı belirtilmiştir. Karbon elyaf ilave edilen kompozitlerin kopma uzaması değerlerinin, hibrit cam elyaf ilaveli kompozitlerin kopma uzaması değerlerinden daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Rezaei vd., (2008), yaptıkları çalışmada, ekstrüzer yöntemi ile ürettikleri granülleri sıcak kalıplama yöntemleriyle PP polimerine ilave ettikleri kısa karbon elyaf katkılı kompozit numuneler hazırlamışlardır. Kompozit deney numunelerinin mekanik özelliklerini ve termal gravimetrik analiz (TGA) yardımıyla ısıl kararlılıklarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, kompozitlerin mekanik özelliklerini çelik araba kaportasının mekanik özellikleriyle karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda %10 kısa karbon elyaf takviyeli PP kompozitlerin çelikle karşılaştırılabilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Rezaei vd., (2009), yaptıkları bir diğer çalışmada ise, karbon elyaf ilaveli PP kompozitlerin, TGA deneyi sonucunda ısıl kararlılığını ve termomekanik özelliklerini ortalama elyaf uzunluğunu dikkate alarak incelemişlerdir. Kompozit numunelerin sönümlenme özelliklerini incelenmek için dinamik mekanik analiz (DMA) kullanılmışlardır. Çalışmalarının sonucunda elyaf uzunluğundaki artışın kompozitlerin ısıl kararlılıklarını arttırdığını ve sönümlenme özelliklerini geliştirdiğini belirtmişlerdir.

Tewari vd., (1992), karbon elyaf katkının abrasif aşınma direncini kötüleştirdiği, kopma uzamasını azalttığı ve çekme dayanımını arttırdığı belirtilmiştir.

Liang vd., (2014), karbon elyaf ilaveli PA6 matris malzemeli kompozitler için mekanik, termal, kristallenme deneylerini gözlemlemişlerdir. Karbon elyaf ilave edilmesi ile çekme modülü ve dayanımı artarken kopma uzaması azalmıştır. DMA sonuçlarına göre karbon elyaf ilavesi ile kompozitin depolama modülü artmıştır. Karbon elyafın çekirdekleyici ajan gibi davranarak α -formunda kristal yapının oluşmasına katkı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, karbon elyaf miktarı ile termal kararlılığın arttığı belirtilmiştir.

Choi vd., (2014), çok duvarlı karbon nano tüp (ÇDKNT) katkılı PA66 polimerini çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretmişlerdir. ÇDKNT katkının, mekanik ve termal özelliklere etkisini incelemişler. %1 oranında ÇDKNT katkılı PA66/ ÇDKNT-Pyrenebutyric Chloride (PBC) kompozitin çekme mukavemetinin, katkısız PA66 polimerine göre %46 oranında arttığını belirtmişlerdir. Bu artışın sebebini, ÇDKNT'lerin PA66-PBC polimeri ile yüksek arayüzey yapışması oluşturması olarak belirtmişlerdir.

Kuş (Kuş, 2019) yaptığı çalışmada, PA6 matrisi içerisine ilave ettiği %0,1; %0,2 ayrıca %0,3 oranlarında ÇDKNT katkılı kompozit numuneleri çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretmiştir. Çalışmada, numuneleri mekanik ve tribolojik olarak incelemiştir. % 0,3 oranlarındaki ÇDKNT katkısının PA6 polimerinin çekme dayanımını %5,79; çekmedeki elastiklik modülünü %7,8; eğme mukavemetini %16; eğmedeki elastiklik modülünü

%16; kopma mukavemetini %35 artırdığını, kopma uzamasını ise %988 oranında azalttığını belirtmiştir. Ayrıca PA6' de 43,2 °C gözlemediği camsı geçiş sıcaklığının ÇDKNT oranının artması ile yükseldiğini bu yükselişin ise sırası ile 48,4; 59,9 ve 60,2 °C olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında tribolojik olarak incelendiğinde ÇDKNT oranının artışı ile sürtünme ve aşınma katsayılarının azaldığını belirtmiştir.

Zhang vd., (2004), enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürettikleri %1 oranında ÇDKNT katkılı poliamit 6 (PA6) polimerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. ÇDKNT katkılı kompozitin, PA6 polimerine nazaran mekanik özelliklerinin önemli oranda geliştiğini belirtmişlerdir. Çalışmaları sonucunda çekme mukavemetinin %124 oranında arttığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda elastiklik modülünün PA6 polimerine göre %115 oranında arttığını belirtmişlerdir.

Basavaraj vd., (2013), çalışmalarında enjeksiyon kalıplama yöntemi ile, %1 oranında karbon siyahı (KS) ve %0,5-1-2 ve 3 oranlarındaki MoS₂ katkılı PA66 polimerlerini mekanik, termal ve tribolojik olarak incelemişlerdir. MoS₂ katkısının, kompozitin çekme ve darbe mukavemeti, kopma uzaması ve elastiklik modülünü önemli oranda arttırdığını tespit etmişlerdir. PA66/1KS/3MoS₂ kompozitinin, katkısız PA66 polimerine göre çekme mukavemetini %20, darbe mukavemetini %16, kopma uzamasını %118,5 ve elastiklik modülünü değerinin %11,4 oranlarında geliştiğini belirtmişlerdir. MoS₂ katkısının PA66 polimerinin termal kararlılığını arttırdığını belirtmişlerdir. Aşınma deneylerinde ise MoS₂ katkısının artışı ile, katkısız PA66 polimerinin aşınma direncinin arttığını belirtmişlerdir.

Xing vd., (2009), cam elyaf, %2,5 politetrafloraetilen (PTFE) ve %2,5 MoS₂ katkılı PA66 kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, cam elyaf, PTFE ve MoS₂ katkılarının mekanik, sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir. %30 cam elyaf içeriğinde, PTFE katkının, MoS₂ katkıya göre sürtünme ve aşınma özellikleri üzerinde daha etkili olduğu belirtilmiştir. Kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı ilk önce artmış daha sonrasında kararlı hale gelmiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybı artmıştır.

Li ve Xia, (2010), PA6 matrisli KE kompozitlerin kuru ortam şartları altındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, karbon elyaf katkının hem sürtünme katsayısını hem de aşınma oranını azalttığı belirtilmiştir. Yük ve hızdaki artışlar ile aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Optimum aşınma azalımı %20 karbon elyaf içeriğinde elde edilmiştir.

Rudresh ve Kumar, (2018), PA66 (%80)/politetrafloraetilen (PTFE) (%20) karışımına ilave ettikleri farklı oranlardaki (%5-10-20 ve 30) cam elyaf katkının aşınma ve sürtünme davranışlarına etkilerini incelemiştir. PA66/PTFE karışımına ilave edilen cam elyaf aşınma oranını azaltmıştır. Artan kayma hızı ve artan yük neticesinde aşınma oranı azalmış ayrıca sürtünme katsayı değeri artmıştır.

Chang vd., (2006), karbon elyaf, grafit ve nano-titanyum dioksit (TiO₂) katkılarının PA66 polimerinin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azalttığını belirtmişlerdir.

Xu vd., (2010), farklı oranlarda aramit elyaf (%5-10 ve 15) katkılı PA1010 polimerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, aramit elyaf eklenmesi ile sürtünme katsayısı azalırken aşınma direnci artmıştır. Ayrıca uygulanan kayma hızı ve yük değerleri ile sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Optimum tribolojik özellikler açısından %5 ve %15 aramit elyaf tercih edilirken, aşınma direnci için %15 aramit elyaf içeriğinin en iyi malzeme grubu olduğu belirtilmiştir.

Tang vd., (2012), yüzey modifiyeli karbon elyaf katkılı PA66 polimerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, artan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı azalırken, aşınma miktarı artmıştır. Yüzey modifikasyonu, aşınmayı ve sürtünme katsayısını değerinin azalmasına sebep olmuştur.

Lee vd., (2014), farklı uzunluklara sahip karbon nanotüp (KNT) katkılı PA66 polimerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. 110°C'nin altında yapılan testlerde, KNT ilave edilmesiyle sürtünme katsayısı azalma eğiliminde iken KNT uzunluğunun artması ile sürtünme katsayısının arttığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, 110°C'nin üstünde yapılan testlerde, KNT ilave edilmesiyle ve artan KNT uzunluğuna bağlı olarak sürtünme katsayısının arttığı belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada, artan kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısının ve yüzey sıcaklığının arttığı belirtilmiştir.

Cai ve Wang, (2012), karbon elyaf katkılı PA66 polimerinin kuru ve yağlı ortam şartlarında tribolojik özelliklerini çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, uygulanan basıncın artması ile hem katkısız hem de karbon elyaf katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmıştır. Kayma hızının artması ile sürtünme katsayısı azalırken aşınma oranı artmıştır.

Kumar ve Kanagaraj, (2016), grafit katkılı PA6 polimerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. %20 grafit katkılı PA6 kompozitinin en iyi mekanik özellikleri gösterdiği belirtilmiştir. 5, 10, 20 ve 30N yük ile 1000, 1500 ve 2000 devir/dakika hızlarında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda %20 grafit katkılı kompozitin en iyi tribolojik

özellikleri gösterdiği belirtilmiştir. Uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı azalmıştır.

Gbadeyan vd., (2017), farklı oranlarda karbon nanotüp ve karbon elyaf katkılı epoksi kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Aşınma testleri pim-disk sistemi kullanılarak kuru ortam şartları altında gerçekleştirilmiştir. Karbon elyaf ve çok duvarlı karbon nanotüp katkılı kompozitlerin tribolojik özellikleri geliştirdiği belirtilmiştir. Kayma mesafesinin artması ile sürtünme katsayısının ve aşınma oranının arttığı belirtilmiştir.

Brian vd., (2009), çalışmasında YYPE matris polimerine ilave ettiği KNT' li kompozitlerde oluşan aşınmayı incelediğinde, KNT miktarı arttıkça aşınma değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Liu ve Chen, (2000), matrise ilave edilmiş nanoparçacıkların, pim ile disk arasında film tabakası oluşturması sonucunda kompozitlerin aşınmaya karşı dirençlerinin arttığını bildirmiştir.

Xia vd., (2004), polipropilene ilave olunan KNT' li kompozitlerin aşınma dirençlerinde artış tespit etmişlerdir.

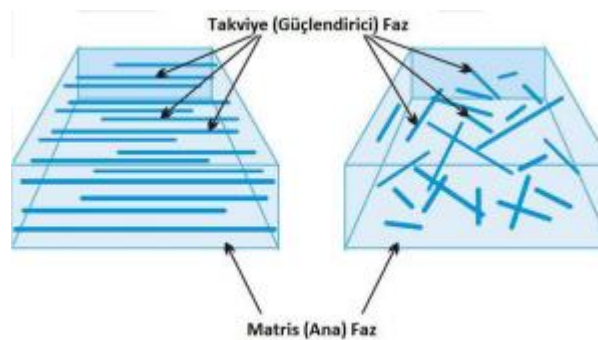
Sirong vd., (2014), PA66 polimerine oranları farklı şekilde nano katkı ayrıca SEBS-g-MA ilaveli nanokompozitleri tribolojik olarak gözlemişlerdir. Çalışmada, eklenen nano katkılı kompozitlerde kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısının arttığını belirtmişlerdir.

Horovistiz vd., (2018), %30 oranında cam elyaf (CE) ve MoS₂ katkılı PA66 kompozitlerinin farklı kayma hızlarındaki (0,48; 1,00 ve 1,50 m/s) aşınmaya karşı gösterdiği davranışları gözlemişlerdir. Çalışmada, artan kayma hızı ile birlikte aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Artan hıza bağlı olarak, PA66/30CE kompozitin sürtünme katsayısı azalırken, PA66/MoS₂ kompozitin sürtünme katsayısı 1,0 m/s hızda artarken 1,5 m/s hızda azalmıştır.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

1800'lü yıllarda bulunan ve üretimi başlanan kauçuk, lastik ve reçine gibi malzemelerden sonra 1862 yılında Alexander Parkes tarafından bulunan ilk plastik (polimer) malzeme, sentetik ürün üretimine başlangıç olarak literatürlere geçmiştir. 1930'ların sonunda polimer esaslı malzemeler diğer doğal malzemelerle yarışır düzeye gelmeye başlamıştır. Yüksek korozyon direnci, kolay şekillendirilebilme, yoğunluğunun metallere nazaran daha düşük olması gibi birçok üstün özellikleri olmasına karşın sertlik, aşınma ve mukavemet gibi özelliklerinin istenilen düzeyde olmaması polimer esaslı malzemelerin güçlendirilmesi gerektiği hususunda bilim insanları hemfikir olmuşlardır. Polimerlerin bu zaaflarını azaltmak için 1950'li yıllarda polimerik matrisli kompozit malzeme üretimi çalışmaları başlamıştır (Mazumdar, 2002; Hatipoğlu, 2014).

Kompozit malzemeler, birbirlerine karışmayan, en az iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilerek elde edilen yepyeni bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Matris faz ayrıca güçlendirici yani takviye faz olarak nitelendirilen en az iki ayrı fazdan meydana gelmektedirler. Birbirleri içerisinde çözünmeyen, başka bir deyişle kimyasal olarak herhangi bir reaksiyon göstermeyen bu fazların birleşimi kompozit malzemeyi oluştururlar. Kompozit yapı oluşturulurken bileşenler genellikle özelliklerini korurlar. Kompozit malzeme, özellikleri bakımından kendini meydana getiren tüm maddelerin özelliklerinden çok daha üstün bir yapıya sahiptirler (Rosato, 1997; Yurttas ve Afşar, 2000; Chung, 2010; Yin ve Zhao, 2016; Artikompozit, 2019). Şekil 3.1.'de örnek bir kompozit yapı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kompozit malzeme yapısı (Karadurmuş, 2017).

Üretim teknolojinin ilerlemesi ve gündelik ihtiyaçların her geçen gün farklılaşması, malzeme üreticilerini ve araştırmacıları yeni kompozit malzemeler için çalışmaya yöneltmiştir. Bu ihtiyaçlar ve arayışlar ile kompozit malzemelerde istenilen özellikler şu şekilde sıralanabilir.

- Korozyona karşı dirençli olması,
- Kırılmaya karşı tokluk,
- Termal dayanıklılık,
- Mekanik dayanım (çekme, eğilme, basma, basınç, çarpma dayanımı),
- Isı iletkenliği,
- Yorulmaya karşı dayanım,
- Aşınma direnci,
- Elektriksel iletkenlik,
- Yüksek rijitlik,
- Ağırlığının az olması,
- Maliyetinin ucuz olması,
- Akustik iletkenlik,
- Estetik ve şık görünüm gibi özellikler şeklinde sıralanabilir (Ersoy, 2001 ; Kaya, 2015).

İstenilen özellikleri elde etmek bazı gereksinimler gerektirmektedir. Bu gereksinimler için başlıca; birbirine uyumlu matris ve takviye malzeme çifti ve elde edilecek kompozitin üretim tekniği önem arz etmektedir. İstenilen optimum mukavemet değerleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretimi yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür. Uyumlu matris ve takviye elemanı seçimi, elde edilecek kompozitin mekanik, fiziksel ayrıca diğer özelliklerin elde edilmesinde çok büyük bir etmendir (Şahin, 2006).

Yükü taşıyacak olana takviye elemanına matrisin bu yükü iletebilmesi gerekmektedir. Bu da ancak matrisin takviye malzemesi ile kuvvetli bir ara yüz bağı oluşturması ile elde edilebilmektedir. Bu bağ kuvveti bileşenlerdeki uyuma ayrıca matris malzemesinin özelliğine bağlıdır. Bunlara ilave olarak, homojen dağılımlı bir kompozit olmasıda gerekmektedir (Şahin, 2006).

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler yapılarında pek çok malzeme türü barındırdığı için sınıflandırılmaları da çok farklı şekillerde yapılmıştır. Literatürlerde geçen en yaygın sınıflandırma biçimi, matris ve takviye malzemesine göre iki gruptan oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin matris (ana) fazını oluşturan malzemeler polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli olmak üzere üç ana gruptan oluşmaktadır. Bir başka sınıflandırma şeklide Çizelge 3.1.'de belirtildiği gibidir.

Çizelge 3.1. Kompozit yapıların sınıflandırılması (Şahin, 2000).

Matris alzemeler	Takviye lemanları	Kompozit Yapımın ekli
Polimer Matrisli	Kil-Kristal	Tabakalar
	Lifler	Filament Sarılmış Yapılar
Metal Matrisli	Yonga	Kaplamalar
Seramik Matrisli	Granül	Fil-Folye
	Pudra	Bal Peteği

3.1.1. Matris malzemeye göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin üretimi, kullanım amacına ve üretim tekniğine göre metal, seramik ve polimer matrisli olmak üzere sınıflandırılmışlardır.

Metal matrisli kompozitler; bu kompozit türü için matris malzemesi olarak çeşitli metaller veya metal alaşımlı malzemeler kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitler için genellikle hafif metaller tercih edilmektedir. Metal esaslı malzemeler takviye edildikleri malzemelere göre üstün özelliklere sahiptir. Metal matrisli kompozitlerde, matris malzemesi olarak; magnezyum, nikel, kobalt, çinko, bakır, titanyum, alüminyum gibi hafif metaller veya bu malzemelerin alaşımları kullanılmaktadır. Korozyon direncinin yüksek olmasının istendiği alanlarda saf alüminyum, birim kütle başına yüksek dayanımın arandığı alanlarda ise alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Kompozitin takviye malzemesi olarak ise genellikle; boron, karbon ve diğer bazı metal elyaf kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitler sıcak presleme ve difüzyon kaynağı veya liflerle veya taneciklerle eritme vakum emdirme şeklinde ileri teknoloji ile takviyelendirilerek elde edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı, yüksek akma dayanımı ve yüksek modüle sahip olmaları polimer matrislere göre üstün yönleridir (Saçak, 2005; Turhan, 2007; Kaya, 2016).

Seramik matrisli kompozitler; bu kompozit yapı türünde seramik malzemeler olarak adlandırılan $Li_2O_2-Al_2O_3-SiO_2$, SiO_2 ve $BaO-SiO_2-Al_2O_3-Si_3N_4$ gibi malzemeler matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak genellikle, seramik (Al_2S_3 , Si_3N_4 , SiC) veya plaka, metal parça, elyaf (lif) veya kristal malzemeler kullanılmaktadır. Seramik malzemeler yüksek sıcaklığa dayanıklı, yüksek kimyasal dayanım, aşınma dayanımı, sertlik ayrıca hafiflikleri sebebi ile kullanışlıdır. Serttirler, ayrıca kırılgen yapıda olmaları neticesinde süneklikleri düşük ayrıca toklukları azdır. Termal şok dayanımları iyi değildir. Bu sebepler göz

önüne alınca seramik malzeme yerine elyaflarla takviye edilmiş seramik kompozitler tercih edilirler. Seramik esaslı kompozit malzemeler, çalışma sıcaklıkları bakımından çok yüksek değerlerde çalışabilmeleri yanında çok yüksek elastiklik modülüne de sahiptirler. Seramik kompozitlerin bu avantajlarına karşın rijit ama gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi yalıtkan özelliği gösterirler. Seramik matrisli kompozitler, sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar ve uzay araçlarının imalatında kullanılırlar (Yurttaş ve Afşar, 2000; Saçak, 2005; Turhan, 2007; Seydibeyoğlu, 2012).

Polimer matrisli kompozitler; matris malzemesi olarak en sık kullanılan kompozitler polimer matrisli kompozitlerdir. Polimerler, kompozitler içerisinde en fazla uygulama çeşitliliği bulunan gruptur. Teminin kolaylığı, ucuzluğu, hafifliği ve basitçe üretilibilmeleri polimer malzemeleri metal malzeme, ayrıca seramik malzemeye göre üstün kılmaktadır. Polimer matrisli kompozit türünde matris malzemesi olarak yaklaşık %90 gibi büyük bir oranda polimer (petrokimya) esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Çoğunlukla takviye malzemesi olarak ise, elyaf formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilmeleri ile kompozit malzemeleri oluştururlar. Polimerik kompozitlerde, takviye malzemeleri kompozite mukavemet ve rijitlik sağlarken, matris malzemesi korozyon dayanımını arttırmak, gelen yükün dağıtılması ve yapının bütünlüğü sağlamak görevlerini üstlenmektedir. Polimer esaslı kompozitler, korozyon dayanımları yüksek, kullanım sürelerinin uzun oluşu, işlenebilirliği ve şekillendirilebilmesi kolay, yük taşıma kapasiteleri birim kütlede yüksektir. Polimer kompozitlerin üretimi, metal kompozitlere ve seramik esaslı kompozitlere göre daha kolaydır. Sebebi ise, bu kompozitlerin üretimlerindeki sıcaklığın düşük olmasıdır (Chung, 1994; Ersoy, 2000; Vasiliev ve Morozov, 2001).

Polimer matrisli kompozitler, termoset ve termoplastik matrisli kompozitler olmak üzere ikiye ayrılır. Polimer matrisli kompozit sektörünün başladığı yıllarda polimer matris malzemesi olarak sadece doymamış polyesterler kullanılırdı. Sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda başka termoset polimerlerde kullanılmaya başlanmıştır. İlerleyen yıllarda ise, malzemelerin geri dönüştürülebilme özelliği sayesinde kompozit üretiminde termoplastik polimerler kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de hala termoplastik matrisli kompozitlerin ilerleyişi termosetlerden daha hızlı gelişim göstermektedir.

Termoset matrisli kompozitler; lif takviyeli kompozit yapımında daha fazla kullanılırlar. Termoset polimerlerden oluşan ve üç boyutlu ağ yapısına sahip olan termoset matrisli kompozitler, sıvı halde bulunurlar ve katılaştırıcı ilavesi ile önce jel haline gelir, sonra da katılaşır. Termoset reçineler izotropiktirler. Termoset matrisli kompozitler, sahip oldukları ağ yapısının özelliklerine ve moleküller arası bağlara göre fiziksel ve mekanik özellikleri

şekillenirler. Lif ilaveli kompozit imalinde viskozitelerinin düşük olması tercih edilir. (Itoh vd., 2002). Termoset matrisli kompozitlerin matris malzemesi epoksi, fonalik, polyester gibi sıvı reçinelerden oluşan organik malzemelerdir. Sıvı olan reçine, takviye fazını ıslatır daha sonra sertleştirici katılarak pişme reaksiyonunun tamamlanması sonrası son şeklini elde ederler. Bu kompozitler geri dönüştürülemezler. Buna karşın ısıl dayanımları ayrıca mukavemet değerleri yüksektir (Hollaway, 1994; Shalin, 1995; Saçak, 2002a). İlk polimer matrisli kompozitler, termoset polimerlerle üretilmiştir. Yüksek performans göstermesi beklenen ve matris malzemesi termoset malzeme olan kompozitlerin polimerizasyon işlemi esnasında oluşabilecek çekme ve soğuma sürecine istenmeyen hataların oluşumuna sebebiyet verebilecek iç gerilmelere dikkat edilmesi gerekmektedir (Şahin, 2006).

Termoplastik matrisli kompozitler; matris malzemesi olarak kullanılan termoplastikler oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Polimer zincirleri arasındaki bağ yapıları zayıftır. Termoplastikler amorf veya yarı kristalin yapıda olabilirler. Amorf yapıdaki termoplastiklerin molekülleri karmaşık bir yapıda ve yüksek yoğunluğa sahiptirler. Kristalin yapıdaki termoplastiklerin molekülleri ise, sıkıca paketlenmiş ve kısmi düzenli bir yapıdadır. Termoplastikler genellikle sünektirler. Isıtılarak eritilebilir ve tekrar soğutma ile katılaştırılırlar. Bu da onlara herhangi bir hasara maruz kalmadan tekrardan şekil verdirilebilme kabiliyeti sağlar (Maraşlıoğlu, 1986; Kaya, 2016).

Plastik malzemelerin tamamı göz önüne alındığında, termoplastikler %80 gibi büyük bir orana sahiptirler. Bu oranın yaklaşık %68,3'ünde PP ve PA grubu oluşturmaktadır. Bu ikisinin haricinde, polieter sülfon, polieter eterketon, hibrid formda polietilen ve polibutilen tereftalat kullanımı da dikkat çekmektedir. Termoplastik malzemelerin geri dönüştürülebilir olması ve günümüzde dönüştürülebilen malzemelerin tercih edilmesi termoplastik matrisli kompozitlerin gün geçtikçe daha da yaygınlaşmasını sağlamaktadır.

Polimer matrisli kompozitler sınıfında matris malzemesi termoplastik malzeme kullanmanın bazı avantajları aşağıda belirtilmiştir.

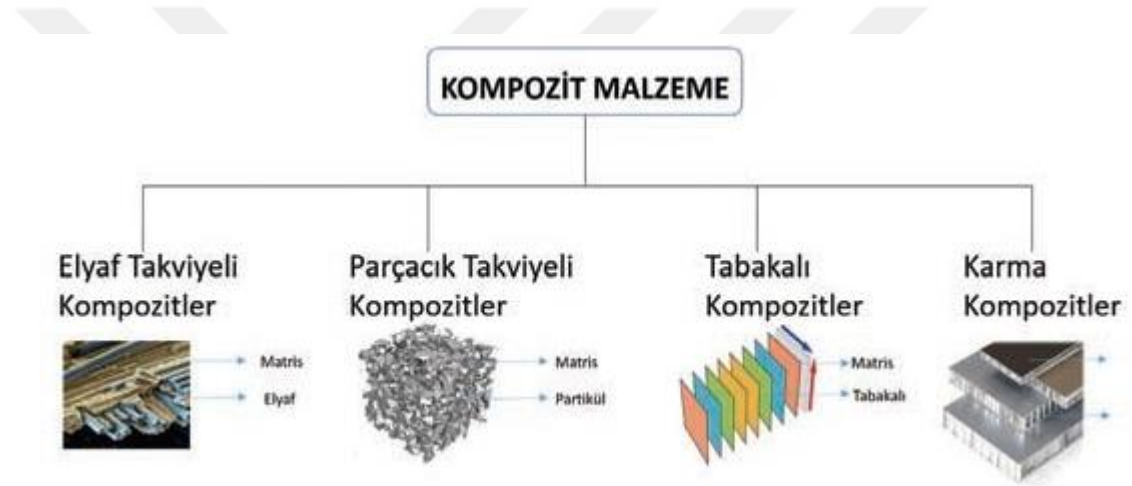
- Üretim süreçlerinin takibi termoset matrisli kompozitlere göre daha kolaydır.
- Geri dönüştürülebilirler.
- Moleküller arası çapraz bağlanma tepkimeleri olmadığı için üretim süresi kısadır.
- Petrol türevi ürünlere, çevresel faktörlere ve kimyasallara karşı dirençleri yüksektir.
- Kolayca ergiyebildikleri için, ısı ile şekillendirme ve kaynak proseslerinde kullanılabilirler.

- Üretimi öncesinde gerekli ön kurutma işlemi uygulanırsa ortama gaz ve su buharı salınımı yapmazlar.

Termoplastik matris malzemeli kompozitlerin bazı dezavantajlarında şu şekilde sıralanabilir. Üretiminde çapraz bağlanma olmadığı için yüksek sıcaklıklara karşı dayanımları azdır. Ayrıca sıvı fazdaki çalışma koşullarına uyum sağlayamazlar (Biron, 2007).

3.1.2. Takviye malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozitler takviye malzemesine Şekil 3.2.'de görüleceği üzere elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı kompozitler ve karma kompozitler olarak sınıflandırılırlar.



Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin takviye edici malzemeye göre sınıflandırılması (Kaya, 2016).

Elyaf (Lif) takviyeli kompozitler

Elyaf takviyesi genellikle çekme, eğilme, çarpılma dayanımları çok düşük veya kırılğan yapılı malzemelere uygulanır. Elyaf takviyesi ile matris malzemesinin düşük olan mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, kırılğanlığının azaltılması ve malzemenin sünekleştirilmesi amaçlanarak elde edilen yepyeni ve üstün özellikli bu malzemelere elyaf takviyeli kompozit adı verilmiştir. Elyaf, makroskobik açıdan homojen, boyu kesitinin en az 100 katı kadar esnek olan malzemeler olarak tanımlanırlar. Elyaf takviyeli kompozitlerde, dışarıdan uygulanan yüklemeleri karşılayan ana bileşen elyaf, polimer matris ise elyafı istenilen geometride bir arada tutan çevreyi oluşturur. Bu kompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak cam elyafı, aramid elyafı, karbon elyaf gibi çeşitli elyaf kullanılabılır (Şahin, 2006).

Cam Elyaf; kolemanit, soda, SiO₂, alüminyum oksit, magnezyum oksit hammaddelerin bileşiminden elde edilir. İmali sırasında çok ince şekilde öğütülen ve homojen dağılım elde edilene kadar karıştırılan hammadde karışımı yaklaşık 1550 °C sıcaklıkta çalışan bir eritme fırınından eritilir. Erimiş cam, platin/radyum alaşımından yapılmış 1250 °C'de kontrol edilen kovanlara beslenir ve 1-2 mm çapındaki deliklerden serbest akış ile bağlayıcı hüzmesinden geçirilerek demetler halinde sarılır. Bağlayıcı hüzmesinde eriyik haldeki cam elyaf malzeme matris malzemesine tutunması için gerekli olan fonksiyonel grupları içeren kimyasal bileşim ile kaplanır. Cam elyaf üretimi için çok değişik bileşimlerde cam mineralleri kullanılmaktadır. Çizelge 3.2'de cam elyaflar üretiminde kullanılan cam çeşitleri ve ağırlıkça bileşenleri verilen E, C ve S camları belirtilmiştir.

Çizelge 3.2. Cam elyaf üretimindeki cam çeşitleri ve (% ağırlıkça) bileşimleri (Chang, 2001).

Bileşen Türleri	E Camı	C Camı	S Camı
SiO ₂	52,4	64,4	64,4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14,4	4,1	25,0
BaO	-	0,9	-
Ba ₂ O ₃	10,6	4,7	-
CaO	17,2	1,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
Na ₂ O, K ₂ O	0,8	9,6	0,3

E camları, elektriksel özellikli ifade eden camlardır ve camlar içerisinde maliyeti en düşük olanı ve en çok kullanılanıdır. Modül, elektriksel ve iyi mukavemet özelliklerinden dolayı kullanılırlar ve bu cam türünden elyaf üretimi oldukça kolaydır. C camı ise, kimyasal korozyona karşı oldukça dirençlidir. Ama E camına göre mekanik özellikleri daha düşüktür ve ayrıca C camının maliyeti de E camına nazaran yüksektir. S cam türü ise maliyet yönünden E ve C camından daha yüksektir. E cam türleri yüksek mukavemet ve yüksek elastiklik modül istenen kullanım alanlarında tercih edilir. Ayrıca S camı yüksek sıcaklıklarda bile mukavemetini muhafaza edebilir (K. G., Budinski ve M. K., Budinski, 2010).

Aramit Elyaf; 1970'li yılların başlangıcında kullanılmaya başlanan aramit elyaflar diğer takviye malzemelerinden çok daha fazla mukavemet-ağırlık oranına sahiptir. Aramit elyaflar ilk olarak, E.I. DuPont de Nemours & Company firmasında üretilmiştir. Üretimi sonrası ilk kullanım amacı otomobil lastiği ayrıca takviye malzemesi şeklinde düşünülmüştür. Zaman içerisinde üstün mukavemet, hafiflik, yüksek sertlik gibi özellikler sebebiyle kompozit, balistik,

araç lastiği, kablo, halat, yanmaz malzemeler, koruyucu giysi gibi uygulamaların gelişmesine sebep olmuştur. Aramit elyafların işlenmesi kolay olması ise ayrı bir avantajıdır. Bu avantajlarının yanı sıra artan sıcaklıklarda sürünme dayanımları yüksek olsa da basma dayanımları düşüktür ve ısıtıldıkça kısalmaktadır. Bu durum, aramit elyafların kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Bir diğer dezavantajı ise kolay eğilmeleridir ki bu durum da kesme işlemlerini zorlaştırmaktadır (Chang, 2001).

Karbon Elyafı; en çok tercih edilen takviye edici eleman cam elyafı olmasına karşın gelişmiş kompozitlerde genellikle saf karbon elyafı tercih edilmektedir. KE, cam elyafına göre daha güçlü ve hafif olmasına karşın imalat proses maliyeti daha fazladır. Karbon elyafı kompozitler havacılıkta kullanılan araçların gövdelerinde kullanılmaktadır. KE, sertlik olarak CE'nin sertliğinden 3 ila 5 kat daha kuvvetli olması ve karbonun çok yüksek elektrik iletkenliğinin olması özellikleri düşünülerek üretilmiştir. Üretilen elyaflar iki şekildedir;

- Sürekli Elyaf: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve önceden reçine emdirilmiş elyaflarda kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.
- Kırpılmış Elyaf: Genellikle enjeksiyon prosesinde, basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. İmalatı yapılan malzemelerin korozyon dayanımları ve yorulma dayanımlarının yüksek olmaları, ayrıca yüksek sertlik özelliklerindedirler.

Tanecik takviyeli kompozitler

Tanecik takviyeli malzemeler olarak genellikle karbonatlar, kil, mika, silikatlar, mikroküreler, tarımsal atıklar, metal tozları veya parçaları, pudra gibi malzemeler kullanılmaktadır. Tanecikli takviye edicilerin ucuz olması ve bu takviye edicilerle kompozit üretiminin kolay olması bazı sektörlerde tanecik takviyeli kompozitlerin kullanılmasında tercih sebebi olmuştur. Karmaşık geometri ürünlerin imalatında da rahatlıkla kullanılabilirler. Ancak tanecik takviyeli kompozitler, elyaf takviyeli kompozitlere göre mekanik özellikleri bakımından daha zayıftır. Bu nedenle, mekanik dayanım ihtiyacı duyulmayan dekorasyon eşyaları, yük altında kullanılmayan genel amaçlı ürünlerin yapımında kullanılırlar. Üretilen kompozitin kalitesini artırmak için tanecik takviye ediciler ön yüzey işleminden geçirilirler. Yüzey işleminden geçirilmiş killerin saflığı, beyazlığı, modülü, esneme dayanımı, eğilme direnci artmaktadır. Mısır koçanları, mısır unu, buğday unu vb. takviye ediciler ise organik yapıda olan takviye ediciler olarak tanecik takviyeli kompozitlerde kullanılırlar (Saçak, 2005).

Tabakalı kompozitler

Birbirinden farklı özelliklerdeki en az iki tabakanın birleşmesinden oluşmaktadırlar. Tabakalar ince film veya levhalardan oluşurlar. Üretilecek kompozit malzemede, sandviç dizilimi gibi malzeme kullanımı tekrarlanarak kalınlığı ihtiyaca bağlı olarak değişmektedir. Tabakaların uyumu göz önünde bulundurulduğunda farklı özellikler ve yönlerde kompozitler elde edilebilir. Tabakalı kompozit malzemeler, polimer-cam, metal-seramik, seramik-polimer kombinasyonları kullanılarak üretilebilir. Polimer ve cam levhalar ile elde edilen kombinasyon en yaygın olanıdır (Schwartz, 1994).

Karma kompozitler

Gelişimini günümüzde de devam ettiren en yeni kompozit çeşididir. Karma kompozitler, kompozit ile başka bir malzemenin birleşiminden oluşabilir ya da farklı takviye malzemelerinin kompozit malzemelerde kullanılması ile de elde edilebilmektedir. Karma malzemelerin en avantajlı özelliği ise, tüm bileşenlerinin özelliklerini yansıtabilmesidir. Bu davranış ile kompozitlere benzemektedirler fakat karma yapıyı meydana getiren bileşenlerden birinin kompozit olabilmesinden dolayı da kompozit malzemelerin bir sonraki adımı olarak yorumlanabilmektedir. Karma kompozitlerin en çok kullanılan örneği, polimer matrisli kompozitlerin metal malzeme ile birlikte oluşturdukları karma (sandviç) kompozitlerdir. Karma kompozitler diğer kompozitlerle kıyaslandığında nadir kullanım alanlarına sahiptir ama yapılarında bulunan üstün avantajlar göz önüne alınacak olursa ilerleyen zamanlarda sıklıkla kullanılabileceği düşünülmektedir (Kickelbick, 2006).

3.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri açık kalıplama ve kapalı kalıplama olarak iki ayrı grupta ele alınabilir.

3.2.1. Polimer matrisli kompozit malzemelerin açık kalıplama üretim yöntemleri

Polimer matrisli kompozit malzemelerin açık kalıplama üretim yöntemleri dört ana grupta ele alınabilir.

Elle Yatırma (Hand Lay- Up) Yöntemi

Özellikle dokuma veya kırılmış olarak hazırlanmış cam fiber takviyeli elyafların bir kalıp üzerine elle yatırılıp, elyaf katmanlarının üzerine sıvı reçine emdirilmesi şeklinde üretilen en eski ve en basit tekniklerden birisidir. Elyaf yatırılmadan önce kalıp yüzeyi temizlenerek jelkot sürülür

ve jelkotun katılaşması sonrası elyaf katları jelkot üzerine yatırılır. Jelkot kullanılması malzemenin yüzey kalitesini artırmak içindir. Elyaf lar, katlar halinde yatırıldıktan sonra reçine dökülerek emdirilir. Elyaf kumaşlara reçinenin en iyi şekilde nüfuz etmesi önemlidir. Elle yatırma yönteminde işçilik fazladır. Ama az sayıdaki üretimler için tercih edilir (Caner, 2010).

Püskürtme (Spray- Up) Yöntemi

Bu yöntem, elle yatırma yönteminin mekanik parçalarla yapılan şeklidir. Jelkot uygulaması yapılmış kalıp üzerine, kırılan elyaf lar ile sertleştirici karıştırılmış reçinenin birlikte özel bir tabanca ile kalıbın yüzeyine püskürtülmesi ile elde edilen üretim yöntemidir. Elyaf kırma işlemi tabancanın üzerinde bulunan ve tabancadan ayrı bir şekilde çalışan kırıcı bıçaklar ile yapılır. Püskürtmeden sonra yüzeyde oluşabilecek pürüzleri gidermek için yüzey rulo yardımıyla düzeltilir (Caner, 2010).

Elyaf Sarma (Filament Winding) Yöntemi

Bu yöntemde sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatılıp makaradan çekilerek dönmekte olan mandreller üzerine önceden belirlenen sarım geometrisine uygun olarak sarılmasıyla oluşur. Liflerin makara üzerine sarılırken açılarında meydana gelen değişiklikler ürünün mekanik özelliklerini etkilemektedir. Sarılan elyaf katlarının artmasıyla ürün sertleşir. Elyaf sarma yöntemi, özel bir şekli olan ürünlerin seri üretimi için kullanılmaktadır. Bu yöntemle genellikle dairesel geometriye sahip tanklar ve borular gibi malzemeler üretilir (Caner, 2010).

Vakum Torbası (Vacum Bagging) Yöntemi

Elle yatırma yönteminin gelişmiş şekli olan vakum torba kalıplaması yönteminde, kalıba yerleştirilen geniş sandviç yapıların en üstüne, kenarlarından sızdırmazlığı sağlayan vakum torbası geçirilerek elde edilir. Kalıp içindeki havanın emdirilmesi sonrasında, vakum torbası malzeme yüzeyine yapışır. Kür işlemi için tüm bileşim fırına verilir. Bu yöntemin başarılı olabilmesi genellikle elyaf sarma ve yatırma teknikleriyle bağlantılıdır. Bu yöntem ile karmaşık şekillerin üretilmesi mümkündür. Ayrıca kompozit malzeme onarım işleminde de vakum torbası yöntemi kullanılmaktadır (Caner, 2010).

3.2.2. Polimer matrisli kompozit malzemelerin kapalı kalıplama üretim yöntemleri

Polimer matrisli kompozit malzemelerin kapalı kalıplama üretim yöntemleri beş ana grupta ele alınabilir

Reçine Transferli Kalıplama (RTM/Reçine Enjeksiyonu) Yöntemi

Bu yöntem ile parça üretimi için iki parçalı kalıp kullanılır. Bu yöntem (jelkodlu veya jelkodsuz) genellikle iki yüzeyinde pürüzsüz olması istenilen malzemelerin imalatında kullanılır. Takviye elemanı olarak keçe, kumaş veya bunların ikisinin birlikte kullanıldığı uygulamalar gerçekleştirilebilir. Bu yöntemde, kalıbın sabit alt parçasına önce takviye malzemesi kalıbı dolduracak şekilde yerleştirilir ve kalıbın üst parçası kapatılır. Daha sonra kalıba basınç altında reçine pompalanır. Matris malzeme enjeksiyonu soğuk kaplarda, ılık veya en fazla 80 °C'ye kadar uygulanabilir. Kalıp içerisindeki havanın boşaltılması ve reçinenin elyaf içine iyice nüfuz etmesi için vakumlama işlemi uygulanabilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesi yine el ile yatırma yöntemindeki gibi uygulanır. Karmaşık parçaların üretiminde kullanılır (Caner, 2010).

Profil Çekme/Pultrüzyon (Pultrusion) Yöntemi

Pultrüzyon işlemi sürekli, sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir. Pull ve Extrusion sözcüklerinin birleşiminden oluşmuştur. Sürekli beslenen takviye malzemesi yönlendirici yardımı ile önce reçine banyosundan geçirilir ve daha sonra şekillendirilmek için 120-150 °C'ye kadar ısıtılmış krom kaplanmış çelik kalıplardan geçirilir. Soğuyan malzeme sertleşerek profil formunu alırlar. Bu yöntemde de elyafların yönleri malzemenin mukavemetini etkilemektedir (Caner, 2010).

Hazır Kalıplama/Compression Moding (SMC, BMC)

Bu yöntem, önceden hazırlanmış hamur veya pestil şeklindeki cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemelerini ihtiva eden kompozit hammadde karışımının, 150 ila 170 °C'ye kadar ısıtılmış, 50-120 kgf/cm² basınç altında çelik kalıplarda şekillendirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ile karmaşık şekiller ve farklı cidar kalınlıklarında ürünler üretilebilir. Ürünün tüm yüzeyleri kalıp geometrisi ile oluşmaktadır. Diğer yöntemlerle elde edilemeyen delikli veya farklı geometrilerdeki boşluklu yapılar bu yöntemle elde edilebilir (Caner, 2010).

Ektrüzyon Yöntemi

Bu yöntem termoplastik ve termoplastik takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Bir ekstrüder makinesi, kontrol paneli, besleme hunisi, vida, kovan ve şekillendirici kafa olmak üzere beş ana kısımdan oluşur. Termoplastikler ve takviye ediciler genellikle granül veya toz halinde besleme hunisine doldurulur. Bu huniden kovana dökülen malzemeler, kovan içerisinde bulunan sonsuz vida sistemi yardımı ile kafaya doğru taşınırlar. Kovan etrafında bulunan elektrikli ısıtıcılar sayesinde termoplastik veya takviyeli kompozit

malzemeler ısıtılarak eriyik hale geçerler. Vida hem taşıyıcı hemde karıştırıcı özelliği taşımaktadır. Ergimiş malzeme, vidanın itmesi ile oluşan basınç ile kafada bulunan geometri şeklinde ekstrüderden dışarıya sürekli bir şekilde çekilir. Su dolu bir kaptan geçirilerek soğutulan malzeme katılaştır. Son olarak istenilen boyutlarda dilimlenerek nihai ürün veya enjeksiyon makinelerinde kullanılmak üzere granül şeklinde küçültülürler. Sürekli bir yöntem olması sebebiyle ekonomiktir. Kompozit malzeme üretiminde genellikle çift vidalı ekstrüderler tercih edilir. Tüp, boru veya karmaşık profillerin üretiminde tercih edilen bir yöntemdir (Braid, 2001; Mark, 2004; Arı, 2009).

Enjeksiyon Yöntemi

Genellikle çift vidalı ekstrüder yardımı ile hazırlanan plastik veya takviyeli kompozit malzeme granüllerinin kullanıldığı enjeksiyon makinası, granüllerin eriyik halde üretimin yapılacağı parça geometrisine sahip çelik kalıplara basınç altında enjekte edilerek, kalıp boşluklarına doldurulması ve kalıp içerisinde katılaşmaya kadar bekletilmesi esasına dayanan bir yöntemdir. Kalıp içerisinde katılaştıran ürün, enjeksiyon makinasının kalıbı iki parçaya açması sonrasında kalıptan alınır. Karmaşık geometrilerin üretiminde, hızlı ve ekonomik bir yöntemdir (Braid, 2001; Mark, 2004).

3.3. Poliamit 66

İlk ticari termoplastik mühendislik polimerleri poliamitlerdir. Fritz Klatte tarafından 1913 yılında, sentetik liflerle ilgili olarak ilk patent polivinilklorür için alınmış olmasına karşın imalatı için herhangi bir yöntem bulunamamıştır. Hermann Staudinger tarafından 1925 yıllarında, makromoleküllerin yapısı üzerinde oldukça önemli çalışmalar yapılmış ve lifi oluşturan polimerlerin düz zincir yapısında olması gerektiğini ortaya koymuştur (Seventekin, 2003). Wallace Carothers tarafından 1927'de başlatılan araştırmalar sonucu 1928 yılında, lif şekli verilen ve ilk yapay sentetik lif olarak sentezlenen poliamit türü Poliamit 66. PA66; 1938 yılında ilk defa elyaf olarak üretilmiş ve ABD tarafından ipeğe alternatif olarak hizmete sunulmuştur. Ürün daha sonra NYLON (Now You Lose Old Nippon) şeklinde adlandırılmıştır ve ticari olarak üretime başlanmıştır (Başer, 1992; Saçak, 2002b; Melton vd., 2011).

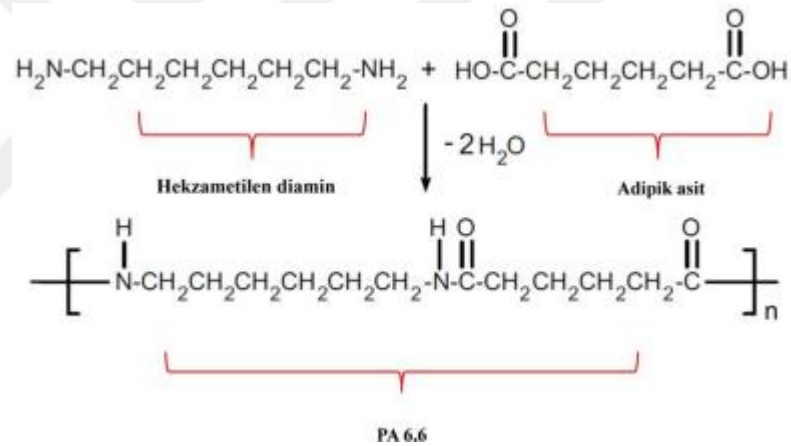
Poliamitler yapılarındaki amit bağı (-NH-CO-) grubunun belli aralıklarla tekrarlandığı polimer türleridirler. Üretimleri için beş temel polimerizasyon yöntemi vardır. Bunlar:

- Bir diamin ile bir dikarboksilik asitin tepkimesi,
- Uygun bir aminoasitin kondenzasyonu,
- Laktamin halka açılması,

- Bir diaminin bir diasit klorür ile tepkimesi,
- Bir diizosiyanatın bir dikarboksilik asit ile tepkimesidir (Baker ve Mead, 2000).

Piyasada, yaklaşık yirmi çeşit poliamit türü vardır. Bu türler polimerin sentezi sırasında kullanılan başlangıç monomerine bağlı olarak isimlendirilirler. Polimerizasyon sırasında kullanılan monomerdeki karbon atomu sayısı ile poliamitin adına karar verilir. Eğer sadece bir monomer kullanılıyorsa poliamit sadece monomerindeki karbon atomu sayısı ile adlandırılır (PA6, PA12 gibi). Farklı iki monomer kullanılırsa poliamitler iki sayı kullanılarak adlandırılır (PA6,6 ya da PA6,12 gibi) (Mark, 2004).

PA66 ise, heksametilen diamin ile adipik asitin kondenzasyon tepkimesi ile üretilir. Şekil 3.3.'de belirtildiği gibi PA66'nın kondenzasyon tepkimesi heksametilen diamin ile adipik asit arasında gerçekleşir.



Şekil 3.3. PA66'nın kondenzasyon tepkimesi (Melton vd., 2011)

PA66'daki polar amit ve karbonil grupların dizilimi simetrikdir. Böylece komşu polar gruplar yönlendiklerinde aralarında kolayca hidrojen bağı oluşur. Bu da polimerin o bölgesindeki kristalinitesinin artmasını sağlar (Baker ve Mead, 2000; Mark, 2004).

PA66 polimeri yapısal olarak yarı kristalin bir polimerdir. Yarı kristalin demek; hidrojen bağı sayısının fazla olduğu kristalin bölgelerden ve bu bağı sayısının az olduğu amorf bölgelerden oluştuğu manasına gelmektedir. Polimer yapıdaki kristalin bölgeler polimere bükülmezlik, dayanım, akma direnci, kimyasal direnç, ısıl kararlılık ve iyi elektriksel özellik gibi nitelikler sağlar. Yapı içerisindeki amorf bölgeler ise darbe dayanımı ve uzama özelliğini etkiler (Baker ve Mead, 2000; Ebewele, 2000; Mark, 2004).

PA66'nın sahip olduğu zincirler arasındaki kuvvetli hidrojen bağı ve kristal yapı, polimere yüksek ergime noktası özelliği kazandırmıştır. Ayrıca PA66 polimeri dar bir erime sıcaklığı aralığına sahiptir. Bu sıcaklık aralığında yapıdaki hidrojen bağları aniden kırılmaya başlar ve polimerin eriyik viskozitesi aniden düşer (Mark, 2004; Melton, vd., 2011).

PA66 polimerinin en önemli karakteristik özelliklerinden birisi de diğer polimerlere nazaran önemli miktarda nem tutmasıdır. Nem absorpsiyonu yapının genellikle amorf bölgelerinde oluşur. Nem, yapıdaki hidrojen bağlarını bozarak plastikleştirici etkisi oluşturur ve camsı geçiş sıcaklığı (Tg) değerini ve çekme dayanımını düşürür ve malzeme daha esnek hale gelerek darbe dayanımı artar (Ebewele, 2000; Baker ve Mead, 2000; Mark, 2004).

Ayrıca çentik etkisine duyarlı olan PA66 polimerine, çentik açıldığı zaman elde edilen darbe dayanımı değeri, çentiksiz darbe dayanımına göre oldukça düşüktür. PA66'nın bükülmezlik ve dayanım gibi özellikleri cam elyaf ya da karbon elyaf gibi takviye malzemelerinin eklenmesiyle artırılabilir (Ebewele, 2000; Mark, 2004).

PA66 polimerinin en önemli dezavantajlarından bir diğerisi de üretimi sırasında önemli ölçüde kalıp çekmesi meydana gelmesidir. Polimer eriyiği soğurken kristallenir ve bu sırada yoğunluğu artar. Bu durum üründe boşluklar oluşmasına ve çökmelere neden olur. PA66'nın boyutsal kararlılığı takviye malzemesi ya da çekirdeklendirici ajan kullanılarak artırılabilir (Baker ve Mead, 2000; Mark, 2004).

Tüm poliamit esaslı plastikler içinde PA66 polimeri en dayanıklısı ve ergime sıcaklık noktası en yüksek olanı olduğu bilinmektedir. 265°C'lerde eridiği belirtilen PA66'nın sürekli olarak kullanımda belirtilen sıcaklık değerinin 120°C olduğu bilinmektedir. Özgöl ağırlığı: 1,13-1,15 g/cm³, kopma mukavemeti: 66-86 MPa, kopma anındaki uzama yüzdesi: %30-300, normal şartlarda nem oranı %4'dür (Senthilvelan ve Gnanamoorthy, 2006). Çizelge 3.3'de PA66 polimerine ait mekanik özellikler belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. PA66 polimerinin mekanik özellikleri (Srinath ve Gnanamoorthy, 2007).

MEKANİK ÖZELLİKLER		Poliamit 6	Poliamit 66
	Sembol	PA6	PA66
	Yoğunluk (g/cm ³)	1,12-1,14	1,13-1,15
	Kopma mukavemeti (MPa)	40-80	66-86
	Kopma uzaması (%)	30-300	30-300
	Eğilme mukavemeti (MPa)	76-100	80-105
	Basma mukavemeti (MPa)	65-110	70-100
	Darbe mukavemeti (çentikli) (j/cm)	0,32-0,54	0,43-1,14
	Elastik modül (çekmede) (MPa)	700-2600	1000-2800
	Elastik modül (eğilmede) (MPa)	1000-3100	2000-3400
	Elastik modül (basmada) (MPa)	1750-2000	---
	Sertlik		
	Rockwell R	115-120	108-120
	Rockwell M	80-85	83-89
	Shore D	85-90	---
	Sürtünme katsayısı	0,15-0,42	0,15-0,42
Havadan aldığı nem (%)	2,5-3,0	2,4-3,0	
Sudaki Doygunluk (%)	8,5-10	8,0-8,5	

Yapısı gereği düz, tok ve sert yüzeye sahip olan PA66 polimeri dişlilerde ve aşınma direncinin yüksek olması istenilen kam mili, zincir dişlileri gibi parçalarda kullanılmaktadır. PA66 polimerinin Çizelge 3.4'de tribolojik özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. PA66 polimerinin tribolojik özellikleri (Srinath ve Gnanamoorthy, 2007).

Özellik	Yağlanmış	MoS₂	PTFE	%30 cam elyafı
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1,15	1,18	1,23	1,47
Sertlik (Rockwell)	M 60	M 85	M 65	R 120
Statik sürtünme	0,05	0,17	0,20	0,12
Dinamik sürtünme	0,06	0,09	0,06	0,14

PA66 polimeri, etkili dielektrik özellikleri, iyi hacim ve yüzey direnci, çatlak direnci gibi özellikleri sayesinde özellikle elektrik endüstrisinde, izolasyon ve güç iletimi gibi oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır (Zhao vd., 2006). PA66 polimerinin Çizelge 3.5.'de termal ve elektriksel özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. PA66 polimerinin elektriksel ve termal özellikleri (Zhao vd., 2006).

	Plastik türü	Poliamit 6	Poliamit 66
Elektriksel özellikler	Sembolü	PA6	PA66
	Spesifik direnç (ohm. cm)	10^{11} - 10^{15}	10^{12} - 10^{13}
	Yüzey direnci (ohm)	10^{10} - 10^{13}	10^{10} - 10^{13}
	Dielektrik sabiti (10^6 Hz)	3,6-7	3,4-5
	Dielektrik kayıp faktörü (10^6 Hz)	0,025-0,3	0,03-0,2
	Dielektrik direnci (10^6 Hz)	16-150	20-150
Termal özellikler	Kristal erime veya amorf yumuşama noktası ($^{\circ}$ C)	210-220	255-265
	Yük altında deformasyon sıcaklığı ($^{\circ}$ C)	70-95	75-105
	Max çalışma sıcaklığı ($^{\circ}$ C) uzun-kısa süre	90-150	95-180
	Spesifik ısı (cal/gr $^{\circ}$ C)	0,40-0,41	0,40-0,41
	Isıl genleşme katsayısı ($*10^6$ cm/cm $^{\circ}$ C)	70-120	70-100
	Isıl genleşme katsayısı ($*10^4$ cal/sn cm $^{\circ}$ C)	5,5-5,8	4,8-5,8
	Yanıcılık	V ₂	V ₂
	Yanma hızı	Kendi kendine söner	Kendi kendine söner

Poliamit 66 polimeri ile üretilen mamuller birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu parçalar bazen saf PA66 bazen de katkı ve takviyeli olarak kullanılmaktadır. Poliamit 66 polimerinin kullanım alanları genel olarak; otomotiv endüstrisi, makine yan sanayi endüstrisi, elektrik ve elektronik endüstrisi, endüstriyel parçalar, inşaat sanayi olarak bilinmektedir. Literatürlere geçen bazı kullanım alanları aşağıda belirtilmiştir.

- Takviyesiz ve toklaştırılmamış PA66, otomobil antenlerinde ayrıca tekerlek kapaklarında,
- Takviyesiz ve toklaştırılmış PA66, emniyet kemerlerinde, elektrik kumanda düğmelerinde, sigorta kutularında, kablo bağlayıcı tokalarında,
- Cam takviyeli PA66, otomobil iç aksamı ve diğer aksamlarında, vites kollarında, kapı ve pencere donanımlarında, fren-debriyaj ve gaz pedallarında,
- Mineral takviyeli ve mineral cam takviyeli PA66 kompozitleri, soğutucu fanlarda ve gövdelerinde ve otomobil far reflektörlerinde kullanılmaktadır.
- Cam elyaf katkı PA66 (PA66/CE), soğutucu sıvılara dayanıklılığı, yüksek sıcaklık ve basınçlarda kullanılabilirdiği için otomobil radyatör tankı üst kapak ve termostatlarında,
- PA66/POM alaşımları, otomobil tamponlarında, cam elyaf takviyeli PA66 kompozitleri tok hale getirilmiş oldukları için güneş ışınlarına dayanıklı malzemelerdir ve bagajlarda, kapı kollarında, ön cam silecek kollarında,

- Takviyesiz ve alev geciktiricili PA66 sınıfları, yaygın olarak güç kontaktörleri ve bağlantılarında,
- Takviyesiz, MoS₂ ve KE katkılı PA66 ve bazı cam elyaf takviyeli sınıfları, dişlilerde, silindirlerde, makaralarda, kasnaklarda ve aşınmaya dayanıklı parça yapımında,
- Takviyesiz PA66 polimerleri, civata, somun, vida, demiryolu izolatör yastıklarında,
- Toklaştırılmış PA66 sınıfları, asansör kasnak ve makaraları gibi hemen hemen tüm sektörlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Zhao vd., 2006).

3.4. Karbon Elyaf

Yapılarında minimum %90 oranında karbon içeren ve yüksek performanslı malzemelerden biri, karbon elyaflardır. Karbon elyaf kullanımı ilk olarak 1879 yılında, akkor lamba teli yapabilmek için selülozik liflerden üretilmiştir. 1889 yılında ise ilk lif yapısı elde edilmiştir. Karbon elyaflar 1960'lı yıllara roket malzemesi olarak kullanılmıştır. Karbon elyafların imalat prosesleri 1963 yılında geliştirilmiş ve 1968 yılında üretime ticari anlamda başlanmıştır. Union Carbide Corporation firması İkinci Cihan Harbi sırasında, rayon ve poli(akrilonitril) (PAN) karbonizasyonu ile karbon elyaf üretmiştir. Karbon elyaf üretmek için; poliesterler, poliamitler, poli(vinilalkol), poli-p-fenilen ve fenolik reçineler gibi malzemeler denenmiştir. Tüm bu malzemeler içerisinde PAN, rayon ve zift (pitch) karbonizasyonlarının diğer malzemelerden üretilen karbon elyaflara göre daha yüksek mekanik değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Günümüzde kullanılan ve tercih edilen KE'nin %90 civarı PAN esaslıdır. Bunun sebebi olarak PAN esaslı elyafın, dayanımı ve modülü yüksek ayrıca yüksek kopmadaki uzama değerine sahip olmalarına dayandırmışlardır (Donnet vd., 1998; Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002).

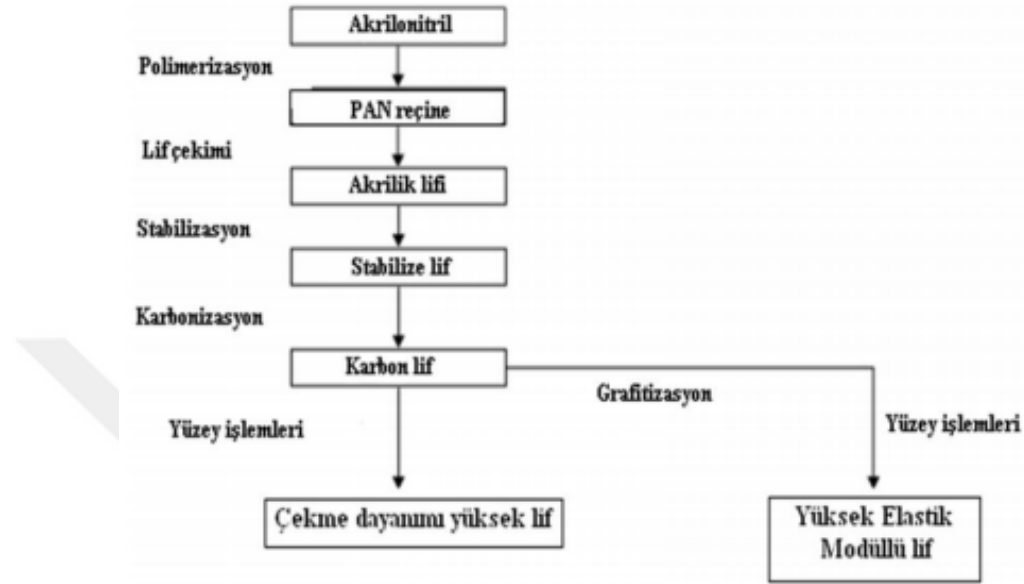
3.4.1. PAN temelli karbon elyaf üretimi

Her hammaddeden PAN temelli karbon elyaf üretimi farklı farklı evreler içersede temel üretim yöntemleri için aşağıda belirtilen sıralamadaki gibidir;

- Lif yapımı,
- Stabilizasyon (Oksidasyon),
- Karbonizasyon,
- Yüzey iyileştirmesi ve kaplama (Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002).

Literatürlerde karbon elyaf üretimi için bazı araştırmacılar, karbonizasyon işlemini max 1500°C'de bittiğini ve yüksek elastiklik modüllü karbon elyaf üretebilmek için 3000°C'ye kadar olan işlemi grafitizasyon olarak belirtmişlerdir (Donnet vd., 1998).

Şekil 3.4.'de her iki PAN temelli karbon elyaf üretimi için üretim prosesleri sıralaması belirtilmiştir.



Şekil 3.4. PAN esaslı karbon elyaf üretim proses adımları (Carbonfiber, 2019).

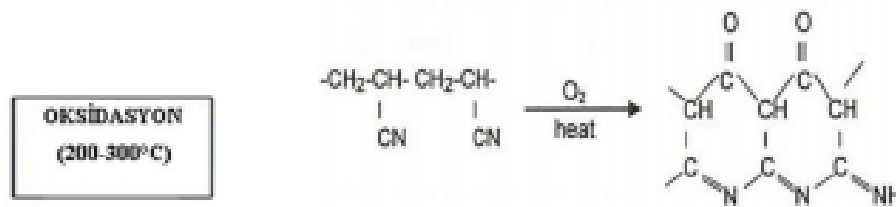
PAN temelli karbon elyaf üretimde öncelikle, PAN malzeme lifler şekline getirilir (Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002). Karbon elyaf üretiminde genel olarak kuru lif çekim yöntemi ile üretilen PAN lifleri tercih edilmesine karşın 500 N/mm^2 'den daha büyük kopma dayanımına sahip yaş formdaki liflerde kullanılabilir (Yaman vd., 2006).

Stabilizasyon işlemi, genellikle oksijenli bir ortamda yapıldığı için bu işlemin literatürlere geçen bir diğer adı da oksidasyon prosesidir. Bu proses PAN liflerin ısı işleme tabi tutulmasıyla gerçekleşir. Karbon elyaf üretimi açısından bu aşama çok büyük önem arz etmektedir ve bu aşamadaki liflerin özellikleri direkt olarak nihai karbon elyafın özelliklerini belirlemektedir. Uygun termal kararlılığa ulaşamayan lifler, karbonizasyon aşamasındaki yüksek sıcaklıklara dayanamamaktadır. Stabilizasyon aşaması, bir nevi life termal kararlılık kazandırma aşamasıdır. Stabilizasyon esnasında, liflerin büzülmesini önlemek ve moleküler yönlenmenin artmasını sağlamak için gergin bir şekilde ısı işleme tabii tutulmalıdır. Stabilizasyon işlemi $200\text{-}300^\circ\text{C}$ aralığında ve 30 ila 120 dakika arasında gerçekleşmektedir. Stabilizasyon işlemi sırasında Şekil 3.5.'de gösterildiği gibi artan sıcaklık ve geçen sürelerin etkisiyle lifler renk değişimine uğramaktadır. Bu renk değişimi sırası ile beyaz, açık kahverengi, koyu kahverengi ve siyaha doğrudur (Donnet vd., 1998; Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002; Zoltek, 2019).



Şekil 3.5. Stabilizasyon esnasındaki renk değişimi (Zoltek, 2019).

Stabilizasyon işleminde, Şekil 3.6.'da gösterildiği gibi elyaftan hidrojen ayrıştırılarak oksijenle oksijen bağlanır. Uygulanan bu işlem ile elyaf yapısı çapraz bağlanma yaparak daha yüksek sıcaklık değerlerinde bozunmaya bir yapı elde edilir (Donnet vd., 1998; Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002; Zoltek, 2019).

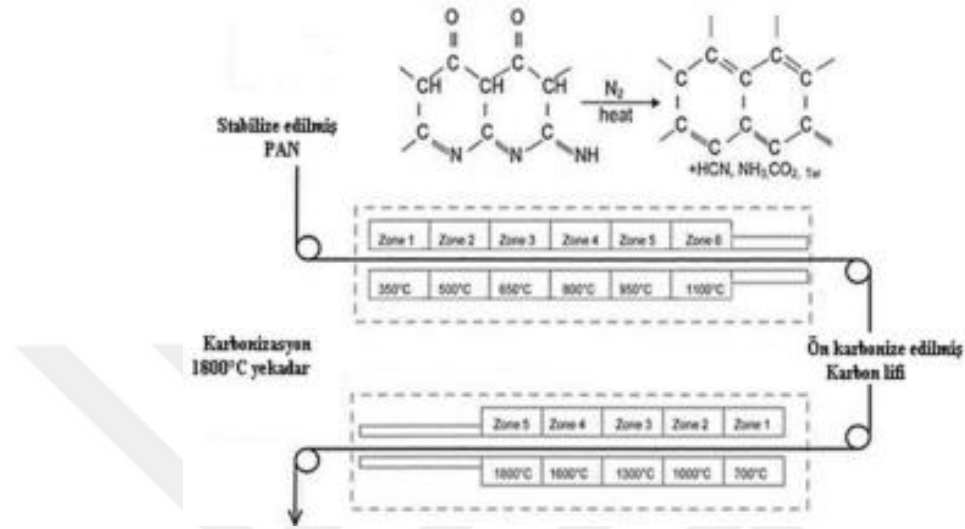


Şekil 3.6. PAN liflerin oksidasyonu (Carbon-fiber, 2019).

Karbonizasyon prosesi literatürlerde farklı şekillerde belirtilmiştir. Bazı araştırmacılar elyafın oksijenin bulunmadığı sistemde 3000°C'ye kadar ısıtılması aşamasının tamamına karbonizasyon demişlerdir. Bazıları da karbonizasyon prosesinin çift aşamada gerçekleştiğini, 1100°C'ye kadar olan prosese ön karbonizasyon ve 1800°C'ye ulaşınca kadarki bölümü karbonizasyon olarak bildirmiş ve üçüncü aşama olarak 3000°C sıcaklıklara çıkılması prosesini ise grafitizasyon olarak belirtmişlerdir (Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002; Yaman vd., 2006)

Karbonizasyon prosesi Şekil 3.7.'de belirtildiği gibi 1100°C sıcaklığa ulaşınca kadar elde edilen bölüme ön karbonizasyon daha sonra 1800°C'lerdeki işleme ise karbonizasyon olarak

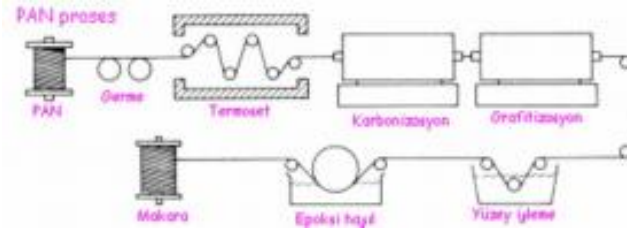
tanımlanmıştır. Ulaşılan bu sıcaklık değerlerinde hidrojen ve zararlı diğer gazlar uzaklaştırılmalıdır. (Yaman vd., 2006).



Şekil 3.7. Karbon liflerin karbonizasyonu (Carbon-fiber, 2019).

Son olarak, karbon elyafların kabiliyetlerinin yükseltmek için argon atmosferinde grafitizasyon prosesi uygulanmaktadır. Grafitizasyon prosesi, 3000°C civarında sıcaklıklarda yapılmaktadır. Ulaşılan sıcaklıklarda, hammaddenin yapısında bulunan karbondan başka diğer elementler uzaklaştırılmaktadır. Bu işlem sonucunda sıcaklığında etkisi ile, elyaf içeriğindeki karbon oranı %80 ile %99 arasında oluşmaktadır. Bu işlem esnasında, elyaf sırasında, elyafı tekrardan kristalizasyon meydana gelmektedir. Kullanılan hammaddenin oryantasyon derecesi ve karbon elyaf üretimi sırasında çıkılan maksimum sıcaklık, üretilen karbon elyaf modülünü belirlemektedir. Sıcaklık, imalatı gerçekleştirilen elyafın sınıfını belirler (Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002, Yaman vd., 2006).

Şekil 3.8.'de belirtildiği gibi karbonizasyon işlemi sonrasında elyaf malzeme yüzey iyileştirme işleme tabi tutulur. Bahsi geçen iyileştirme işlemi, oluşabilecek tortulaşmayı alarak yüzeye fonksiyonel grup eklemek içindir. Birçok üretici bu amaçla elektrolitik oksidasyon sürecini kullanmaktadır. Bu işlemlerdeki amaç, polimerik matris malzemesi ile uyumluluğunu geliştirmektir. İşlemler sonrası pürüzlülük artmış olsa da, yüzeyde oksijenlenmiş grup konsantrasyonunu elde etmek ana gayedir (Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002; Yaman vd., 2006).



Şekil 3.8. Karbon elyafın yüzey işleme prosesi (Yaman vd., 2006).

Sizing işlemi, elyafta daha sonra yapılacak işlemler esnasında oluşabilecek yapısal çatlak, kırılma gibi istenmeyen hatalara karşı korumak içindir. Aynı zamanda matris malzemesine tutunabilme özelliği kazandırılmış olur. Reçine ile kaplanan elyaflar, kompozit malzeme imalatında matris ile ara yüz görevi görür. Sizing prosesinde genellikle epoksi malzeme tercih edilir (Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002). Çizelge 3.6.'da PAN temelli karbon elyafların özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. PAN temelli karbon elyafların özellikleri (Yaman vd., 2007).

Özellik	Birim	Ticari	Uzay Endüstrisi		
		Standart Modül	Standart Modül	Orta Modül	Yüksek Modül
Germe Modülü	Gpa	228	220-241	290-297	345-448
Germe ayanımı	MPa	380	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Kopma zaması	%	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Elektriksel Direnç	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1650	1050	1450	900
Isı İletkenliği	$\text{W/m} \cdot \text{K}$	20	20	20	50-80
Eksen yönünde elektriksel uzama katsayısı	$10^{-4} \cdot \text{K}$	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Yoğunluk	g/cm^3	1,8	1,8	1,8	1,9
Karbon içeriği	%	95	95	95	99
Lif çapı	μm	6-8	6-8	5-6	5-8

3.4.2. Rayon esaslı karbon elyaflar

Karbon elyaf üretimi için diğer önemli bir madde ise, erimeden bozunma özelliği gösteren selülozdur. Pamuk ve rami gibi doğal selüloz lifleri karbon elyaf üretimi açısından tercih edilmezler, bunun nedeni olarak doğada sürekli filament halinde bulunmamları ve düşük oryantasyon derecesine sahip olmalarıdır. Ayrıca lignin gibi safsızlıklar içerirler. Bu sebeple rejenere selüloz lifleri sınıfından olan viskoz rayon lifleri, karbon elyaf üretimi için tercih edilmektedir (Donnet vd., 1998).

Rayon esaslı karbon elyaflar, ilk olarak 1959 yılında askeri materyallerde kullanılmak için üretilmişlerdir. Daha yüksek germe dayanımına sahip PAN liflerinden imal edilen elyaflar, rayon temelli elyafların yerine tercih edilmektedir (Yaman vd., 2006).

Selüloz direkt karbon elyaf imalatında kullanılmaz. Önce rejenere selüloz lifi üretilmeli ve ardından karbon elyaf üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Rayon malzemenin üç aşama sonucunda karbon elyaf üretilmektedir (Yaman vd., 2006).

Selüloz liflerine oksidasyon işlemi karbon verimini artırmak için uygulanmaktadır. Temelde bir oksidasyon işlemi olan stabilizasyon işlemi sırasında, 25 ila 150°C'de yaklaşık olarak %12'lik bir ağırlık kaybı neticesinde su bileşenleri ayrıştırılabilmekte, 150 ila 240°C'de ise selülozdaki (hidrojen ve hidroksil gruplarındaki) su molekülleri uzaklaşırken, 240-400°C sıcaklıklarda termal bozunma başlamaktadır. Daha sonra C—O ve C—C bağları koparak aromatisasyon gerçekleşmektedir. 400-700°C aralığında karbonik atıkların aromatisasyonu sonucunda, grafit benzeri tabakalar oluşurken selülozun yapısında ve oryantasyonunda bozulmalar olmaktadır. 700-2700°C'de yapılan karbonizasyon ve grafitizasyon işlemleri sırasında germe ile boyuna oryantasyon sağlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda filamentler plastik yapıdadır ve %150 oranında germe işlemine tabi tutulmaktadır. Selülozik liflerin stabilizasyonu esnasında yavaş bir ısıtma ile yüksek verim sağlanabilmektedir. Ama bu durum ekonomik değildir. Selülozda elyaf imalatı için verim %10 ila 30 civarındadır. Bunun sebebi ise, selülozun %44 gibi az bir oranda karbon içermesindedir (Yaman vd., 2006).

3.4.3. Zift temelli karbon elyaf

Zift esaslı karbon elyaflarda, PAN esaslı karbon elyaftan elde edilen özellikler kolay kolay elde edilemez. Zift esaslı elyafların bükülmeleri zordur ayrıca daha kırılabilir yapıdadırlar. Bu elyafların imalatında PAN esaslı elyaf üretimi ile benzer şekildedir Ama farklı sıcaklık, gerdirme ve stabilizasyon süreleri vardır. Zift her ne kadar ucuz olsada, karbon elyaf sürecine kadar oluşan adımların maliyeti daha yüksektir. Bunun için PAN esaslı elyafa göre daha pahalıdır (Miracle ve Donaldson, 2001; Mazumdar, 2002).

Ziftten imal olunan hammaddeler, izotropik veya anizotropik yapıya sahip olabilirler. Genellikle anizotropik yapıda ve molekül ağırlıkları yüksek olan zift, mezofaz (MP) olarak adlandırılır. Karbon elyaf üretiminde de genellikle mezofaz yapıdaki zift kullanılmaktadır (Yaman vd., 2006).

İzotropik yapıdaki ziftte elyaf üretilir. Lakin imal edilen bu elyafların germe işlemi zordur. Aynı zamanda üretilen liflerin modülleri düşüktür. Bunun için bu hammaddeden

elyaf imlatı yaygın değildir. Mezofaz yapısında ise, lif imalatında oryantasyon sağlanabilmektedir. Mezofaz temelli elyaf, yüksek germe dayanımına ve grafitizasyon işlemi sırasında yüksek kristaliniteye sahip olmaktadır (Yaman vd., 2006).

Öncelikli olarak, zift filtrasyon işlemlerine tabi tutularak safsızlıklar uzaklaştırılır. Daha sonra lif çekimini kolaylaştırmak için polietilen, polipropilen, polistiren ve 15 polinorbornen gibi termoplastik veya fenolformal reçineleri ve poliester gibi termoset katkı maddeleri ilave edilmektedir. Dolgu malzemeli zift karışımları 400°C sıcaklık elde edilinceye kadar ısıtılır. Sıcaklığın etkisi ile molekül ağırlığı az olan bileşikler buharlaştırılır. İşlem sırasında dolgu malzemeleri ile ağ yapısı meydana gelmektedir. Ziftte 450°C üzerindeki sıcaklık değerlerinde, mezofaz anizotrop bir yapı meydana geldiği için bu fazda işlem sıcaklığı oldukça önemlidir. Ziftten elyaf çekimi, pnömatik elyaf çekimi ve gaz üfleyerek elyaf çekimi şeklinde iki farklı sistem ile yapılmaktadır (Yaman vd., 2006).

Okside olmuş elyafa, inert gaz ortamında 1000°C'de karbonizasyon işlemi uygulanmalıdır. Bu işlem sırasında elyafta bir ağırlık kaybı görülmektedir (Yaman vd., 2006).

Karbonizasyon ve grafitizasyon işlemlerinden sonra elde edilen karbon elyaf, poliakrilonitril liflerinden elde edilenlere benzer şekilde olduğu için yüzey işleme ve haşıl işlemleri uygulanmalıdır. Ancak ziftten elde edilen karbon elyaf, yüzey oksidasyonuna daha az reaktif olduğu için yüzey işleme sırasında farklı reaksiyon koşulları kullanılmaktadır. Zift esaslı liflerden karbon elyaf elde ederken, çeşitli aşamalarda yapıdaki karbon miktarları değişmektedir. Özellikle de stabilizasyon sırasında lif tarafından oksijen alınmaktadır ve bu durumda stabilize olmuş elyafdaki oksijen miktarını arttırmaktadır (Yaman vd., 2006).

Yine aynı şekilde öncül lif yapısında stabilizasyon ve karbonizasyon işlemleriyle birlikte bir miktar ağırlık kaybı olmaktadır ve bu ağırlık kaybına bağlı olarak elyaf çaplarında da azalma gözükmektedir (Yaman vd., 2006). Çizelge 3.7'de Zift temelli karbon elyafların özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.7. Zift esaslı karbon elyafların özellikleri (Yaman vd., 2007).

Özellik	Birim	Düşük Modül	Yüksek Modül	Ultra Yüksek Modül
Germe Modülü	Gpa	170-241	380-620	690-966
Germe Dayanımı	MPa	1380-3100	1900-2750	2410
Kopma Uzaması	%	0,9	0,5	0,27-0,4
Elektriksel Direnç	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1300	900	130-220
Isı İletkenliği	W/m*K	----	----	----
Eksen yönünde elektriksel uzama katsayısı	$10^4 \cdot \text{K}$	----	----	----
Yoğunluk	g/cm^3	1,9	2	2,2
Karbon içeriği	%	+97	+99	+99
Lif çapı	μm	11	11	10

3.4.4. Karbon elyafların özellikleri ve kullanım alanları

Karbon elyafların yoğunluğu 1,6- 2,2 g/cm^3 civarındadır. Karbon elyaf üretiminde kullanılan hammaddenin yoğunluğu ise 1,14-1,19 g/cm^3 arasında değişmektedir (Yaman vd., 2007).

KE' lardan yapılmış kompozitler, Ç1020 konstrüksiyonları ile kıyaslandığında çelik konstrüksiyonlara nazaran 5 kat daha dayanıklı ve ağırlık olarak ise çeliğin 5' te 1' i civarındadır. 6061 alüminyum konstrüksiyonlarına göre 7 kat daha dayanıklı, 2 kat daha sert ve 1,5 kat daha hafiftir. Karbon elyafların yorulma davranışı bilinen tüm metallere göre daha iyidir. Uygun reçine ile kaplanarak imal edildiğinde, kompozitin korozyona karşı dayanımı iyi olmaktadır. Zift esaslı karbon elyafların elektriksel iletkenliği bakırdan 3 kat daha fazladır (Yaman vd., 2007).

Karbon elyaflar kolaylıkla erimediklerinden yüksek sıcaklıkların olduğu uçak frenlerinde ve roketlerde kullanılmaktadır. Karbon elyafların özelliklerini, dikey ve yatay kristalitlerin mikro yapıdaki yerleşimi belirlemektedir. Kurdela benzeri kristalitler az veya çok eksene paralel şekilde yerleşmiştir. Bu kristalitlerin uzunluğu ve düzlüğü elyaf modülünü etkilemektedir (Yaman vd., 2007).

Karbon elyaflar, yoğunluğunun az olması ve yüksek mukavemetleri ile kompozit yapılardan inşaat sektörüne kadar, peyzajdan tıbbaya kadar oldukça değişik alanlarda kullanılmaktadır. Karbon elyaflar uzay endüstrisinde genellikle tercih edilmektedir. Uzay ve uçak sanayinde kullanılan alüminyum gibi hafif metallerin takviyesinde, spor malzemelerinin (tenis, buz hokeyi, kayak gibi) çok hareketli kısımlarında karbon elyaflar kullanılmaktadır. Ortopedik

malzeme üretiminde sağlamlığı ve yanmazlığı arttırmak amacı ile karbon elyaf kullanılmaktadır. Yarış arabalarındaki yakıt tanklarında hafif olması nedeniyle kullanılmaktadır. Xray ekipmanlarında, enerji depolama bataryalarında, yer merkezli antenlerde, rüzgar değirmenleri için pervane üretilmesinde kullanılmaktadır. Daha yüksek spesifik yüzey bölgesine ve daha yüksek absorpsiyon ve desorpsiyon oranına sahip oldukları için, aktive edilmiş karbon elyaflar su arıtma sektöründe, SO_x, NO_x ve toksik gazların tutulmasında ve son zamanlarda ise metan depolamada ve polarize elektrot olarak kullanılmaktadır. Karbon elyaf ve termoplastik bir reçine ile oluşan kompozit malzemeler dizüstü bilgisayar parçalarında ve elektronik parçalarda kullanılabilir (Yaman vd., 2007).

Karbon elyaf ile kuvvetlendirilmiş polimer, sensör olarak kullanılmaktadır. İnorganik lif ve karbon elyaf, organik bir latex ile bağlanması sonucu elde edilen kompozit materyal, otomobil hava yastıklarında, hava ile şişirme ünitesinde filtre materyali olarak kullanılmaktadır. Karbon elyaf ile kuvvetlendirilmiş polimer reçine esaslı kompozitler, vakum pompası ve kompresör pervanesi olarak da kullanılmaktadır. Karbon elyaflar ile kuvvetlendirilmiş polimerden yapılmış kirişler, yüksek kopma dayanımına, modüle ve yüksek korozyon dayanımına sahiptir. Karbon elyaf ile kuvvetlendirilmiş polibütüleneftalat, çeşitli kemik yapılarında kullanılmaktadır. İmplantasyon sırasında kemik kayıplarını azaltmak için kemik içerisine yerleştirilmektedir. Toksik olmaması ve vücuda minimum zararı nedeniyle, implantasyon uygulamalarda önemli bir kullanım alanı bulmaktadır. Karbon elyafları havacılıkta, Boeing ve Airbus tipi uçaklarda, uluslararası uzay istasyonlarında, uydularda, uçak motor kaplamalarında ve Boeing delta programları gibi uzatılabilir taşıma araçlarında kullanılmaktadır. Bunun yanında spor alanında ise, golf sopalarında, rüzgar sörfü ekipmanlarında, bisiklet bileşenlerinde, kayak ekipmanlarında ve tenis raketlerinde kullanılmaktadır (Yaman vd., 2007).

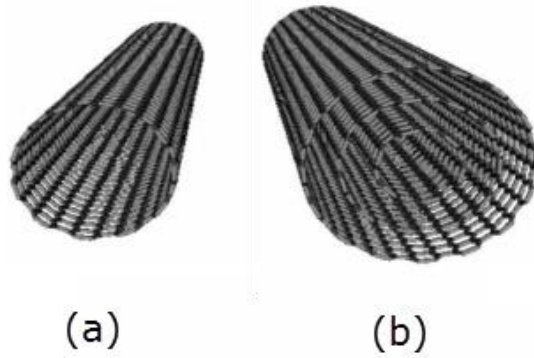
3.5. Karbon Nanotüpler (KNT)

Bilim dünyası nano boyuttaki partiküllerden oluşan karbon nanotüpler ile 1991 yılında Lijima'nın çalışmaları neticesinde tanışmıştır. Karbon nano tüpler Şekil 3.9'daki bal peteği formunda grafit tabakası levhasının sarılması ile meydana gelmektedir. Grafit tabakasını oluşturan atomlar altıgen geometriye sahip grafenlerden oluşmaktadır (Çelep, 2007; Örs, 2009).



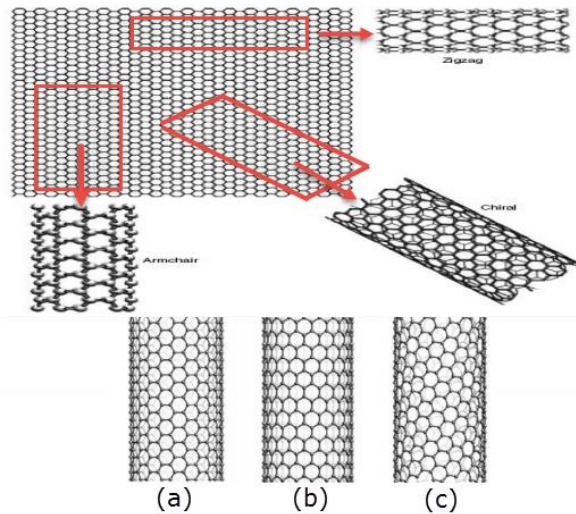
Şekil 3.9. Grafit tabakası (Örs, 2009).

KNT' ler; nanometre boyutlarında elde edilmiş çok küçük karbon lifleridirler. Boyutları birkaç mikron veya milimetre uzunluğunda ve çapları nanometre boyutunda olan içi boş yapılarıdır. Nano tüplerin boyutları, genellikle 2-50 nm arasındadırlar ve en çok 1 mm'ye kadar değişmektedirler. Bal peteği formundaki tek bir grafit levhanın sarılmasından elde edilen nano tüplere tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT) adı verilmektedir. (ÇDKNT) ise nanotüplerin eş merkezli olarak ve katmanlar arası mesafenin yaklaşık olarak 0,34-0,36 nm aralığında, iç içe sarılması neticesinde elde edilen çoklu karbon silindirler olarak adlandırılmaktadır. Çok duvarlı karbon nanotüpler oluşumlarındaki katmanlar ve elde ettikleri daha büyük yarıçaplar sayesinde daha az eğilip bükülebilirler. ÇDKNT' lerin en önemli avantajı ise ekonomik olmalarıdır. Şekil 3.10'da grafit plakalarının silindir şeklinde sarılmaları ile elde edilen ve literatürde cidar sayılarına göre iki grup olarak tanımlanan karbon nanotüpler (TDKNT'ler ve ÇDKNT'ler) gösterilmektedir (Erkan vd., 2005; Şenol vd., 2005; Lijima, 2002; Çelep, 2007; Örs, 2009).



Şekil 3.10. (a) Tek duvarlı karbon nanotüp, (b) çok duvarlı karbon nanotüp (Lijima, 2002; Yeşil, 2010)

TDKNT'ler, ÇDKNT' lere nazaran göre daha dayanıklıdır. Bunun sebebi ise tek grafit tabakasının daireselleştirilmesi sonucunda oluşmasındandır (Garcia vd., 2008). ÇDKNT'ler eş merkezli ikiden fazla grafitten elde edildiği için birbirleri içinden kayabilme olasılıkları dayanımlarını olumsuz yönde etkiler (Ragondet, 2005). Ayrıca karbon nano tüpler yapılarına göre de sınıflandırılmıştır. KNT'lerin özellikleri stereokimyasal yapıları ile ilişkilidir. KNT'ler, kendisini oluşturan grafit silindirin tüp eksenine yönelimine bağlı olan vektörlerine göre üç farklı türde olabilir. Şekil 3.11'de KNT'lerin; koltuk (armchair), zikzak (zigzag) ve kiral (chiral) form yapıları gösterilmiştir (Dresselhaus vd., 1995; Lijima, 2002).



Şekil 3.11. (a) Koltuk, (b) zikzak ve (c) kiral nanotüplerin şematik gösterimi (Dresselhaus vd., 1995; Lijima 2002).

KNT'ler üstün özellikler taşımaktadırlar ama bu özelliklerini kompozit yapılarda uygulamakta bir o kadar güçtür. KNT'lerin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde

dağıtılması, nanotüplerin matris tarafından ıslatılabilmesi, adezyon gibi etkenler, karbon nanotüplerin takviye elemanı olarak göstereceği performansı etkileyen belirleyici unsurlardır. Polimer matris içerisinde homojen olarak dağıtılamayan KNT'ler, elde edildikleri nanokompozitlerin yük dağılımında etkin rol oynayamazlar. Karbon nanotüplerin homojen dağıtılması ile gerilme yığılmalı bölgeler de azaltılabilir. Saf KNT'lerin topaklanma eğilimi Van der Waals kuvvetlerinin etkisi yüzündendir. Bu kümelenme KNT'lerin mekanik özellikleri artırımını azaltacaktır (Andrews ve Weisenberger, 2004; Song ve Yong, 2005; Chen, 2005; Coleman vd., 2006; Njuguna vd., 2007).

KNT'li iletken nanokompozitler, dolgu oranı az miktarda da, ileri düzeyde elektriksel iletkenlik ve yüksek performansta mekanik özelliklere sahiptir. Ama homojen dağılmamaları ve yeterince arayüz oluşturmamaları gibi durumlar en büyük dezavantajları olarak sıralanabilir. Olası bu vaziyet, kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerini etkilemektedir. Literatürlerde yapılan bazı çalışmalarda, katkının kompozit yapıya ait mekanik değerleri azalttığı gözlemlenmiştir. Yapıları gereği içi boş olan KNT'ler basınç, stres ayrıca bükülme ve burulma etkilerinde eğilim olarak çökertmeye yol açmaktadır (Jensen vd., 2007).

3.5.1. Karbon nanotüp çeşitleri

Karbon nanotüpler, yuvarlatılmış tek bir grafit tabakalı olunca tek duvarlı (TDKNT) ve birbirleri etrafına merkezleri eş bir şekilde silindirler biçiminde olunca çok duvarlı (ÇDKNT) olarak adlandırılmaktadırlar.

Tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT)

Çapları 1-2 nm aralığında değişen boyutlara sahip, grafit tabakasının silindir şekilde sarılması sonucunda uçları kapatılmış yapılara TDKNT adı verilmektedir (Ajayan vd., 1999). Zeolit gözenekleri içerisinde sentezlenirler ise çapları 0,4 nm'ye kadar düşürülebilmektedirler (Terrones, 2003). Gauss dağılımı gösteren çap değerlerine sahiptirler (Dresselhaus vd., 2004).

Genellikle altıgen yapıda gruplanmış kristalli grafen demetler halinde bulunurlar (Dresselhaus vd., 2004), Bu demetler içerilerinde 100 ila 500 adet nanotüp barındırabilirler ve birbirlerine Van der Waals kuvvetleri ile tutunurlar. Çizelge 3.8'de TDKNT'lerin özellikleri belirtilmiştir (Akbulut, 2014).

Çizelge 3.8. Tek duvarlı karbon nanotüp özellikleri (Akbulut, 2014).

Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerin Özellikleri		
Özellikler	Değerler	Birimler
Çap dış	1 ila 2	nm
Çap iç	0,8 ila 1,6	nm
Uzunluğu	5-30	µm
Ash	<1,5	%
Saflik değeri	>90	%
İlave TDKNT içerik değeri	>5	%
Amorf yapıda bulunan	>3	%
Spesifik yüzey alanı	407	m ² /g
Elektriksel iletkenliği	>10 ⁻²	S/m

Çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT)

Çapları birbirlerinden farklı eş merkezli TDKNT' lerin birbirleri içerisine geçmiş şekildeki yapılara ÇDKNT denir. En az iki ve daha adetli yapıdaki çeperi bulunan malzemelerdir TDKNT' lere göre farklı bazı özelliklere sahiptirler (Dresselhaus vd., 2004).

Komşu duvarlar arası etkileşimlerin az olmasından dolayı çeperlerin kendileri diğerinden bağımsız dönme ayrıca ötelenme hareketleri yapabileceği belirtilmektedir (Kuchibhatla vd., 2007). ÇDKNT' ler hakkında Çizelge 3.9' da genel bilgiler belirtilmiştir (Akbulut, 2014).

Çizelge 3.9. Çok duvarlı karbon nanotüp özellikleri (Akbulut, 2014)

Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerin Özellikleri		
Özellikler	Değerler	Birimler
Çap dış	10 ila 20	nm
Çap iç	5 ila 10	nm
Uzunluğu	10 ila 30	µm
Ash	<1,5	%
Saflik değeri	>95 nanotüp oranı >97 karbon oranı	%
Renk	Siyah	
Özkütle	≈2,1	g/cm ³
Spesifik yüzey alanı	>200	m ² /g
Elektriksel iletkenliği	>10 ⁻²	S/m

TDKNT' ler için bahsedilen özelliklerin çoğu ÇDKNT' ler için de geçerlidir (Ren vd., 2011).

Çekme mukavemeti ÇDKNT' lerde TDKNT' lerden düşüktür. Sebebi ise, ayrı ayrı her katmanın, birbirine göre benzer kinetik özelliklerde olmaları sonucunda sürtünme sırasında birbirleri üzerinde kaymaların oluşmasıdır görülmesidir (Seunghun vd., 2007).

3.5.2. Karbon nanotüplerin yapısal özellikleri ve kimyasal davranışları

KNT' lerin kimyasal davranışları ve yapısal özellikleri göz önüne alınırken, TDKNT veya ÇDKNT' lerin sergilendikleri davranışları kesin olarak ayırt edebilmek çok zordur. Literatürde de, TDKNT' lerin kabiliyetlerinin ÇDKNT' lerde de benzerlik gösterdiği vurgulanmıştır (Valcarcel vd., 2007). Yapıları itibariyle KNT' ler apolar bağlara ve yüksek en/boy oranlarındadırlar. Suda çözünmedikleri için saflaştırma ve karakterize etme işlemleri, surfaktan benzeri gibi kimyasallar yardımı ile olabilmektedir. KNT' ler organik yapıda oldukları için kovalent bağlanmalarla modifiye edilebilirler. (Çalhan, 2015).

Sahip olduğu geniş yüzey alanları ve yüksek adsorplama özelliği ile karbon nanotüpler, geleneksel katı faz adsorban materyallerine alternatif olabilecek seviyededirler. Çünkü, KNT' ler modifiye edilerek istenilen türde fonksiyonel yüzey elde edilebilirler (Niyogi vd., 2002).

3.5.3. Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri

Grafit yapısında bulunan herbir karbon atomunun, kendisine komşu atomalar ile kimyasal olarak kuvvetli bağ kurmuş olması yapısının bal peteği formunda olmasındandır. Kendilerini oluşturan kuvvetli bağ yapıları sayesinde esneklikleri çok yüksektir. KNT' ler içerisinde dayanıklılığı yüksek olan ÇDKNT'lerin sağlamlığı çelik malzemedenden daha fazladır. Aynı zamanda kendisine uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği direnç daha fazladır. Grafit malzemenin young modülünde elde edilen yüksek performans kendisinden çapı dahada küçük olan ÇDKNT'lerde daha yüksek oluşu yapılmış olan deneylerde gözlemlenmiştir. Çapları küçük olan KNT' ler için, sertliğinin, elastikliğinin ve dayanıklılığının yüksek performanslarda olması spesifik özellikleri arasındadır. Bükülebilmeleri sayesinde uğradıkları şekil değişiklikleri bu özelliklerini eksiltmediği gibi bükülebilmesi sayesinde elastiklik modülleri artmaktadır. Yüksek esneklik özellikleri sayesinde sıkıştırılabilmeleri mümkündür. Aşırı sıkıştırma sonrası deforme olurlar. Esneklikleri elmas malzeme değerlerine yakındır. Bilinen en yüksek elastiklik modülü değerleri ise 1 ila 1,4 TPa civarındadır. Kararlılıkları yaklaşık olarak 3000°C civarında olmakla beraber çekme dayanımları 30 GPa seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Yoğunluk olarak ise çeliğe nazaran 6' da 1 oranındadırlar (Hançer, 2010).

3.5.4. Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri

Elektrik iletkenlikleri yarı metal yapıda olmaları sebebi ile metal malzemeler ile yarı iletkenliğe sahip malzemeler aralığında bulunmaktadır. Çok zor ortamlarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda doğruluğu kontrol edilebilen elektriksel performansları gayet başarılı sonuçlar vermektedir. Çaplarının boyutlarına göre bu değerler değişkenlik göstermektedir. Yapılarının ve geometrilerinin belirgin olması ölçüm hassasiyetinde önemli rol oynamaktadır (Kiselev vd., 2001).

3.5.5. Karbon nanotüplerin ısısal özellikleri

Yüksek ısısal performansa sahip olan nanotüpler için boyutlarının küçük olması oluşacak kuantum etkileri sayesinde ısı iletkenlikleri ve düşük sıcaklık değerlerinde yapılarının tek boyutlu kuantımlanmasının göstergesidir. Oda ortamı sıcaklıklarında yapılan ölçümlerde göstermiş oldukları ısısal özellikleri son derece başarılı sonuçlar vermektedir. Grafit ve elmasın değerlerinden dahada yüksek ısısal değerler elde edilmektedir. Ölçümlerde, tek duvarlı yapıda olanlar 200 W/mK, çok duvarlılar ise 300 W/mK değerinin üzerinde sonuçlar vermektedir (Hone, 2004).

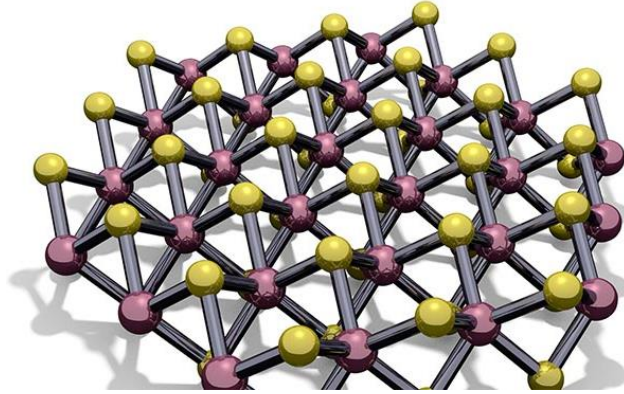
3.5.6. Karbon nanotüplerin uygulama alanları

Kompozit yapılarda, tıp dünyasının çeşitli uygulama alanlarında, elektronik parça imalatında ve hidrojen gazının depolanmasında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Polimerlerin en önemli dezavantajı olarak bilinen elektriksel iletkenlik zaaflarını içerisine ilave edilerek elde edilen kompozitler sayesinde önemli oranda geliştirmektedirler. Bio medikal uygulamalarda ajan görevi üstlenerek istenilen bölgeye ilaçları taşıma görevlerini yerine getirmeleri tıp dünyası için önem arz etmektedir (Yağlıkcı, 2012).

3.6. Molibden Disülfid

Bilinen en iyi katı yağlayıcı molibden disülfid (MoS_2) olarak tanımlanmaktadır (Bahadır ve Gong, 1992). Kristal tabakalı yapısının bir özelliği olan yağlama kapasiteleri, yani kolay ayrılma ve düşük sürtünme özellikleri ile bilinirler (Winer, 1967).

Şekil 3.15.'de belirtildiği gibi, her kristal tabaka, ayrı ayrı bir molibden atom tabakasından ve her molibden tabakası da iki tabaka kükürt atomundan oluşur. Aynı kristal tabakada uzanan atomlar birbirine yakın paketlenmiştir ve birbirlerine güçlü bir şekilde bağlıdır, ancak her bir tabaka birbirinden uzaktır ve zayıf Van Der Waals bağları nedeniyle kolaylıkla birbiri üzerinde kaymaktadırlar (İnovatifkimyadergisi, 2019).



Şekil 3.12. Molibden disülfid tabakası görseli (İnovatifkimyadergisi, 2019).

Literatürde, molibden disülfid (MoS_2) katkısının, politetrafloretilen (PTFE), poliamit (PA), poliester (UP) ve poliimit (PI) polimerlerinin aşınma ve sürtünme özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır (Liu vd., 1991; Bahadur ve Gong, 1992; Zhu vd., 2006). Bahadur ve Gong, (1992), yaptıkları çalışmalarında, PTFE, PA ve PI polimerlerine ilave ettikleri MoS_2 katkısının aşınmayı azalttığını ve ayrıca katkı miktarının aşınma direnci üzerinde etkili olduğunu, PA polimerinin aşınma oranının başlangıçta artan MoS_2 miktarı ile azaldığını fakat sonrasında tekrar arttığını ve optimum miktarın ağırlıkça %15-20 oranlarında elde edildiğini belirtmişlerdir. Zhu vd., (2006), ise, PI polimerine ilave ettikleri MoS_2 katkının, kuru ve sulu ortam şartlarında aşınma oranını azalttığını belirtmişlerdir. Optimum MoS_2 miktarının ağırlıkça %10-15 oranlarında olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık, Liu vd., (1991), çalışmalarında, MoS_2 katkılı PA6 kompozitinin sürtünme katsayısının azaltılmasında çok verimli olmadığını ve aşınma miktarını artırdığı belirtilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneylerde, matris malzemesi olarak, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama proseslerine uygun olan poliamit 66 (PA66) polimer kullanılmıştır. PA66 polimeri, yerleşkesi Tuzla/İstanbul'da bulunan Biesterfeld firmasının temin ettiği Dupont firmasının ürettiği Zytel® 101 NC010 kodlu polimerdir. Firma tarafından beyan edilen teknik verilere göre; kullanılan PA66 polimerinin yoğunluk değerinin ISO 1183 satandardında $1,14 \text{ g/cm}^3$ olduğu belirtilmiştir. Ergime sıcaklığı $280-300^\circ\text{C}$ ' dir.

Katkı malzemeleri olarak karbon elyaf, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon malzemeler kullanılmıştır. Kırpılmış karbon elyaf (KE) olarak, DOWAKSA firmasından temin edilen AC-4102 kodlu malzeme kullanılmıştır. Firma teknik verilerine göre; kırpılmış elyaf boyları 6 mm'dir. ISO 10119 test metoduna göre yoğunluğu $1,77 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Çok duvarlı karbon nano tüp (ÇDKNT) olarak Sigma-Aldrich firmasından temin edilen %98'den daha büyük saflıkta, $2,1 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğunda, $280-350 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanına sahip, ortalama dış çapı $10 \pm 1 \text{ nm}$, iç çapı $4,5 \pm 0,5 \text{ nm}$ ve uzunluğu 3-6 μm olan malzeme kullanılmıştır. Molibden disülfid yine Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Tanecik boyutları, en az %98'i 2 μm 'den küçük boyutta ve toz halindedir. Yoğunluğu $5,06 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Silikon malzeme ise, DOW CORNING firmasından temin edilen MB050-011 kodlu masterbatch malzemedir.

4.2. Ekstrüzyon Prosesi

PA66 kompozit granüllerin imalatında Şekil 4.1.'de belirtilen Coperion Werner & Pfleiderer ekstrüder makinası kullanılmıştır. 3 beslemeli, 11 ısıtma bölgesi bulunan makinanın L/D oranı 24'tür. Ekstrüze edilen kompozitlerin granül halini alması için ekstrüder makinası sonunda Scheer marka dilimleme cihazı mevcuttur.



Şekil 4.1. PA66 kompozit numunelerin üretildiği ekstrüder cihazı.

Gama-Alfa firmasında üretimi yapılan kompozitlerin üretim parametreleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Kompozitlerin üretiminden önce PA66 polimerinin nem alma işlemi etüv fırınında 4 saat süresince 80 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. Ekstrüzyon makinası parametreleri.

Parametreler	1	2	3,4	5,6	7,8	9,10
Sıcaklık (°C)	265	270	275	280	280	285
Vida Devri (dev/dk)	520	400	400	590	510	500
Tork (%)	59	62	62	62	62	62
Kapasite (Kg/h)	15	15	15	15	15	15
Eriyik Basıncı (KBar)	5	9	9	11	10	9
Eriyik sıcaklığı (°C)	230-232	230-232	232-234	234-236	237-239	240-243
Peletizör Bıçak Devri (dev/dk)	110	110	110	110	110	110
Su Banyosu Sıcaklığı (°C)	31	31	31	31	31	31

Çalışmada kullanılan PA66 ve kompozitlerinin kısaltmaları Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Polimer malzeme türleri ve kısaltmaları.

Malzeme	Kısaltma
Poliamit 66	PA66
Poliamit 66 + %10 Karbon Elyaf	PA66/10KE
Poliamit 66 + %20 Karbon Elyaf	PA66/20KE
Poliamit 66 + %30 Karbon Elyaf	PA66/30KE
Poliamit 66 + %30 Karbon Elyaf + %0,5 Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp	PA66/30KE/0,5ÇDKNT
Poliamit 66 + %30 Karbon Elyaf + %0,5 Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp + %3 Molibden Disülfid	PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS ₂
Poliamit 66 + %30 Karbon Elyaf + %0,5 Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp + %3 Silikon	PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon

4.3. Enjeksiyon Prosesi

Ekstrüzyon işlemi sonrasında, Şekil 4.2’de resmi verilen Haitian MA2000 marka enjeksiyon makinesinde standartlara uygun olarak deney numuneleri üretilmiştir. Bu üretimler Gama-Alfa firmasında gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon prosesinden önce tüm numuneler etüv fırınında 4 saat süresince 100 °C ‘ de nem alma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.2. Enjeksiyon makinesi.

Şekil 4.3.’de çekme ve darbe numunelerinin üretildiği plastik enjeksiyon kalıbı verilmiştir.



Şekil 4.3. Çekme ve darbe test çubuklarının üretildiği plastik enjeksiyon kalıbı.

Şekil 4.4.’de ise enjeksiyon işlemi sonrası elde edilen test numuneleri gösterilmiştir. Çekme deneyi numuneleri TS ISO 1926 (ASTM D 638) standardına, darbe deneyi numuneleriye TS 1005 standardında belirtilen verilere göre tasarlanmış ve üretilmiştir.



Şekil 4.4. Çekme ve darbe test çubuklarının görseli.

Uretimlerde kullanılan enjeksiyon kalıplama parametreleri Çizelge 4.3.'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Enjeksiyon kalıplama parametreleri.

PA66 polimeri için enjeksiyon makinesi parametreleri									
Enjeksiyon makinesi sıcaklıkları (°C)					Basınç Parametresi (bar)	Hız Parametresi (m/s)	Basınç Ütüleme (bar)	Çevrim Zamamı (sn)	
Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4	Bölge 5	120	55	30	40	
270	275	280	285	290					
PA66 katkılı kompozit numuneler için enjeksiyon makinesi parametreleri									
Enjeksiyon makinesi sıcaklıkları (°C)					Enjeksiyon Basıncı (bar)	Enjeksiyon Hızı (m/s)	Ütüleme basıncı (bar)	Çevrim Süresi (sn)	
1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	5.Bölge	140	66	40	40	
285	290	295	300	305					

4.4. Yoğunluk Testi

PA66 polimeri ve PA66 kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri, ISO 1183 (ASTM D 792) standardına uygun olarak ölçülmüştür. Testte Arşimet prensibi uygulanmıştır. Şekil 4.5.'te gösterilen, kapasitesi 220 g ve hassasiyeti 0,0001g olan SHIMADZU AUX-320 terazi kullanılarak yoğunluk deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yoğunlukları önce kuru ortam şartlarındaki ağırlıklar değerleri ile daha sonra su içindeki ağırlıkları ölçüldükten sonra Eşitlik 4.1.'de belirtilen formül neticesinde hesaplanmıştır.

$$d = [A/(A - B)] \quad (4.1.)$$

d: Yoğunluk, g/cm³,

A : Numunenin havadaki ağırlığı, g,

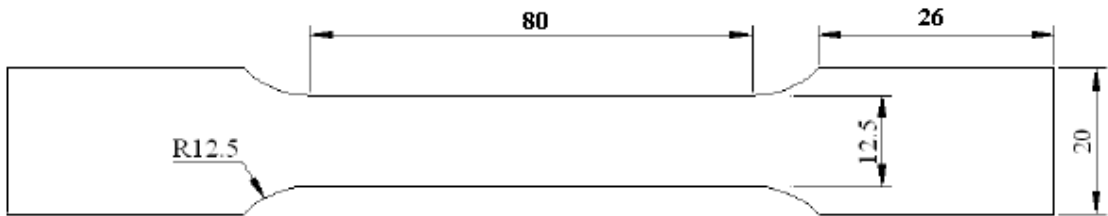
B : Numunenin su içerisindeki ağırlığı, g.



Şekil 4.5. Yoğunluk ölçüm cihazı.

4.5. Çekme Deneyi

Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. firmasının plastik malzeme test laboratuvarında yapılmıştır. 4 mm kalınlığında ve Şekil 4.6.'da diğer ölçüleri gösterilen numuneler TS ISO 527 standartında belirtildiği gibi test üretilmiştir.



Şekil 4.6. Çekme deneyi numune ölçüleri (ölçüler mm).

Deneyde, cihazın çenelerine tutturulan numuneler için çekme hızı 5 mm/dak' dır. Deneyler sonucunda, çekme mukavemeti, kopma uzaması (%) ve elastiklik modülü sonuçları gözlemlenmiştir. Testler, Şekil 4.7.'de gösterilen ZWICK/ROEL 1C0711001 cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Çekme deneyi cihazı.

Çekme mukavemetleri değerleri Eşitlik 4.2.'de verilen eşitliklerle hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\varphi} = \frac{F}{A_0} \quad (4.2.)$$

σ_{φ} : Çekme mukavemeti, MPa,

F: Yük, N,

A_0 : Numune kesit alanı, mm^2 ,

Elastiklik modülü, deney numunelerinin uygulanan yük altındaki elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç veya rijitlik olarak tanımlanmaktadır. Elastiklik modülü değerleri Eşitlik 4.3.'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E = \tan \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.3.)$$

E: Elastiklik modülü, N/mm^2 ,

σ : Gerilme, N/mm^2 ,

ε : Birim şekil değiştirme oranı, şeklinde ifade edilmektedir.

Kopma uzaması değerleri ise Eşitlik 4.4.'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

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

$$\Delta l = l_s - l_0$$

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. Eğme Deneyi

Eğilme deneyleri Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. firmasının plastik malzeme test laboratuvarında yapılmıştır. Eğme testinde cihaza yerleştirilen numuneler için orta noktasından eğme hızı 5 mm/dak olarak uygulanmıştır. Testler Şekil 4.8.'de gösterilen ZWICK/ROEL 1C0711001 cihazda TS ISO 178 standartına göre uygulanmıştır.



Şekil 4.8. Eğme deneyi cihazı.

4.7. Darbe Deneyi

İzod darbe deneyleri için 4 x 10 x 80 mm boyutlarındaki parçalar standartlara uygun bir şekilde enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Numunelere öncelikle darbe deneylerinin yapılabilmesi için Şekil 4.9.'da resmi verilen CEAST marka çentik açma cihazını ile çentik açma işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.9. Çentik açma cihazı.

Çentik açılan numunelere, Şekil 4.10.'da resmi verilen ZWICK/ROEL HIT5.5P model numaralı cihazda darbe testi yapılmıştır. TS 180 standardında belirtilen şartlarda yapılan testlerde çekicinin düşme hızı $2,75 \text{ kJ/m}^2$ 'dür.



Şekil 4.10. Darbe deneyi cihazı.

4.8. Yük Altında Eğilme Sıcaklığı Testi (HDT)

HDT testi, numunelerin belirli sıcaklık değerlerinde uygulanan basınç ile parçalarda oluşan şekil değişikliğinin hangi sıcaklıkta olduğunun tespitinin gözlemlendiği testtir. Ebatları $130 \times 13 \times 4 \text{ mm}$ değerlerindeki numuneler, TS 2468-1, EN ISO 75-2 standartında belirtilmiş şartlarda Şekil 4.11.'deki HDT cihazında test edilmiştir. Numuneler $1,8 \text{ MPa}$ basınç altında teste tabi tutulmuştur.

Deney çubuklarının kısa süreli ısı direncinin belirlenmesini amaçlanan HTD testi genellikle kalite kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu testten elde edilen veriler polimerlerin yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını göstermektedir. HTD testinde numunelerin yük altındaki sıcaklık artışlarında eğilme sıcaklığı değerini tespit edebilmek için yağ banyosu içerisinde bulunması gerekmektedir. Yağ banyosunun sıcaklık değeri artış veya azalışları otomatik ısı kontrol cihazlarıyla gerçekleştirilmektedir. Aralarında 100 mm mesafe bulunan iki destek üzerine yerleştirilen numunelerde oluşması beklenen uygun eğilme değerini göstergede görebileceğimiz bir cihaz kullanılmaktadır. Sıcaklık ölçümü dijital termometre ile $^{\circ}\text{C}$ cinsinden yapılmaktadır. HTD testinde numunelerin tam orta noktasından standartlardaki basınçlar uygulanır. Numunelerimiz $1,8 \text{ MPa}$ 'lık basınç değerinde test edilmiştir. Yağ banyosu sıcaklığı ise önce oda sıcaklığında iken her bir dakika da 2°C sıcaklık artırılmaktadır. Deney numunesinin yük uygulanan merkez bölgesi $0,25 \text{ mm}$ ($0,01 \text{ inç}$) eğildiği andaki sıcaklık değeri testimizde bulmak istediğimiz sonucu vermektedir.

HDT testleri, Tekirdağ'da faaliyet gösteren EUROTEC Mühendislik Plastikleri Sanayi ve Tic. A.Ş. firmasındaki Ceast marka HDT 3 Junior markalı makinede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11. Yük altında eğilme cihazı (HDT).

4.9. Vicat Yumuşama Sıcaklığı Testi

Bu test genellikle termoplastik numunelere yapılmaktadır. Vicat testi için TSE EN ISO 306 standardı kullanılmaktadır. Şekil 4.12.'de görseli verilen prensip ile test edilen numuneler için 4 farklı metot uygulanmaktadır.

Bu metotlar için uygulanan kuvvet ve sıcaklık değerleri şunlardır.

Metot A 50 : Numuneye uygulanan kuvvet 10N ve ısıtma hızı 50°C/saat,

Metot B 50 : Numuneye uygulanan kuvvet 50N ve ısıtma hızı 50°C/saat,

Metot A 120 : Numuneye uygulanan kuvvet 10N ve ısıtma hızı 120°C/saat,

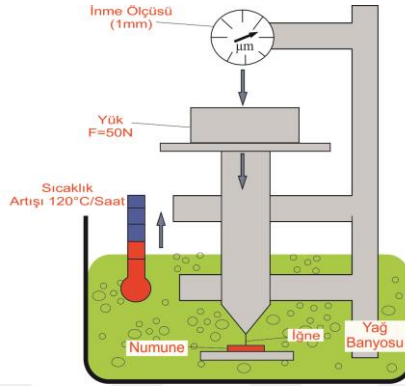
Metot B 120 : Numuneye uygulanan kuvvet 50N ve ısıtma hızı 120°C/saat şeklindedir.

Deney prensibi şu şekildedir ki; seçilen metot için yağ banyosu sıcaklığı kademeli bir şekilde artırılırken, numuneye metotta belirtilen yük uygulanmaktadır. Standartta belirtildiği gibi batma yüzey alanı 1 mm² olan batma piminin, parçaya 1 mm battığı andaki ölçüm değeri °C olarak tespit edilir. Elde edilen değer numunenin Vicat yumuşama sıcaklığı vermektedir. Batma ucu olarak adlandırılan iğnenin alt yüzeyi düz olan, yüzeyi pürüzsüz ve numuneni üst düzlemine paralel şekilde olmalıdır.

Numuneler, Metot B 50 test metoduna göre yapılmıştır. 80 x 10 x 4 mm ebatlarındaki çubuklar yağ banyosu içerisine yerleştirilmiştir. Oda sıcaklığından başlayarak basamak basamak

saatte 50 °C ısı artışları sonrası iğnenin plastikte 1 mm derinliğe indiği zamanki sıcaklık değeri Vicat yumuşama sıcaklığını vermitir.

Deneyle, EUROTEC Mühendislik Plastikler Sanayi ve Tic. A.Ş. firmasındaki Ceast marka HDT 3 Junior markalı cihazda yapılmıştır.



Şekil 4.12. Vicat yumuşama sıcaklığı tayini şematik gösterimi.

4.10. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi

PA66 polimeri ve PA66 kompozit numuneleri için uygulanan DSC analizi ısıtma ve soğutma prosesleri aşağıdaki sıralamada belirtildiği gibi gerçekleştirilmiştir.

- Ön ısıtma; dakikada 10°C artış ile 300°C' ye,
- Ön soğutma; dakikada 10°C düşüş ile 0°C' ye düşecek ve 0°C de 2 dk bekletilecek,
- Ölçüm değerleri için; dakikada 10°C artış ile 300°C' ye ısıtıldıktan sonra analiz değerleri alınmıştır.

PA66 polimerinin % kristallenme oranları (X_c), Eşitlik 4.5.'de verilen eşitlikle tespit edilmiştir.

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 \quad (4.5.)$$

ΔH_m = Ergiyik entalpisi,

ΔH_m^0 = PA66 polimeri için %100 kristalin ergiyik entalpisi değeridir ve bu değer PA66 polimeri için $\Delta H_m^0 = 196 \text{ J/g}$ 'dir. (Brandrup ve Immergut, 1989).

Eşitlik 4.5. elde edilen değerler PA66 fazının kristalliğini yansıtmaktadır. KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı kompozitin, % kristallenme oranlarının tespiti Eşitlik 4.6.'da verilen eşitlik yardımı ile bulunmuştur. (Mareri, vd., 1998; Jikan, vd., 2010)

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^\circ \times (1-\alpha)} \times 100 \quad (4.6.)$$

α = Kompozit malzeme içerisindeki katkı oranı (ağırlıkça) belirtmektedir. (Mareri vd., 1998; Jikan vd., 2010).

Deneyler TS-EN-ISO-11357-1 (ASTM D 3417) standardına göre İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Analizlerde, Şekil 4.13.'de resmi verilen, Hitachi marka SII nanotechnology, Extar 6000 serisi DSC6200 model DSC cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.13. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test cihazı.

4.11. Termal Gravimetrik Analizi (TGA)

Deneyde, numunelerin başlangıç ağırlıkları ile analiz sonucundaki ağırlıkları arasındaki kütle değişimleri, referans numune ile ölçüm numunesindeki sıcaklık farkları ölçümleri yapılmaktadır. Analiz sonucundaki veriler ile hazırlanan eğrilere sıcaklık-kütle kaybı eğrileri, bir başka deyişle termogram veya termal bozunma eğrileri adı verilmektedir. Deney numuneleri 5-10 mg arasında eşit gramajlarda hazırlanır. Bu numuneler platin krozeler içerisine yerleştirilir. Krozelerin içerisindeki azot gazı bulunan ortamda sıcaklık altında numunelerin kütle kayıpları incelenir. Testler akış hızı 20 ml/dak. ve dakikada 10°C ısıtılarak 30°C' den 800°C'ye kadar ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar, PA66 polimeri ve PA66 katkılı

kompozitlerinin bozunma sıcaklığını (°C) ve bozunma sıcaklığındaki kütle kaybını ise (%) olarak vermektedir. Numunelerin (%) kütle kayıp değerleri, ASTM E 1131 standardına uygun olarak Eşitlik 4.7.'de verilen formülle hesaplanmıştır.

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

A: Kütle miktarı, %,

Δm : Belirlenen sıcaklıkta ölçülen kütle miktarı, mg,

W: Orijinal numune miktarı, mg.

Deneyler Eurotec Mühendislik Plastikleri firmasında bulunan Şekil 4.14.'de resmi belirtilen Hitachi SII nanotechnology, Exstar6000 serisi TG/DTA6300 model test cihazında yapılmıştır.

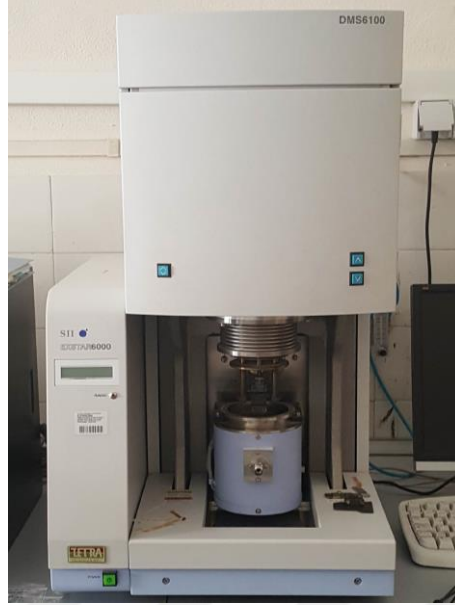


Şekil 4.14. Termal gravimetrik analizi (TGA) test cihazı.

4.12. Dinamik Mekanik Analizi (DMA)

Dinamik mekanik analizi, parçaların viskoelastik yapılarını belirlemek için uygulanan bir yöntemdir. Bu analizde, salınımlı bir kuvvet uygulanan parçanın verdiği tepki ölçülmektedir. Parçaya uygulanan kuvvete gerilim, kuvvet altındaki malzemenin uğradığı deformasyona ise gerinim denilmektedir.

Deneyler, Şekil 4.15.'de resmi verilen Hitachi marka SII nanotechnology, Exstar6000 serisi DMS6100 ölçüm makinesinde İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.



Şekil 4.15. Dinamik mekanik analizi (DMA) test cihazı.

4.13. Aşınma - Sürtünme testleri

PA66 polimeri ile %10-20 ve 30 KE, %0,5 ÇDKNT, %3 MoS₂ ve %3 silikon katkılı kompozitlerin aşınma-sürtünme deneyleri için Ø6 mm ölçülerinde hazırlanan deney numuneleri kullanılmıştır. Deneyde, numune pimlerinin karşısında sürtünme plakası olarak disk şeklinde Ç1040 malzeme bulunmaktadır. Testler kuru kayma şartlarında yapılmıştır. Deney malzemelerin sürtünme katsayısı testlerinin uygulama prensibi şu şekildedir; deneyde kullanılan disk malzemeleri, elektrik motoru tahriki ile dönen diskin üzerine vidalar yardımıyla sabitlenmiştir. Ø6 mm ölçülerindeki pim deney kompozit malzemeleri yük kafasına bağlanmıştır. Test başladığında, pim numunelerinin dönen diske sürtünmekte ve numunelerin bağlandığı kafada aynı yönde hareket etme eğilimi göstermektedir. Eşitlik 6.10'da kullanılan yanal sürtünme kuvveti (F_s), bu ileriye doğru olan hareketi vermektedir. Elde edilen yanal kuvvet ise bir yük hücresi ile ölçülmektedir. Elde edilen ölçüm değerleri test cihazına bağlı bilgisayarda Excel uygulamasına aktarılmaktadır. Testlerde, dakikada 1000 adet yanal yük verisi alınarak, bu yanal yükler test yük değerlerine oranlanarak Excel uygulamasında grafikleştirilmektedir. Sürtünme katsayısı değeri, yanal kuvvetin uygulanan dik kuvvete oranlanmasıdır. Bu değer hesaplanmasında ise Eşitlik 4.8.'de belirtilen eşitlik kullanılmıştır.

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

μ : Sürtünme katsayısı değeri,

F_s : Yanal sürtünme kuvveti, N,

F_N : Normal kuvvet, N, ifade eder.

Aşınma oranını test sonuçlarını elde edebilmek için, testlerden önce, disk ve pim yüzeyleri asetonla temizlenmiş ve yüzeyleri kurutulmuştur. Pimlerin test öncesi ağırlığı (m_1) ve test sonrası ağırlığı (m_2) ölçülmüştür. Test öncesi pim ağırlığından test sonrası pim ağırlığı değeri çıkartılarak aşınma miktarı (Δ_m) hesaplanarak ve Eşitlik 4.9.'daki eşitlikle aşınma spesifik oran değerleri (K_o) hesaplanmıştır.

$$K_o = \frac{\Delta m}{s\rho F} \quad (4.9.)$$

K_o : Spesifik aşınma oranını, mm^3/Nm ,

Δ_m : Aşınma miktarını, g,

S : Kayma mesafesi, m,

ρ : Test numunesinin yoğunluğu, g/cm^3 ,

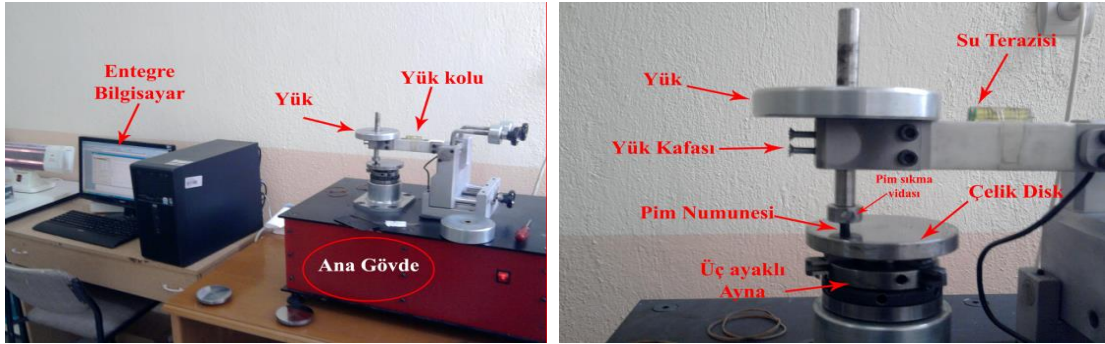
F : Uygulanan kuvvet, N, değerlerini ifade eder.

Aşınma deneyleri için, çalışmada kullanılan kayma mesafesi, uygulanan yük ve kayma hızı gibi test parametreleri Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Aşınma-sürtünme deneyi parametreleri.

Parametreler	Değerler
Uygulanan yükler (N)	20, 30 ve 40
Kayma hızları (m/s)	0,4; 0,8 ve 1,2
Kayma mesafesi (m)	1000

Aşınma-sürtünme deneyleri, Şekil 4.16.'da resmi verilen Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesindeki cihazda yapılmıştır.



Şekil 4.16. Pim-disk aşınma cihazı.

4.14. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi

PA66 polimeri içerisine ilave edilen KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon malzemelerin yapı içindeki dağılımlarını belirlemek için numuneler taramalı elektron mikroskop ile analiz edilmiştir. Analizde incelenen bu deney numuneleri için, kırık yüzeylerde çekme deneyi sonrasındaki parçalar ve aşınma testi sonucudaki aşınmış pim yüzeyleri kullanılmıştır.

Taramalı elektron mikroskop analizleri, Dumlupınar Üniversitesi, İleri Teknoloji Tasarım Araştırma Geliştirme ve Uygulama Merkezi laboratuvarlarında bulunan, Şekil 4.17.'da gösterilen FEI NOVANANOSEM 650 model makede yapılmıştır.



Şekil 4.17. Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı.

SEM analizinde dağılımın incelenebilmesi için, tüm parçaların ölçümü yapılacak yüzeylerine 40A° boyutunda altın kaplama işlemini uygulanmıştır. Deney numunelerinin

kaplama işlemi 36 sn süre boyunca argon gaz ortamında 30 mA yük ile yapılmıştır. Altın kaplama işlemi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Seramografi Laboratuvarındaki ve Şekil 4.18.'de görseli verilen Agar Sputter Coater altın kaplama makinesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.18. Altın kaplama makinesi.

5. DENEY SONUÇLARI

5.1. Yoğunluk Testi Sonuçları

PA66 ile PA66 kompozitleri için elde edilen yoğunluk değerleri Çizelge 5.1.'de belirtildiği şekildedir. Yoğunluk değeri 1,1142 g/cm³ olan PA66 polimerine, ağırlıkça sırası ile %10 KE, %20 KE ve %30 KE ilave edilmesi ile yoğunluk değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. KE ilaveli kompozitler içerisinde en yüksek yoğunluk değeri %30 KE katkılı PA66 kompozitinde elde edilmiştir. PA66/30KE yoğunluğu %11,7 oranında artarak 1,2447 g/cm³ olarak elde edilmiştir.

%0,5 ÇDKNT ilavesi ile PA66/30KE kompozitinin yoğunluğu %1,8 oranında artmış ve 1,2674 g/cm³ olarak elde edilmiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitine %3 oranında MoS₂ ilavesi ile kompozitin yoğunluğu %0,4 oranında artarak 1,2717 g/cm³ olarak elde edilmiştir. PA66 polimerine nazaran, yoğunluğu daha yüksek olan MoS₂ dolgulu kompozitin yoğunluğunun arttığını tespit edilmiştir. Basavaraj vd., (2013), MoS₂ katkısının, PA66/1KS kompozitinin yoğunluğunu arttırdığını ve bu artışın %1 MoS₂ katkısı ile %0,5; %3 MoS₂ katkısı ile %1 oranında olduğunu belirtmişlerdir. %3 silikon ilavesi ise PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitin yoğunluğunu %2,3 oranında azaltmış ve %3 silikon ilaveli PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitin yoğunluğu ise 1,2383 g/cm³ dür.

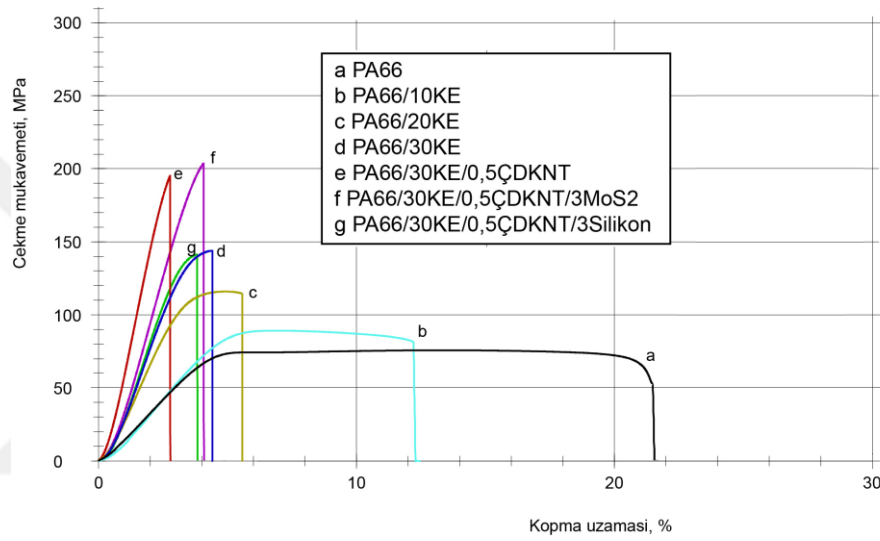
Çizelge 5.1. PA66 ile PA66 kompozitlerin yoğunluk değerlerinin verileri.

Numuneler	Elde edilen yoğunluk değerleri (g/cm ³)
PA66	1,1142
PA66/10KE	1,1408
PA66/20KE	1,1975
PA66/30KE	1,2447
PA66/30KE/0,5ÇDKNT	1,2674
PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS ₂	1,2717
PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon	1,2383

5.2. Mekanik Test Sonuçları

Şekil 5.1.'de PA66 ve PA66 kompozitlerinin çekme mukavemeti – uzama grafiği belirtilmiştir. Şekildeki gibi PA66' ya eklenen KE, ÇDKNT ve MoS₂ yapıyı sünek halden gevrek hale dönüştürmüştür. Liang vd., (2014), farklı oranlarda KE ilave ettiği PA6 kompozitlerinde de

benzer sonuçları belirtmiştir. PA6 polimeri sünek bir davranış gösterirken PA6/KE kompozitleri gevrek davranış göstermişlerdir. Rijit katkıların veya fiberlerin ilave edilmesi ile polimerin zincir hareketliliğinin engellendiğini, bu durumun kompozit içerisinde mikro-çatlak oluşumuna sebep olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, matris içerisinde çatlak oluşumunun diğer bir nedeninin, fiber sonlarında artan gerilim konsantrasyonu olduğu belirtilmiştir. Özellikle fiberi çevreleyen matriste çatlağın boyutu kritik seviyeye ulaştığında, matrisin uygulanan yüke direnç gösteremediği ve çatlakların bu bölgeden başladığı belirtilmiştir.

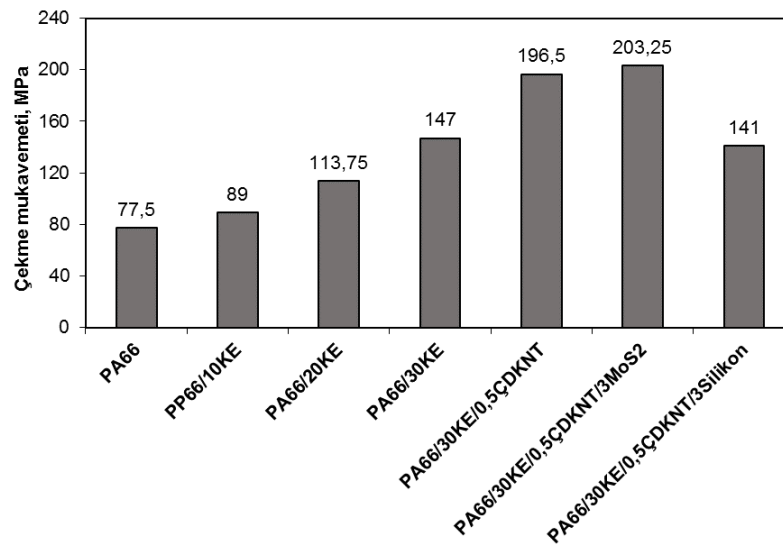


Şekil 5.1. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin çekme mukavemeti - uzama grafiği.

Şekil 5.2.'de ise PA66 polimeri ile PA66 kompozitlerinin çekme mukavemeti sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katkısız PA66 polimerinin çekme mukavemeti KE ilavesi ile artmıştır. %10 – 20 ve 30 KE ilavesi, katkısız PA66 polimerinin çekme mukavemetini sırasıyla %14,8; %46,8 ve %89,7 oranlarında arttırmıştır. PA66 polimerinin 77,5 MPa olan çekme mukavemeti değeri, %10 KE katkısı ile 89 MPa, %20 KE katkısı ile 113,75 MPa ve %30 KE katkısı ile 147 MPa değerlerinde elde edilmiştir. Chen vd., (2007), çalışmalarında PA6/PPS karışımına ilave edilen %25 ve %30 KE katkısı çekme mukavemetini sırasıyla %18 ve %80 oranlarında arttırdığı belirterek benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Bunun sebebini ise KE katkısı ile PA6/PPS karışımının rijit hale gelmesi olarak açıklamışlardır. Suresha vd., (2010), PA66/PP karışımı içerisine %2 nanoclay ilavesi ile 22 MPa elde ettikleri çekme mukavemeti değerinin, bu kompozite ilave edilen %10 KE katkısı ile %122 oranında artarak 49 MPa'ya yükseldiğini belirlemişlerdir. Benzer sonuçlar Liang vd., (2014), tarafından da belirtilmiştir. PA6 içerisine kattıkları oranları birbirinden farklı KE katkısı ile çekme dayanımı değerleri arttırmıştır. %20 KE

katkısı ile çekme dayanımının %50 oranında arttığı belirtilmiştir. Fiberlerin, kompozitin dayanımının artmasında önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Fiber ve matris arasındaki iyi bağlanmanın yük uygulandığında gerilim transferini artırdığını belirtmişlerdir.

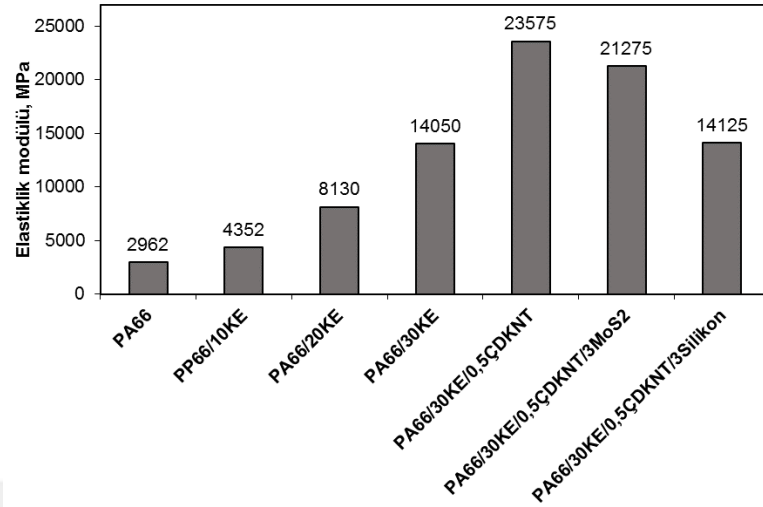
PA66/30KE kompoziti içerisine ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkısı ile çekme mukavemeti değeri %33,7 oranında artmıştır. PA66/30KE kompozitinin 147 MPa olan çekme mukavemeti değeri, %0,5 ÇDKNT ilave edilmesiyle 196,5 MPa olarak elde edilmiştir. Choi vd., (2014), yaptıkları çalışmada, %1 oranında ÇDKNT katkılı PA66/ÇDKNT-PBC kompozitin çekme mukavemetinin, katkısız PA66 polimerine göre %46 oranında arttığını belirtmişlerdir. Bu artışın sebebini, ÇDKNT'lerin PA66-PBC polimeri ile iyi bir bağ oluşturması olarak açıklamışlardır. Zhang vd., (2004), PA66 polimerinin 18 MPa olan çekme mukavemeti değerinin, %1 ÇDKNT ilave edilmesi ile %124 oranında artırarak 40,3 MPa olarak elde edildiğini belirtmişlerdir. %3 MoS₂ katkısı, PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin çekme mukavemeti değerini %3,4 oranında arttırmış ve çekme mukavemeti değeri 203,25 MPa olarak elde edilmiştir. Basavaraj vd., (2013), kompozit polimer içerisindeki MoS₂ oranının artması ile çekme mukavemeti değerinin de doğrusal olarak arttırdığını belirtmişlerdir. PA66/1Karbon Siyahı(KS) kompozitin 65 MPa olan çekme mukavemeti değeri %3 MoS₂ katkısı ile %20 oranında artarak 78 MPa elde etmişlerdir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin içerisine ilave edilen %3 silikon katkısı ise, çekme mukavemeti değerini %28,2 oranında azaltarak 141 MPa elde edilmiştir. Bu azalış, silikon katkısının PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin rijit yapısını sünek hale çevirmesine bağlanmıştır.



Şekil 5.2. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin çekme mukavemeti grafiği.

Şekil 5.3.'de katkısız PA66 polimeri ile farklı oranlarda KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66 kompozitlerinin elastiklik modülü sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, katkısız PA66 polimerinin 2962 MPa olan elastiklik modülü değeri, %10 KE ilavesi ile %47 oranında artarak 4352 MPa, %20 KE ilavesi ile %174,5 oranında artarak 8130 MPa, %30 KE ilavesi ile %374,3 oranında artarak 14050 MPa olarak elde edilmiştir. Lingesh vd., (2016), yapmış oldukları çalışmada 80PA66/20PP karışımının 2100 MPa olan elastiklik modülünün, %10 KE ilave ettikleri kompozit malzemede %300 oranında artarak 8400 MPa değerine ulaştığını tespit ederek benzer sonuçlar bulmuşlardır. Zhou vd., (2013), 80PA6/20PPS karışımının 8045 MPa olan elastiklik modülünün, %15 KE katkısı ile %45 oranında artarak kompozitin elastiklik modülünün 11681 MPa'a ulaştığını tespit etmişlerdir. Bu artışın sebebini ise sünek olan PA6/PPS polimerinin KE ilavesi ile daha rijit bir yapıya dönüşmesi olarak açıklamışlardır. Benzer sonuçlar Liang vd., (2014), tarafından da elde edilmiştir. PA6 termoplastiği içerisine kattıkları oranları birbirlerinden farklı KE katkısı elastiklik modülünü artırmıştır. %20 KE içeriğinde elastiklik modülünün %60 oranında arttığı belirtilmiştir. Karbon fiberlerin, PA6 polimerinden daha yüksek dayanıma sahip olmasının bu artışta etkili olduğunu belirtmişlerdir.

PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkısı ile elde edilen kompozitin elastiklik modülü değeri %67,8 oranında artarak 23575 MPa olarak elde edilmiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompoziti içerisine ilave edilen %3 oranında MoS₂ katkısı elastiklik modülünü %9,8 oranında azaltmış ve elastiklik modülü değeri 21275 MPa olarak elde edilmiştir. Basavaraj vd., (2013), ise ağırlıkça %3 oranında MoS₂ eklenmesi ile, PA6/1Karbon Siyahı(KS) kompozitinin elastiklik modülünde %11,4 oranında artış sağlamıştır. Elastiklik modülü değerleri PA6/1KS kompozitinde 2670 MPa iken, PA6/1KS/3MoS₂ kompozitinde ise 2950 MPa elde edilmiştir. Bu artışın sebebi, iyi yağlayıcılık özelliğinden dolayı MoS₂ katkının, katkısız PA 66 polimerini daha sert ve boyutsal olarak daha kararlı hale getirmesi olarak açıklamışlardır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT içerisine %3 oranında silikon katkısı ilavesi ise, kompozitin elastiklik modülünü %40 oranında azaltmıştır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon kompozitinin elastiklik modülü değeri 14125 MPa olarak elde edilmiştir.

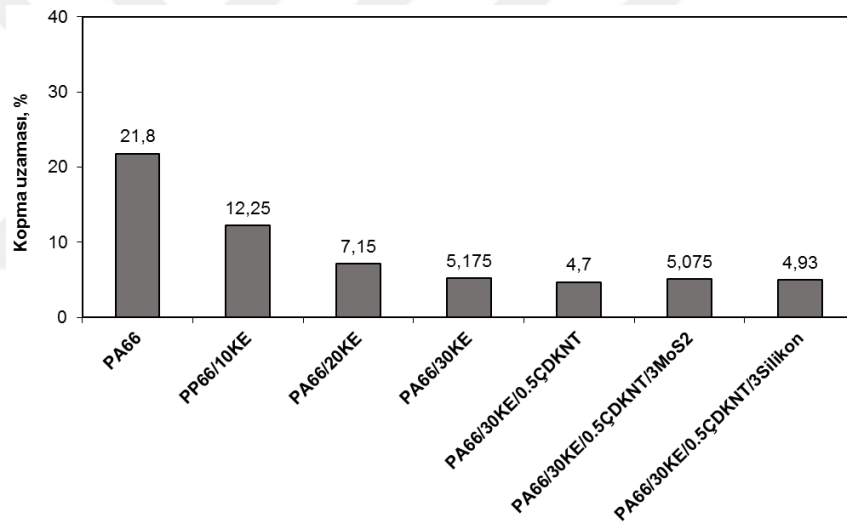


Şekil 5.3. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin elastiklik modülü grafiği.

Şekil 5.4.'te PA66 polimeri ile PA66/10KE, PA66/20KE, PA66/30KE, PA66/30KE/0,5ÇDKNT, PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ ve PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon kompozitlerinin % kopma uzaması sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA66 polimerinin kopma uzaması değeri %21,8 iken, %10 KE ilavesi ile %43,8 oranında azalarak %12,25 değerinde, %20 KE ilavesi ile %67,2 oranında azalarak %7,15 değerinde ve %30 KE ilavesi ile %76,3 oranında azalarak %5,175 değerinde elde edilmiştir. Lingesh vd., (2016), yaptıkları çalışmalarında benzer bir sonuç elde etmişlerdir. Çalışmalarında 80PA66/20(PP) karışımının %14,31 değerinde olan kopma uzaması değerinin, bu karışıma %10 KE ilavesi ile %23,3 oranında azalarak %10,98 olduğunu belirtmişlerdir. Bu azalmanın sebebini ise sünek olan karışımın içerisine ilave ettikleri KE katkının kompoziti gevrek hale getirmesine bağlamışlardır. Suresha vd., (2010), PA66/PP karışımı içerisine 2% nanoclay ilavesi ile %8 olarak elde ettikleri kopma uzaması değerini, bu kompozite ilave edilen %10 KE katkısı ile %12,5 oranında azalarak %7 değerinde elde ettiklerini belirtmişlerdir. Bu azalmanın sebebini ise kompozitin kırılganlığına bağlamışlardır ve bu kırılganlığı, polimer matrisinin plastik deformasyonunun ortadan kalkmasıyla ilişkili olabileceğini belirtmişlerdir.

%0,5 ÇDKNT katkısı ilave edilen PA66/30KE kompozitinin kopma uzaması değeri %9,2 oranında azalmış ve kopma uzaması %4,7 olarak elde edilmiştir. Zhang vd., (2004), PA66 polimerinin %150 olan kopma uzaması değerinin %1 ÇDKNT ilave edilmesi ile %16,6 oranında azalarak %125 değerinde elde edildiğini belirtmişlerdir. Bunun nedeni olarak ÇDKNT katkının polimerin sertliğini artırması olarak göstermişlerdir. Liu vd., (2004), ağırlıkça %2 oranında ÇDKNT ilave edilmesi ile, PA6 polimerinin kopma uzamasını %150 değerinden, %110 değerine

azalttığını belirtmişlerdir. Bunun nedenini ise PA6/1ÇDKNT kompozitinin, PA6 polimerine göre daha gevrek bir yapıya sahip olması olarak açıklamışlardır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompoziti içerisine ilave edilen %3 MoS₂ katkısı kopma uzaması değerini %8 oranında artırmış ve %5,075 değerinde elde edilmiştir. Basavaraj vd., (2013), PA6/1KS kompozitinin %10,3 değerinde olan kopma uzamasını, ağırlıkça %3 oranında MoS₂ dahil edilmesi ile, %118,4 oranında artarak %22,5 olarak elde etmişlerdir. Buna neden olarak da, iyi yağlayıcılık özelliğinden dolayı MoS₂ eklenmesi ile elde edilen kompozitin, katkısız PA66 polimerine göre boyutsal olarak daha kararlı hale gelmesini olarak açıklamışlardır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT içerisine %3 silikon katkısı ise kompozitin kopma uzaması %4,9 oranında artmıştır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin %4,7 olan kopma uzaması değeri, PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon kompozitinde %4,93 olarak elde edilmiştir.

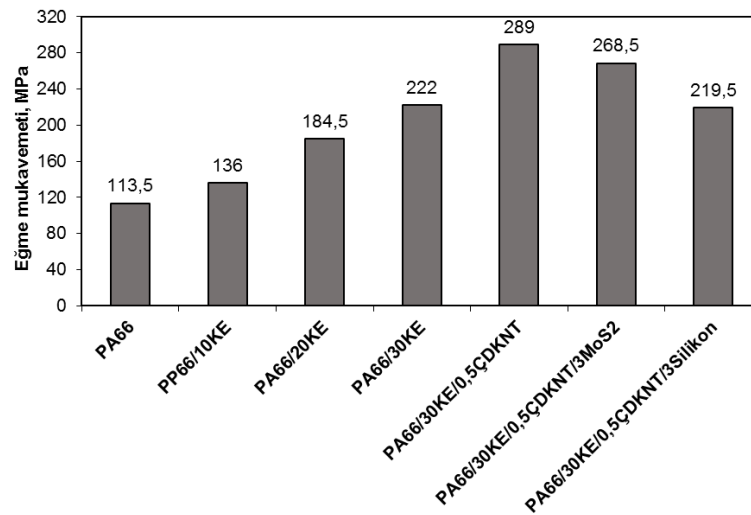


Şekil 5.4. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin kopma uzaması grafiği.

Şekil 5.5.'de ise PA66 polimeri ile PA66 kompozitlerinin eğme mukavemeti sonuçları verilmiştir. Katkısız PA66 polimerinin eğme mukavemeti değerinin, KE ilavesi ile arttığı belirlenmiştir. Bu artışın, KE oranının artması ile daha da arttığı belirlenmiştir. Bu artışların, %10-20 KE katkısı ilavesi ile %19,8 ve %62,5 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. PA66 polimerinin 113,5 MPa olan eğme mukavemeti değerinin, %10 KE katkı ilaveli kompozitte 136 MPa, %20 KE katkı ilaveli kompozitte ise 184,5 MPa olarak tespit edilmiştir. %30 KE katkısında ise eğme mukavemeti değeri, katkısız PA66 polimerine göre %95,6 oranında artmış ve bu kompozitin eğme mukavemeti 222 MPa olarak tespit edilmiştir. Syed vd., (2013), çalışmaları neticesinde tespit ettikleri benzer sonuçları şu şekilde belirtmişlerdir. Bu çalışmada farklı uzunluklardaki %3

oranındaki KE katkısının PP polimerinin eğme mukavemeti değerini arttırdığını belirtmişlerdir. %3 oranlarında 0,06; 0,10 ve 6,0 mm uzunluklarındaki KE katkılı PP karışımlarının, PP polimerinin eğme mukavemeti değerini sırası ile %4, %8 ve %16 oranlarında arttırdığını belirtmişlerdir. Bunun sebebini ise KE katkısının rijit yapısı sayesinde PP polimerini daha rijit bir yapıya dönüştürmesi ve bu rijit yapının daha uzun KE katkısı ile arttığı şeklinde açıklamışlardır. Chen vd., (2007), 70PA66/30PPS karışımına %5 - 25 ve 30 oranlarında KE katkısı ilave ederek elde ettikleri kompozitlerin, PA66/PPS karışımının eğme mukavemeti değerini, KE katkı sırasına göre %9, %26 ve %92 oranlarında arttığını belirtmişlerdir. Bu artışın sebebini ise, KE katkısının yüksek yük taşıma kabiliyeti sayesinde olduğu şeklinde açıklamışlardır.

%0,5 ÇDKNT katkısı ilave edilen PA66/30KE kompozitinin eğme mukavemeti %30 oranında artmıştır. ÇDKNT ilavesi ile, PA66/30KE kompozitinin 222 MPa olan eğme mukavemeti değeri 289 MPa olarak elde edilmiştir. %3 MoS₂ katkısı ise PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin eğme mukavemetini %7 oranında azaltmıştır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompozitinin eğme mukavemeti değeri 268,5 MPa olarak elde edilmiştir. %3 silikon katkısı ile, PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin eğme mukavemeti değeri %24 oranında azaltmıştır. Silikon katkılı bu kompozitin eğme mukavemeti değeri ise 219,5 MPa olarak elde edilmiştir.

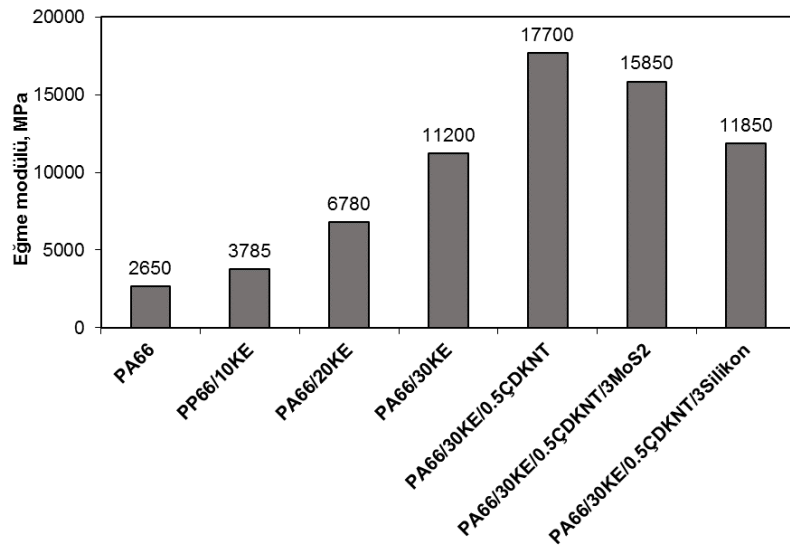


Şekil 5.5. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin eğme mukavemeti grafiği.

Şekil 5.6.'da katkısız PA66 polimeri ile farklı oranlarda KE, ÇDKNT, MoS₂ ve Silikon katkılı PA66 kompozitlerinin eğmedeki elastiklik modülü sonuçları verilmiştir. Şekil'de görüldüğü gibi katkısız PA66 polimerinin eğmedeki elastiklik modülü değeri 2650 MPa iken, %10 KE katkısı ilavesi ile %42,8 oranında artarak 3785 MPa, %20 KE katkısı ilavesi ile %155,8

oranında artarak 6780 MPa, %30 KE katkısı ilavesi ile %322,6 oranında artarak 11200 MPa olarak elde edilmiştir

PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin eğmedeki elastiklik modülü değeri 17700 MPa olarak elde edilmiştir ve ÇDKNT katkısı ilave edilmemiş PA66/30KE kompozitine göre eğmedeki elastiklik modülü değeri %58 oranında artmıştır. Sırası ile %3 MoS₂ ve %3 silikon katkıları ilavesi PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin eğmedeki elastiklik modülü değerini %10,5 ve %33 oranlarında azaltmıştır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin eğmedeki elastiklik modülü değeri %3 MoS₂ katkısı ile 15850 MPa, %3 silikon katkısı ile 11850 MPa elde edilmiştir.

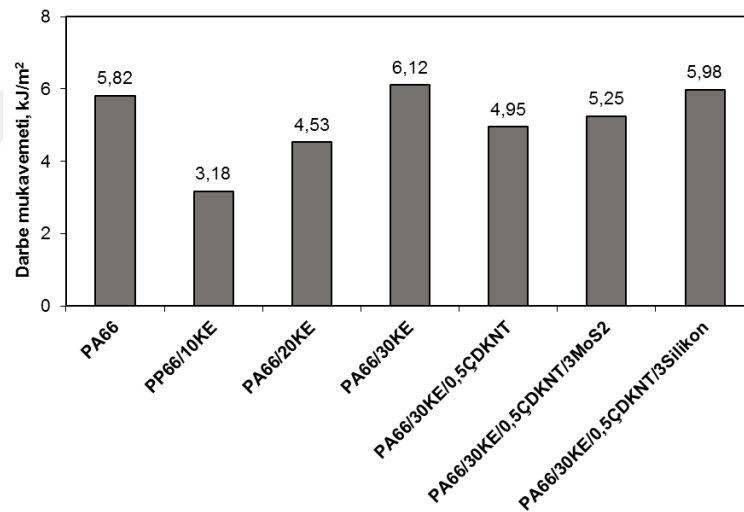


Şekil 5.6. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerin eğmedeki elastiklik modülü grafiği.

Şekil 5.7.'de katkısız PA66 ile, %10-20 ve 30 oranlarında KE, %0,5 oranında ÇDKNT, %3 oranında MoS₂ ve %3 oranında silikon katkılı PA66 kompozitlerinin darbe mukavemeti sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katkısız PA66 polimerinin darbe mukavemeti %10 ve %20 KE ilavesi ile azalmış, %30 KE ilavesi ile artmıştır. PA66 polimerinin 5,82 kJ/m² değerinde olan darbe mukavemeti %10 KE ilavesi ile %45,4 oranında azalarak 3,18 kJ/m², %20 KE ilavesi ise %22,2 oranında azalarak 4,53 kJ/m² değerinde elde edilmiştir. %30 KE katkısı ilavesi ise, PA66 polimerinin darbe mukavemetini %5,2 oranında artırmış ve PA66/30KE kompozitinin darbe mukavemeti 6,12 kJ/m² olarak elde edilmiştir. Zhou vd., (2013), çalışmalarında PA6/PPS polimerine %5-10 ve 15 oranlarındaki KE ilavesi ile darbe mukavemetinin azaldığını tespit etmişlerdir. Bunun nedenini ise KE ile polimer matrisi arasındaki zayıf uyumluluk olarak açıklamışlardır. Bu çalışmada PA6/PPS karışımına ilave edilen %10 ve

%15 KE katkılarının darbe mukavemetini sırası ile %11,6 ve %29,5 oranlarında azalttığını belirtilmişlerdir. Bunun sebebini ise KE katkısı ile PA6/PPS karışımının daha rijit hale gelmesi olarak açıklamışlardır.

PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitin darbe mukavemeti $4,95 \text{ kJ/m}^2$ olarak elde edilmiştir ve ÇDKNT katkısı ilave edilmemiş PA66/30KE kompozitine göre darbe mukavemeti değeri %19,1 oranında azalmıştır. Sırası ile %3 oranlarında MoS₂ ve silikon katkıları PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin darbe mukavemet değerini %6 ve %20,8 oranlarında arttırmıştır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitin darbe mukavemeti %3 MoS₂ katkısı ile $5,25 \text{ kJ/m}^2$, %3 silikon katkısı ile $5,98 \text{ kJ/m}^2$ değerinde elde edilmiştir. Basaravaj vd., (2013), 99PA66/1KS kompozitine ilave ettikleri %3 MoS₂ katkısı ile darbe mukavemetinin %16,1 oranında azaldığını belirtmişlerdir. 99PA66/1KS kompozitinin $37,2 \text{ J/m}$ olan darbe mukavemeti %3 MoS₂ katkısı ile $43,2 \text{ J/m}$ olarak elde etmişlerdir.

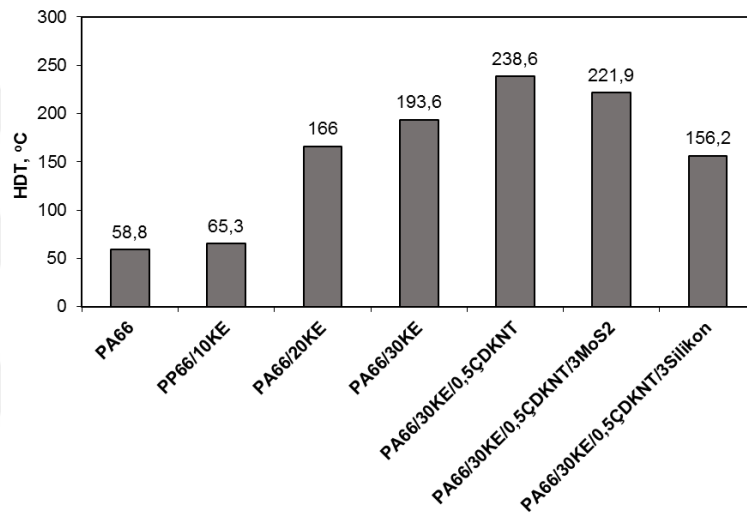


Şekil 5.7.PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerin izot çentikli darbe mukavemeti grafiği.

5.3. Termal Test Sonuçları

Şekil 5.8'de katkısız PA66 polimeri ile, %10-20 ve 30 oranlarında KE, %0,5 oranında ÇDKNT, %3 oranında MoS₂ ve %3 oranında silikon katkılı PA66 kompozitlerinin HDT sıcaklık sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, katkısız PA66 polimerinin $58,8 \text{ }^\circ\text{C}$ olan HDT sıcaklık değeri, %10 KE ilavesi ile %11 oranında artarak $65,3^\circ\text{C}$; %20 KE ilavesi ile %182,3 oranında artarak 166°C , %30 KE ilavesi ile %229,3 oranında artarak $193,6^\circ\text{C}$ olarak elde edilmiştir

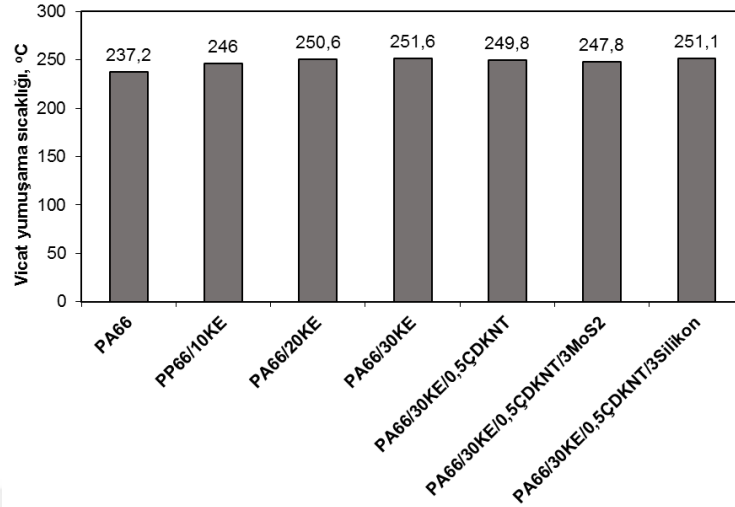
PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkısı ile elde edilen kompozitin HDT sıcaklık değeri %23,2 oranında artmış ve 238,6°C olarak elde edilmiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompoziti içerisine ilave edilen %3 oranında MoS₂ katkısı HDT sıcaklık değerini %7 oranında azaltmış ve bu kompozitin HDT sıcaklık değeri 221,9°C olarak elde edilmiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT içerisine %3 oranında silikon katkısı ilavesi ise, kompozitin HDT sıcaklık değerini %34,5 oranında azaltmıştır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon kompozitinin HDT sıcaklık değeri 156,2°C olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.8. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin HDT grafiği.

Şekil 5.9.'da PA66 polimeri ile PA66/10KE, PA66/20KE, PA66/30KE, PA66/30KE/0,5ÇDKNT, PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ ve PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon kompozitlerinin Vicat yumuşama sıcaklığı sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA66'nın Vicat değeri 237,2°C; bu değer %10 KE katkısı sonrası %3,7 oranında artarak 246°C, %20 KE ilavesi ile %5,6 oranında artarak 250,6°C ve %30 KE ilavesi ile %6,1 oranında artarak 251,6°C olarak elde edilmiştir.

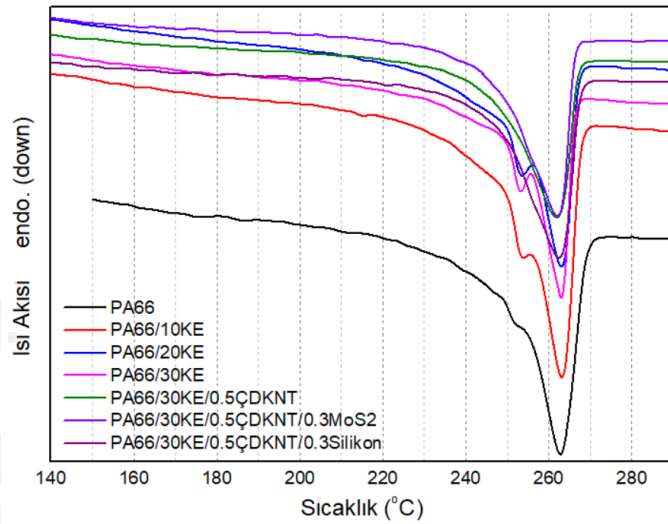
%0,5 ÇDKNT katkısı ilave edilen PA66/30KE kompozitinin Vicat yumuşama sıcaklığı değeri %0,7 oranında azalmıştır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompoziti içerisine ilave edilen %3 MoS₂ katkısı Vicat yumuşama sıcaklığı 247,8°C olarak elde edilmiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT içerisine %3 silikon katkısı ise kompozitin Vicat yumuşama sıcaklığı %0,5 oranında artmıştır. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin 249,8°C olan Vicat yumuşama sıcaklığı değeri, PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon kompozitinde 251,1°C olarak elde edilmiştir.



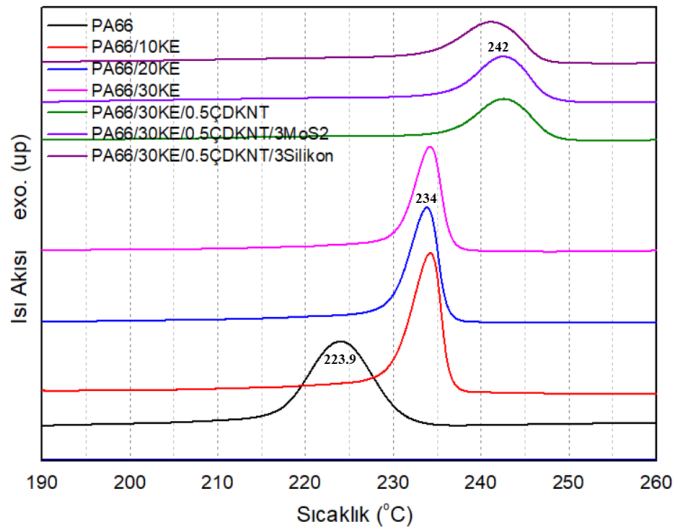
Şekil 5.9. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin Vicat yumuşaklık grafiği.

PA66 polimeri ile PA66/10KE, PA66/20KE, PA66/30KE, PA66/30KE/0,5ÇDKNT, PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ ve PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon kompozitlerinin, Şekil 5.10.'da ergime sıcaklığı (endotermik) termogramı ve Şekil 5.11.'de kristallenme sıcaklığı termogramı verilmiştir. PA66 polimerinin 263°C olan ergime sıcaklığı farklı oranlarda KE ilavesi ile 266°C civarında elde edilmiştir. PA66/30KE polimerine ilave edilen ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkıların ergime sıcaklığını çok düşük oranda azalttığı belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA66 ve PA66 kompozitleri α -kristallerinin bir göstergesi olan kaba ergime piki gösterdiği belirlenmiştir. Benzer bir sonuç Santos vd., (2013), tarafından yapılan KNT ve grafen oksit (GO) katkılı PA66 nanokompozitlerinde de belirtilmiştir. Hou vd., (2013), çalışmasında grafen ilave ettiği PA6 nanokompozitlerindeki pik oluşumunu gözlemlemiş, PA6' nın kristallenmesinde homojen dağılım sergileyen grafenin kompozitin kristallenme sıcaklığındaki artışının önemli seviyelerde olduğunu belirtmiştir. Şekil 5.11.'de verilen PA66 ve kompozitlerinin kristallenme sıcaklıkları incelendiğinde, yarı-kristalli PA66 polimeri ve kompozitlerinin, kristalizasyon esnasında oluşan kusurlu kristallerin erimesi veya belirli dolgu maddelerinin varlığı ile farklı kristal tiplerinin oluşmasına bağlı olarak iki farklı ergime piki oluşturduğu belirlenmiştir. Wei vd., (2013), KE katkılı PA6 kompozitlerinde, 215°C'de γ -formu, 225°C'de ise α -formu elde edildiğini belirtmişlerdir. PA66 polimerin 223°C olan kristallenme sıcaklığı karbon elyaf ilavesi ile 10°C artmıştır. PA66 kompozitlerine ilave edilen %0,5 oranındaki ÇDKNT katkısı ise kristallenme sıcaklığını 8°C daha artırarak 242,7°C elde edilmiştir. Santos vd., (2013) yaptıkları çalışma PA66 polimerine nanoboyutlu katkıların ilave edilmesi ile kristallenme sıcaklığındaki artışı, matris içerisinde çekirdeklenen kristallerin sayısının artması nedeniyle gerçekleştirdiğini

belirtmişlerdir. Ayrıca, genel olarak bir boyutlu karbon malzemelerin PA66 polimerinin zincir hareketliliğini kısıtlayarak çekirdeklenme prosesini hızlandırdığı belirtilmiştir (Chen vd., 2007). PA66/30KE/0.5ÇDKNT nanokompozitine ilave edilen %3 MoS₂ ve silikon katkıları kristallenme sıcaklığını etkilememiş ve sıcaklık 242°C civarında elde edilmiştir.



Şekil 5.10. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerinin ergime sıcaklığı termogramı.



Şekil 5.11. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin kristallenme sıcaklığı termogramı.

Çizelge 5.2.'de ise, Şekil 5.10. ve Şekil 5.11.'de belirtilen değerler kullanılarak, bölüm 4.10.'daki Eşitlik 4.5. ve Eşitlik 4.6.'lar ile yapılan hesaplamalar sonucundaki ergime sıcaklığı, % kristalleme oranları ayrıca ergime entalpileri belirtilmiştir. Kristallenme oranları incelendiğinde PA66 polimerinin %32,9 olan kristallenme oranı %10KE, %20KE ve %30 KE

ilavesi ile %38,3; %38,7 ve %32,6 oranlarında elde edilmiştir. PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 oranındaki ÇDKNT ise kristallenme oranını değiştirmemiştir. Genel olarak, ÇDKNT ilaveli kompozitler için ergime sıcaklığı ile kristallenme oranları değerleri için farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bunlarda, ÇDKNT katkısının ilave edilme miktarlarındaki değişikliklerle kristallenme oranları ile ergime sıcaklık değerlerinin bazen hafif attığı, bazı durumlarda azalım gösterdiği ve bazende değişmediği belirtilmiştir. Mahmood vd., (2013), PA6 içerisine ilave ettiği ÇDKNT'li nanokompozitler için ergime sıcaklık değerinin arttığını belirtilmişlerdir. Kompozit içerisindeki ÇDKNT'lerin polimer zincirlerindeki hareketliliği kısıtlayarak, ergime sıcaklık değerinin 17°C civarında arttığını gözlemlemişlerdir. Ekstrüzyon prosesi ile karşılaştırılarak eriyik halde bulunması yapıya zarar vermediği için kristallenme sıcaklığında artış olduğunu belirtilmişlerdir. Aynı zamanda, KNT'lerin modifiyeli veya modifiyesiz olması farketmeksizin PA6'nın polimer yapısında çekirdekleyici bölgeler oluşturarak kristallenme değerlerini iyileştirdiği belirtilmiştir. Hassani vd., (2013), gerçekleştirdiği çalışmalarında oranları fazla KNT ilaveli kompozitlerde, KNT'nin ısı iletkenliğinin yüksek değerlerde olması sebebi ile oluşacak ergime sıcaklığı değerinin azalacağını ve yapı içerisindeki kristalin parçalara ısı transferinin kolaylaşacağını bunun sonucunda da ergime sıcaklık değerinin azalacağını belirtilmişlerdir. Mahmood vd., (2013), PA6 polimeri içerisine katılan KNT oranının artışının ergime sıcaklığı değerini azalttığını ve yaklaşık olarak 220°C tespit edildiğini gözlemlemişlerdir. Buna sebep olarakta, kristal boyutlarının küçük olmasına ya da sayıları az olan düzenli paketlenmenin oluşmasına bağlamışlardır. PA6 polimeri için %24,78 değerindeki kristallenme oranı %0,1; %0,2 ve %0,3 oranlarında ÇDKNT katkısı sayesinde sırası ile %25,07; %28,51 ve %25,39 oranlarında değiştiği belirtilmiştir. Marini vd., (2017), çalışmalarında PA6 içine MMT katkısı ekleyerek oluşturdukları kompozitlerin, modifiyesiz PA6/MMT'lerin ilavesiz PA6'ya göre kristallenme oranının daha yüksek olduğunu, ayrıca modifiyeli MMT'li PA6 kompozitlerde kristallenme oranının daha düşük oluşlarını gözlemlemişlerdir. Xu vd., (2014), nano-SiO₂ ilavesinin PA6 termoplastığının ergime sıcaklığını değiştirmedini belirtilmişlerdir. Ama nano-SiO₂ ilavesinin artışı ile kristalleşme sıcaklığında azalma olduğunu belirtilmişlerdir. Sebebini ise, PA6 molekül zincirlerindeki hareketliliğin nano-SiO₂ ilavesi ile engellendiği şeklinde bildirmişlerdir. Bunun için, nano-SiO₂ ilavesinin heterojen çekirdeklenmedeki kuvveti sebebiyle PA6 kompozitlerindeki kristallenmenin PA6'ya nazaran da olsa yükseldiğini de bildirmişlerdir. Hassani vd., (2013), ise PA6 termoplastığı içerisine ilave ettiği KNT'li kompozitlerin kristallenme verilerinin tespiti için yaptığı çalışmalarında KNT oranının artışı ile ergime sıcaklığında artış olduğunu bildirmişlerdir. Sebebini ise KNT ilavesinin polimer yapıda çekirdekleyici ajan görevi üstlenmesine bağlamışlardır. Bahsi geçen artışın %0,2 oranlarındaki

KNT ilavesine kadar arttığı, buradan sonraki artışlar ile azaldığını bildirmişlerdir. Az miktarlarda ilave edilen KNT'lerin yapı içerisinde çekirdekleyici ajan vazifesi üstlendiğinin ancak KNT oranlarının artması ile yapı içerisinde KNT dağılımının rastgele oluşumları neticesinde yapıdaki kristallenmeyi kısıtlayarak artışı engellediğini bildirmişlerdir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT nanokompozitine ilave edilen %3 MoS₂ ve silikon katkıları ise kristallenme oranını artırmış ve kristallenme oranları %42,4 ve %39,5 oranlarında elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin kristallenme ve ergime sıcaklığı sonuçları.

Numune	Soğuma		İkinci ısıtma		
	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
PA66	223,9	64,5	263,1	64,5	32,9
PA66/10KE	234,6	59,2	266,4	67,6	38,3
PA66/20KE	233,5	50,8	266,4	60,8	38,7
PA66/30KE	234,5	41,0	265,7	44,8	32,6
PA66/30KE/0,5ÇDKNT	242,7	38,7	263,9	51,0	37,4
PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS ₂	242,5	42,5	264,5	55,3	42,4
PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon	241,5	37,8	265,3	51,5	39,5

T_c: kristalizasyon sıcaklığı, ΔH_c: kristalizasyon entalpisi, X_c: kristallenme oranı, T_m: ergime sıcaklığı, ΔH_m: ergime entalpisi.

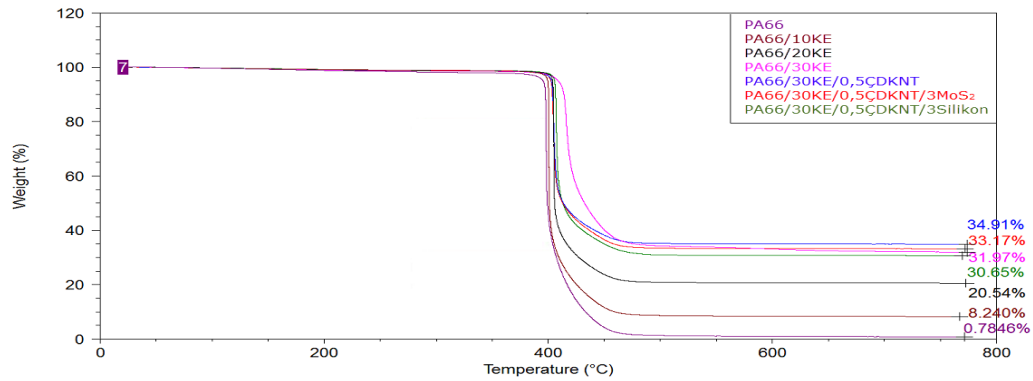
PA66 polimeri ile PA66 kompozit numuneleri için TGA testi sonucunda elde edilen kütle kaybı sonuçları Çizelge 5.3.'de verilmiştir. Çizelge 5.3. incelendiğinde PA66 polimerinin 350°C' de bozunmaya başladığı ve bozulmasını 480°C' de tamamladığı belirlenmiştir. PA66 polimerine ilave edilen KE, bozunma başlangıç ve bozunma sıcaklıklarını 15°C artırmıştır. KE katkılı kompozitlerin PA66 polimerine göre bozunmadaki sıcaklık değerlerinin yüksek değerlere sahip oldukları görülmüştür. Fiber katkıların PA66 polimeri içindeki ısıl salınım hızını düşürerek bozunmayı geciktirmesi olarak gözlemlenmiştir. KE katkısının bozulma başlangıç sıcaklığını artırmasının sebebi, KE katkının PA6 polimerden daha yüksek ısı absorplama kapasitesine sahip olmasından dolayıdır (Wei vd., 2013). Benzer şekilde PA66/30KE kompozitine ilave edilen ÇDKNT ve MoS₂ katkıları bozunma başlangıç sıcaklığını azaltmasına karşın, katkısız PA66 polimerine göre başlangıç bozunma sıcaklıkları artmıştır. Silikon katkısı ise bozunma başlangıç sıcaklığını 5°C artırmıştır. Bu sonuçlar, KE, MoS₂, ÇDKNT ve silikon katkıları ile PA66 polimerinin termal olarak kararlı hale geldiğinin göstermektedir. Ayrıca, bozunma başlangıç ve bozunma sonu sıcaklıklarındaki artış, PA66 polimerinin daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilceğini göstermektedir. Yapısal kararlılığın bir göstergesi olan %50 kütle kaybındaki

sıcaklıklar incelendiğinde, ilave edilen KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılarına bağlı olarak bozunma sıcaklıklarının 5-20°C arasında arttığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.3. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerinin bozunma başlangıç, %50 bozunma ve bozunma sonu sıcaklık değerleri çizelgesi.

Malzeme	Bozunma başlangıç sıcaklığı, °C	%50 Bozunmadaki sıcaklık, °C	Bozunma sonu sıcaklığı, °C	Kütle kaybı (%)
PA66	349,98	398,39	474,91	0,78
PA66/10KE	352,4	400,97	467,63	8,24
PA66/20KE	365,7	405,49	475,52	20,54
PA66/30KE	363,3	419,04	482,79	31,97
PA66/30KE/0,5ÇDKNT	359,0	405,49	473,09	34,91
PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS ₂	356,6	405,49	472,48	33,17
PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon	368,7	407,02	482,79	30,65

Deneyler sonucunda Şekil 5.12.'de görüldüğü gibi TGA testi sonucunda elde edilen kütle kayıpları sonucunda kalan malzeme miktarlarının üretim oranları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

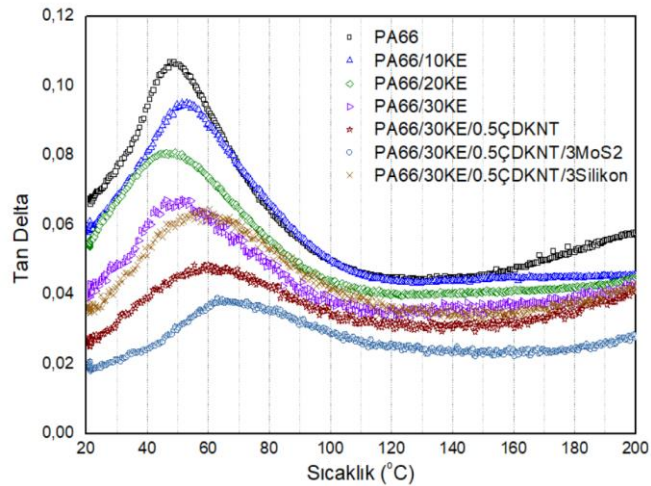


Şekil 5.12. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerin kütle kaybı değerleri grafiği.

5.4. Termo-Mekanik Test Sonuçları

Şekil 5.13. PA66 ile KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66 kompozitlerin sıcaklığa göre Tan δ değerleri belirtilmiştir. Tan δ eğrisinde oluşan pikler parçaların camsı geçiş sıcaklığını değerleridir. Grafikte görüldüğü üzere PA66' nın T_g değeri 47,42°C iken %10; %20 ve %30 KE katkılı PA66 kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıkları 52,93; 49,16 ve 51,89°C elde edilmiştir. Ancak, Liang vd., (2014), artan KE miktarına bağlı olarak camsı geçiş sıcaklığının azaldığını belirtmişlerdir. Bunun sebebi ise moleküller arasındaki kuvvetli polar ve hidrojen etkisinin KE

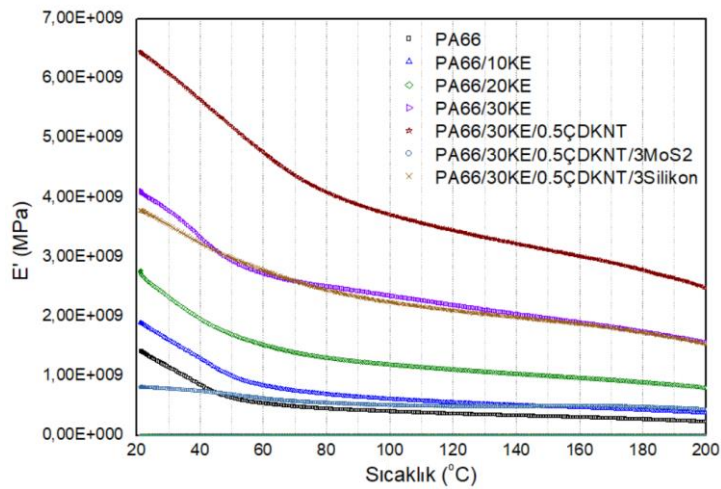
ilavesi ile zayıflaması olarak açıklamışlardır. Ayrıca, rijit fiberlerin ilavesi ile polimer moleküllerin hareketliliğinin engellendiği ve sonuçta camsı geçiş sıcaklığı pikinin azaldığı belirtilmiştir. PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkısı camsı geçiş sıcaklığını yaklaşık 8°C artırırken, %3 MoS₂ katkısı ise camsı geçiş sıcaklığını 64,58°C'ye kadar artırmıştır. %3 silikon ilave edildiğinde ise PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon nanokompozitin camsı geçiş sıcaklığı 60,38°C' dir. Logakis vd., (2009) ve Kanapitsas vd., (2009), yapmış oldukları çalışmalarında benzer neticelere ulaşıldığını belirtmişlerdir. KNT' lerin PA6' ya katılması ayrıca polimer yapı içerisinde homojen dağılmaları neticesinde nanotüplerin etkileşimlerinin artıracığı, bunun neticesinde ise polimer yapıdaki zincir hareketliliğini azaltarak T_g değerinin artacağını bildirmişlerdir. Elastiklik modülü değeri ile çekme mukavemeti değerlerinin geliştirilmesini camsı geçiş sıcaklığı değeriinde oluşan bu artış ile destekleneceğini bildirmişlerdir. Esmizadeh vd., (2017), KNT ilevesinin PA6 ve ECO karışımı polimerinde bulunan polimer yapıdaki zincir hareketliliğini engellediğini, bunun neticesinde ise termoplastik bileşenlerdeki absorbe performanslarının düştüğünü bildirmişlerdir. ÇDKNT ilave edilen termoplastiklerde camsı geçiş sıcaklığının daha yüksek değerlerde olmasına karşın tanδ pik değerlerini azaldığını bildirmişlerdir.



Şekil 5.13. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin Tan Delta (Tanδ) sonuçları.

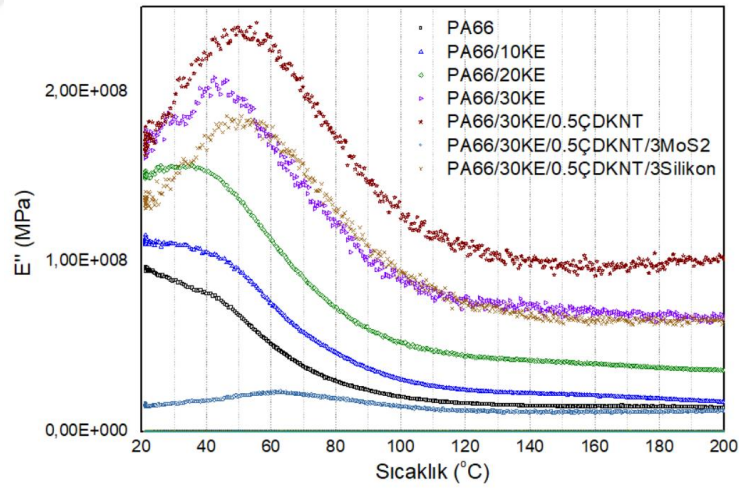
Şekil 5.14.'de PA66 ve PA66 kompozitlerin sıcaklığa göre depolama modülü sonuçları belirtilmiştir. PA66' ya katılan oranları birbirlerinden farklı KE ve %0,5 oranında ÇDKNT, %3 oranında MoS₂ ve silikon katkıları PA66 polimerinin depolama modülünü artırmıştır. Wei vd., (2013), artan KE miktarına bağlı olarak PA6/KE kompozitlerinin depolama modülünün arttığını belirtmişlerdir. 20°C sıcaklık altında, PA6/20KE numunesinin depolama modülünün %260

oranında arttığını belirtmişlerdir. Bunun sebebinin ise homojen dağılan yüksek performanslı karbon elyaf katkının bulunmasına bağlamışlardır. Fiber ve matris arasındaki kuvvetli bağ nedeniyle uygulanan gerilimin etkili bir şekilde transfer edilmesinin depolama modülünü artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Joseph vd., (2003), artan fiber miktarına bağlı olarak gerilim daha homojen bir şekilde dağıldığı ve depolama modülünün arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, Santos vd., (2013), depolama modülündeki artışı nanokatıkların miktarının artmasına ve kristal boyutunun azalmasına bağlamışlardır. Ayrıca, grafen oksit katkılı PA66 nanokompozitin depolama modülünün %139 oranında arttığını belirtmişlerdir. Mekanik özelliklerdeki artış, nanometrik karbonun yapısı ve nanomalzemelerin takviye edici özellikleri nedeniyle kristal özelliklere dayandırılarak açıklanmıştır. Grafen esaslı nanokompozitlerin, KNT'e göre, daha küçük kristal boyutu sergilemesinin mekanik özellikleri artırdığı belirtilmiştir. Grafen oksitin geniş yüzey alanına sahip 2D yapısının, nanokatıktan matrise etkili gerilim transferi sağlayarak, polimer ile iyi bir etkileşim sağlamasının mekanik özelliklerdeki artışı açıkladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, depolama modülündeki artışın, KNT'lerde bulunan yüksek rijitlik özelliği sayesinde, ayrıca polimer yapıyı oluşturan zincirlerdeki hareketliliği engellemesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir (Aso vd., 2007; Szymczyk vd., 2011). Jin vd., (2001), ise çalışmaları neticesinde benzer bulgulardan bahsetmekte ve PMMA polimeri içerisine değişken oranlarda ÇDKNT ilavesi ile (ağırlık olarak % 4 ila %26 oranlarında) elde edilen nanokompozitlerle yaptığı deneyler sonucunda özellikle yüksek değerlerdeki sıcaklıklarda, KNT ilavesinin rijit yapısı sayesinde kompozitin depolama modül değerinin artırdığını tespit etmişlerdir belirtilmiştir. Aynı zamanda, KNT ilavesi sayesinde polimer malzemenin yükselen bu modül değerini daha yüksek çalışma sıcaklıklarında muhafaza ettiğini belirtmişlerdir.



Şekil 5.14. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin depolama modülü (E') sonuçları.

Şekil 5.15.'de PA66 ile PA66 kompozitlerin sıcaklığa göre kayıp modülü sonuçları belirtilmiştir. PA66 matris termoplastiği içerisine katılan KE, ÇDKNT ve silikon malzemeleri sıcaklığın artması neticesindeki kayıp modülü değerlerini arttırmış olduğu gözlemlenmiştir. Wei vd., (2013), artan KE miktarına bağlı olarak kayıp modüllerin arttığını belirtmişlerdir. PA6 polimerinin zincir hareketliliğinin KE tarafından sınırlandırıldığı ve ayrıca fiberlerin bulunması nedeniyle kompozitin viskozitesinin arttığı belirtilmiştir. Bose vd., (2008), yarı yarıya oranlarda ilave ettikleri PA6 ve ABS malzemeli karışıma katmış oldukları ÇDKNT' nin karışımın depolama modül değeri ile kayıp modül değerlerini gözlemlemişlerdir. ÇDKNT ilavesi ile elde etmiş oldukları nanokompozitin, yüksek depolama modülüne çok daha düşük sıcaklıklarda ulaştığını bildirmişlerdir. Çalışma neticesinde, modifiye edilmiş KNT ilavesinin, özellikle camı geçiş bölgesinde, modifiye edilmemiş ÇDKNT ilavesine nazaran daha yüksek depolama modülüne ulaştığını, sonuç olarak modifiye edilmiş KNT' lerin yapı içerisinde daha homojen dağılım sergilemesinin sebep olduğunu bildirmişlerdir. Depolama modül değerlerine bakıldığında, zincir yapıda oluşacak olan hareketliliği kısıtlayan ÇDKNT' lerin T_g değerini az da olsa artırdığını belirtmişlerdir.



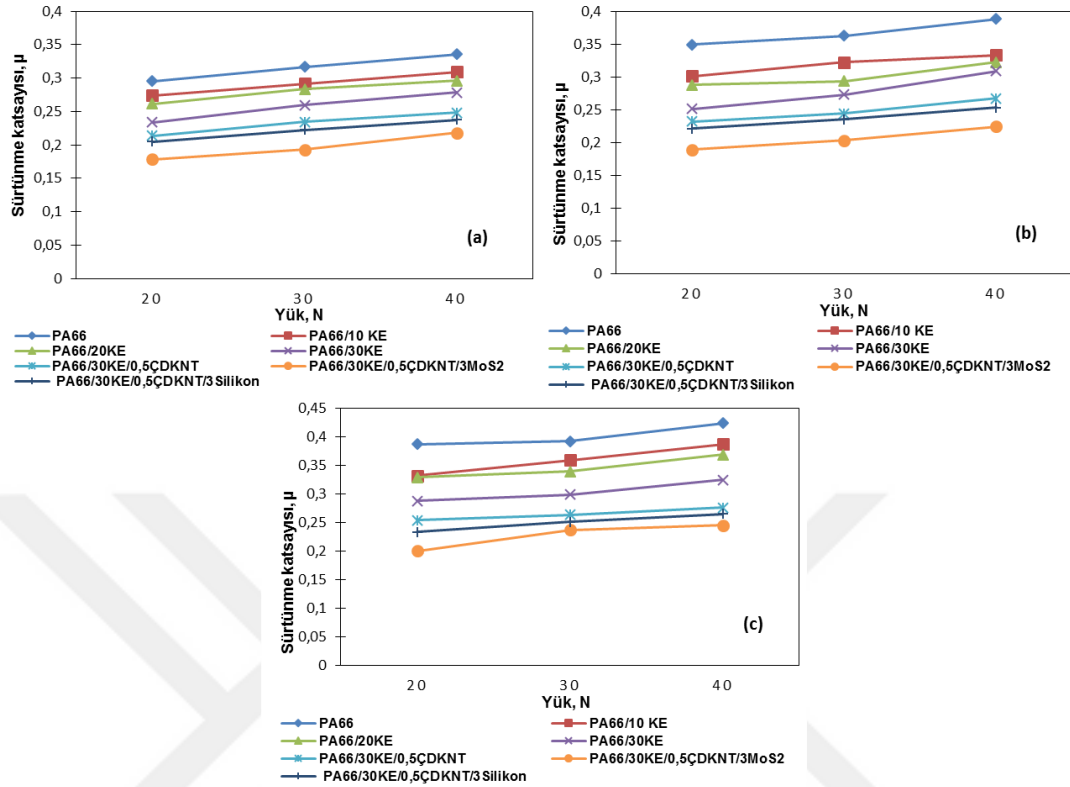
Şekil 5.15. PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerin kayıp modülü (E'') sonuçları.

5.5. Aşınma Testi Sonuçları

Şekil 5.16.'daki belirtilen verilere göre PA66 ile PA66 kompozitlerinin 0,4; 0,8 ve 1,2 m/s farklı kayma hızlardaki, 20, 30 ve 40 N değerlerinde değişken yükler uygulandığında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri değişim grafikleri verilmiştir. Yük değerinin artışı neticesinde, sürtünme katsayısı değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, PA66 polimerinin 0,4 m/s kayma hızında, 20 N yük uygulandığında sürtünme katsayısı 0,2953 iken,

aynı kayma hızında 40 N' daki sürtünme katsayısı %13,6 oranında artmış ve 0,3355 μ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. % 10, 20 ve 30 oranlarında KE katkılı kompozitlerin sürtünme katsayıları ise, 0,4 m/s hızda yük 20 N'dan 40 N'a çıkarılınca, sırası ile %12,7; %13,4 ve %19,3 oranlarında arttığı gözlemlenmiştir. Koyunbakan vd., (2017), yaptıkları çalışmalarında, PA6 termoplastiği ile bunun nanokompozitlerde yapılan deneyler neticesinde yük artışının sürtünme katsayısı değerinde artırdığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, PA6 polimerinin sürtünme katsayısı değerinin 0.4m/s hızı ile 10 N yükte 0.41 μ iken, uygulanan yükün 40 N'a artırılması sürtünme katsayısının %8,8 oranında artarak 0,45 μ olarak elde etmişlerdir. Karbon elyaf katkılı PA6 polimer kompozitlerinde ise bu artışın %19,6; %14,5 ve %23,3 oranlarında olduğunu belirtmişlerdir.

PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin sürtünme katsayısındaki değişim değeri ise; 0,4 m/s hızda, yük değeri 20 N iken 40 N değerine çıkarıldığında %16 civarında artış göstererek 0,2484 μ değerinde tespit olunmuştur. Benzer bir sonuç, Kuş, (2018), çalışmasında da görülmüştür. Saf PA6 termoplastiğinin 0,4 m/s hızda, yük değerinin 10 N iken 40 N değerine ulatırılması sonucunda sürtünme katsayı değeri %62,5 oranda artarak, ÇDKNT ilaveli PA6 kompozitleri için sıra ile belirtilecek olur ise sürtünme katsayıları %41,3; %34,6; %45,4 artmış olduğunu belirtmiştir. Kaştan, (2015), yaptığı çalışmasında, sürtünme katsayısında oluşan artışın yük ve hızlardaki artış ile paralel olduğunu bildirmiştir. Yük değerinin artması ile pim yüzeyine temas eden çelik diskle deney pimlerinin temas noktalarındaki sıcaklığın artış gösterdiğini bildirmiştir. Oluşan bu sıcaklığın PA6 termoplastiğini yumuşattığını ve bu yumuşama sonrası PA6 deney numunelerinden partüküllerin küçük küçük ayrıldığını, bu sebeplede termoplastik malzemede deformasyo oluştuğunu bildirmiştir. %3 oranında MoS₂ katkısı ilavesi ile elde edilen PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompozitinde, aynı hız altında 20 N uygulanan yük ile 0,1784 μ olan sürtünme katsayısı değeri, 40 N yük uygulandığında ise %22,3 oranında artarak 0,2182 μ değerinde elde edilmiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3silikon kompozitinde, uygulanan yük değeri 20 N'dan 40 N değerine çıkarıldığında sürtünme katsayısındaki değişim yaklaşık olarak %16 civarında artmış ve 0,2375 μ değerinde tespit olunmuştur.

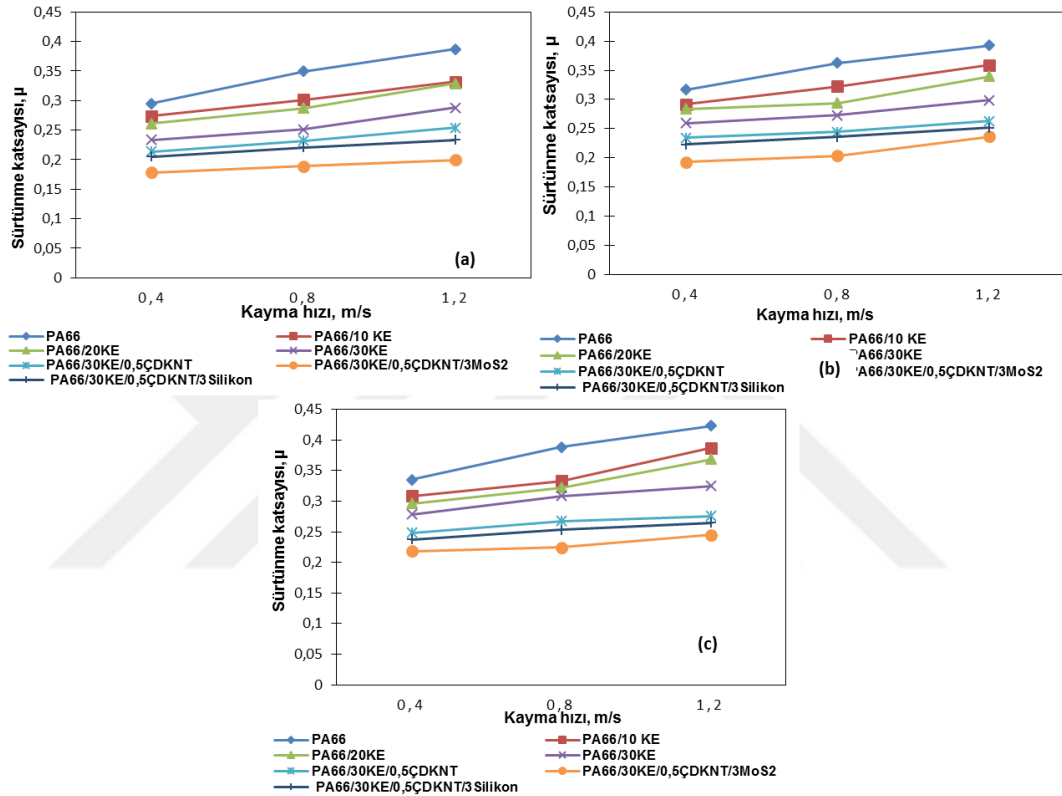


Şekil 5.16. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin sürtünme katsayısı–yük ilişkisi grafiği, a) 0,4 m/s, b) 0,8 m/s, c) 1,2 m/s.

Şekil 5.17.'de ise saf PA66 ve PA66 katkılı kompozitlerin 20, 30 ve 40 N farklı yükler altındaki, sırası ile 0,4 m/s, 0,8 m/s ve 1,2 m/s kayma hızında elde edilen sürtünme katsayısındaki değişimleri gösteren grafikler belirtilmiştir. Şekiller incelenince, PA66 polimerinin 40 N yükte, 0,4 m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısı 0,3355 μ iken, aynı yük altında 1,2 m/s kayma hızındaki sonucu %26 civarında artmıştır ve 0,4237 μ değerinde tespit olunmuştur. PA66 polimerine sırası ile %10, 20 ve 30 oranlarında eklenen KE katkısı ilavesi ile elde edilen kompozitler arasında sürtünme katsayısı en az olan kompozit %30 KE ilaveli olanıdır. PA66/30KE kompozitinin 0,4 m/s kayma hızındaki sürtünme değeri 0,2786 μ iken, 1,2 m/s kayma hızında bu değer %16,6 oranlarında artış göstererek 0,3248 μ olarak bulunmuştur. PA66 polimeri içerisine ilave edilen karbon elyaf oranı arttıkça sürtünme katsayısı değeri düştüğü gözlemlenmiştir.

40 N yük altında, PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitine uygulanan kayma hızı 0,4 m/s değerinde iken 1,2 m/s olarak uygulandığında katsayı değeri %11,1 artmış ve 0,2759 μ değerinde tespit edilmiştir. Sironğ vd., (2014), PA66 polimerine oranları farklı şekilde nano katkı ayrıca SEBS-g-MA ilaveli nanokompozitler için, artan sürtünme katsayısı değerinin kayma hızındaki artışın sebep olduğunu bildirmişlerdir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompozitinde ise yine 40

N yük altında, 0,4 m/s kayma hızında 0,2182 μ olan sürtünme katsayısı değeri, 1,2 m/s kayma hızında %12,4 oranında artarak 0,2453 μ değerinde elde edilmiştir. %3 silikon katkısı ilaveli PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin kayma hızı 0,4 m/s yerine 1,2 m/s değerine çıkarıldığında, 40 N yük altındaki sürtünme katsayısında oluşan değişim değeri %11,6 artmıştır ayrıca 0,2651 μ değerinde tespit edilmiştir.

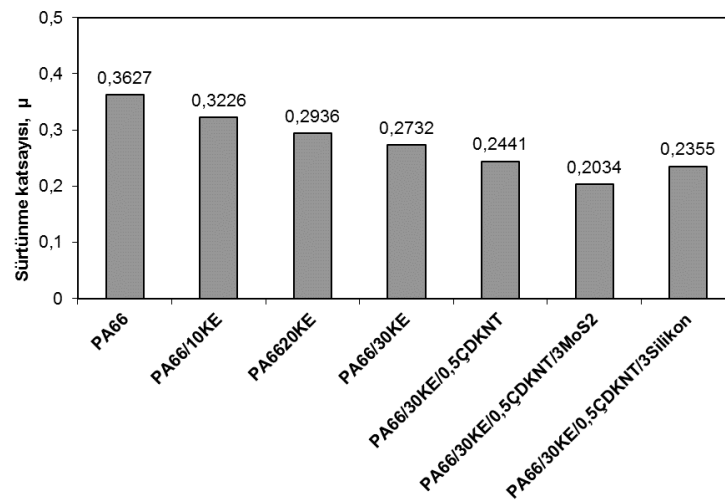


Şekil 5.17. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin sürtünme katsayısı (μ) – kayma hızı (m/s) ilişkisi grafiği, a) 20 N, b) 30 N, c) 40 N.

Şekil 5.18.'de saf haldeki PA66 termoplastiği ve farklı oranlarda KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66 kompozitlerinin, 0,8 m/s kayma hızında ve 30 N yükte malzemeye bağlı olarak sürtünme katsayılarındaki değişimi grafik şeklinde belirtilmiştir. Grafikteki gibi PA66 termoplastiğine ait sürtünme katsayısındaki değişim değeri 0,3627 μ iken, PA66 polimerine sırası ile %10, 20 ve 30 oranlarında eklenen KE katkısı ilavesi ile elde edilen kompozitlerin sürtünme katsayılarındaki değişim değerleri azalmıştır. %10 KE ilavesi ile sürtünme katsayısındaki değişim değeri %11,1 oranında azalarak 0,3226 μ değerinde, %20 KE ilavesi ile %19,1 oranında azalarak 0,2936 μ değerinde ve %30 KE ilavesi ile %24,7 oranında azalarak 0,2732 μ değerinde elde edilmiştir. Katkısız PA66 polimeri içerisine ilave edilen KE oranı arttıkça kompozitlerin sürtünme katsayıları azalmaktadır. Benzer bir sonuç Koyunbakan vd., (2017), tarafından da elde edilmiştir.

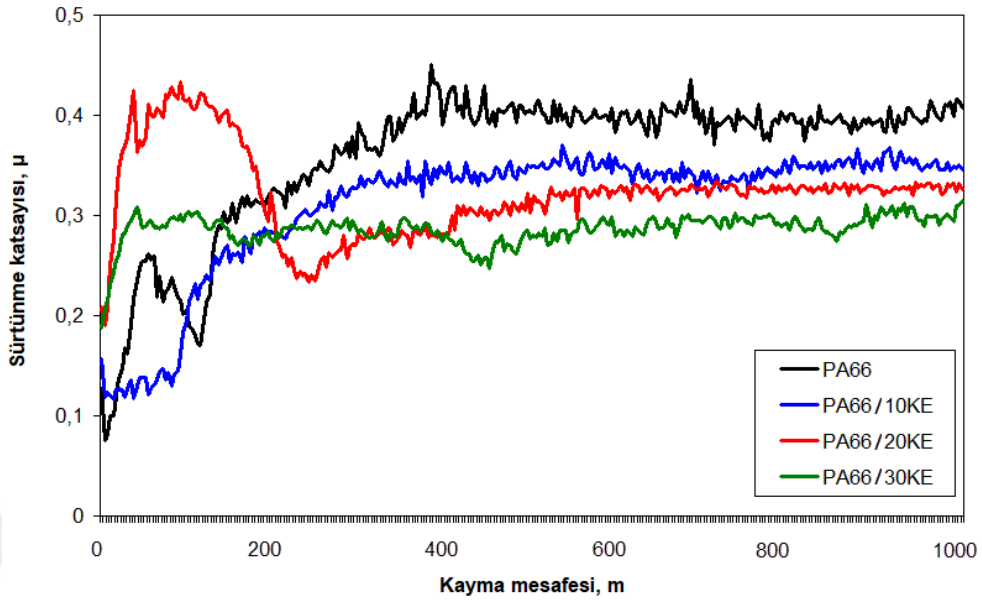
PA6 termoplastiği içerisine katılan KE katkılı kompozitlerin sürtünme katsayı değerini azalttığını belirtmişlerdir. PA6 polimerinin, 20 N yük ve 1,2 m/s kayma hızında 0,4453 μ iken, %10-20 ve 30 KE katkılı kompozitlerde sırası ile %17,6; %42,4 ve %59 oranlarında azaldığını belirtmişlerdir. Li, (2012), ise yaptığı çalışmasında, POM polimeri içerisine ilave ettiği farklı oranlarda karbon elyaf katkısının, polimerin sürtünme katsayısını azalttığını tespit etmiştir. KE oranının artışı sürtünme katsayısının daha da fazla azalmasını sağlamıştır.

PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkısı, kompozitin sürtünme katsayısındaki değişim değerini %10,7 oranında azaltmış ve elde edilen kompozitin sürtünme katsayısındaki değişim 0,2441 μ değerinde elde edilmiştir. Kompozite eklenen ÇDKNT katkısı ile kompozitin sürtünme katsayısındaki değişim değeri önemli oranda azaltmıştır. Bu azalışın sebebi, ÇDKNT' lerin kompozit malzeme yüzeyinde film tabakası oluşturarak pim matriks malzemesi olan PA66 polimerinin çelik disk yüzeyi ile temasını kesmesine bağlanmıştır. %3 oranında MoS₂ katkısı ilavesi ile elde edilen PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompoziti, PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin sürtünme katsayısındaki değişim değerini %16,7 oranında azaltarak 0,2034 μ değerinde elde edilmiştir. MoS₂ katkısı, kompozit yüzeyindeki film tabakasını artırarak, PA66 polimerinin çelik diske olan temasını karbon elyaf ve çok duvarlı karbon nano tüplere ilave olarak daha da fazla azalttığı için sürtünme katsayısındaki değişim değerinin azalmasına önemli katkı sağlamıştır. %3 silikon katkısı ilavesi ise, PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin aşınma oranındaki değişim değerini %3,5 oranında azaltarak silikon katkılı kompozitin sürtünme katsayısındaki değişim değeri 0,2355 μ olarak elde edilmiştir.

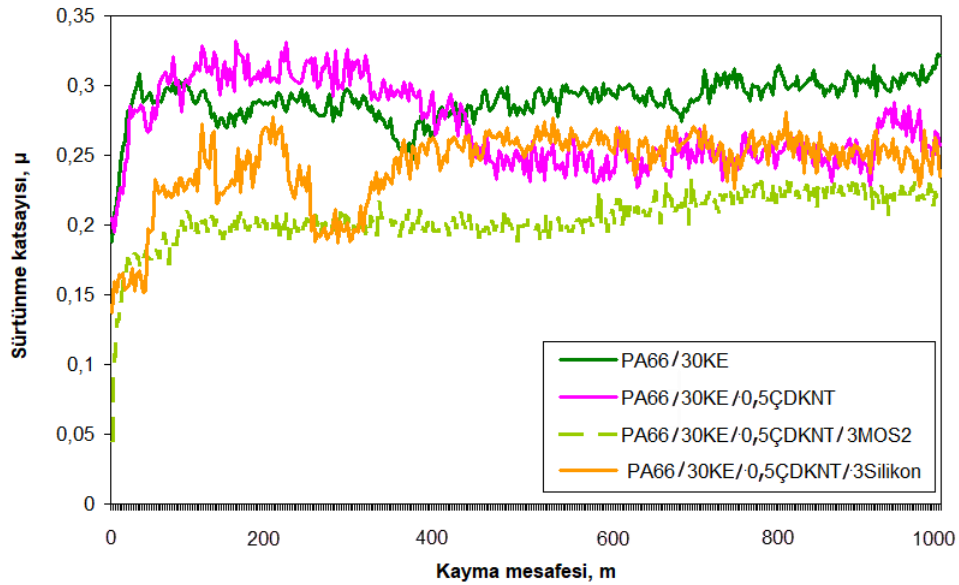


Şekil 5.18. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin malzemeye bağlı olarak sürtünme katsayılarındaki değişim grafiği (kayma hızı: 0,8 m/s ve yük: 30 N).

Şekil 5.19. ve Şekil 5.20.'de, 0.8m/s kayma hızında ve 30 N yükte saf PA66 termoplastiği ve KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66 kompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma yolu grafikleri belirtilmiştir. Şekillerde belirtildiği üzere PA66 ve katkılı nanokompozitlerin sürtünme katsayısı değerindeki değişimler iki farklı aşamada gerçekleşmiştir. Bu aşamaları başlangıç aşaması ile kararlılık hali aşaması olarak belirtebiliriz. Başlangıçta tüm malzemeler için elde edilen değerlerde hızlı değişimler gözlemlenmiştir, bu değişimler 300 ila 400 m civarlarında azalarak değerlerde kararlılıklar oluşmaya başlamıştır. Luo vd., (2016), yaptıkları çalışmalarında da buna benzer değerlerle karşılaşmışlardır. Samyn vd., (2009), ise bu hızlı hareketlere sebep olarak pim yeterince yumuşayamayıp, pim yüzeyinden tam anlamıyla parçacıkların koparak disk ile pim arasında düzgün bir film yüzeyi oluşumunun tamamlanmadığını ama daha sonra oluşan film yüzeyi sayesinde kararlı hale geçişi gözlemlenmiştir. Ayrıca, Luo vd., (2016), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, KE oranının az olduğu içeriklerde, KE' lerin kendisinden daha yumuşak yapıya sahip PPS ve PTFE karışımından rahatlıkla ayrılarak küçük boyutlara ulaştığını, bunun sebebiyle başlangıçta oluşan sürtünme değerlerinin hızlı bir şekilde artış gösterdiğini bildirmişlerdir. Buna nazaran, KE' lerin oranının belirli bir noktaya ulaşana kadar artındığında, termoplastiklerden bu sert yapıya sahip KE' lerin ayrılmasının zorlaştığını bildirmişler. Artış gösteren KE' nin desteği ile yumuşak yapıdaki matrisle çelik disk yüzeyi arasında oluşacak temas alanı azalacak bu şekilde sürtünme değerlerinin istikrarlı seviyeye geleceğini bildirmişlerdir. Yapmış olduğumuz deneylerde de benzer değişim oluşmuştur. PA66 termoplastiği içerisine katılan KE' ler sürtünme katsayısının belirgin oranda azalmasına sebep olmuştur. Çünkü sürtünmenin etkisi ile elde edilen filmdeki katman kalınlığı ileve edilen katkıların oranlarına göre değişim göstermiştir.



Şekil 5.19. PA66 polimeri ve %10-20-30 oranlarında KE katkısı ilaveli PA66 kompozit numunelerinin sürtünme katsayısı - kayma mesafesi ilişkisi (kayma hızı: 0,8 m/s, yük: 30 N).

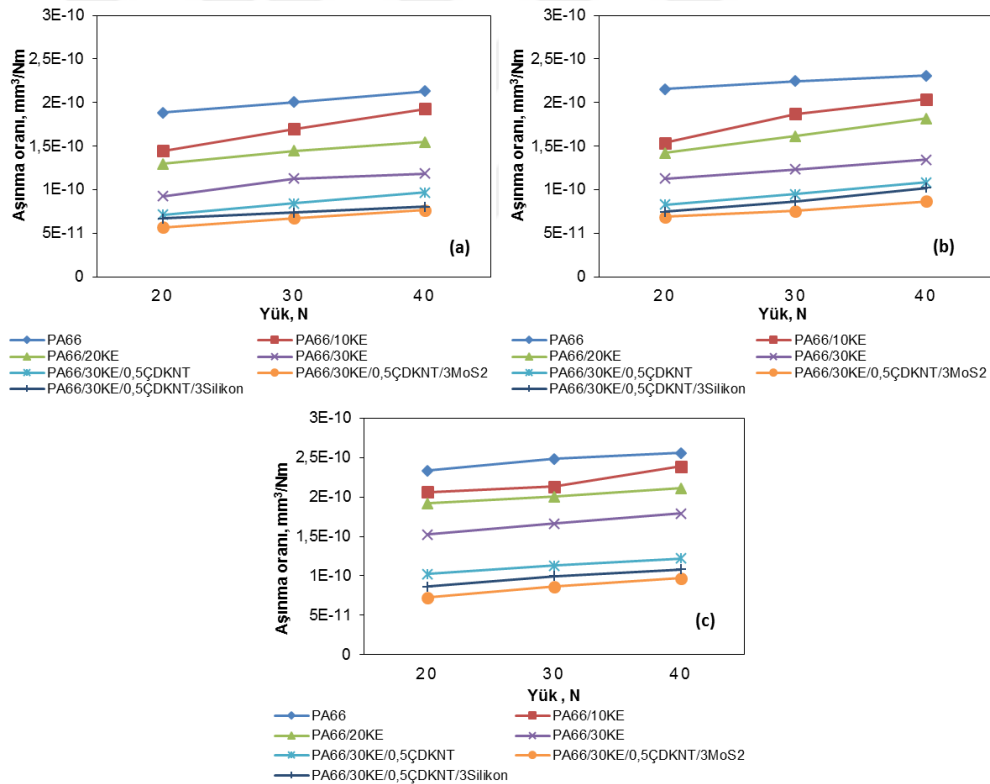


Şekil 5.20. PA66/30KE kompoziti ve ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66/30KE kompozit numunelerinin sürtünme katsayısı - kayma mesafesi ilişkisi (kayma hızı: 0,8 m/s, yük: 30 N).

Şekil 5.21.'deki grafik saf halde bulunan PA66 ve PA66 katkılı kompozitlerin 0,4; 0,8 ve 1,2 m/s farklı kayma hızları için ve 20, 30 ve 40 N yüklerde oluşan spesifik aşınma oran değişikliklerini vermektedir. Şekilde, deney malzemelerine uygulanan yükler artırdığında, spesifik aşınma oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, PA66 polimerinin 0,8 m/s kayma hızında, 20 N yük uygulandığında aşınma oranı $2,154E^{-10}$ mm³/Nm iken, aynı kayma

hızında uygulanan yük 40 N değerine ulaştırıldığında aşınma oranı %7,3 oranında artarak $2,244E^{-10}$ mm^3/Nm değerinde elde edilmiştir. PA66 polimerine sırası ile %10, 20 ve 30 oranlarında eklenen KE katkısı ilaveli kompozitlerin aşınma oranlarının, uygulanan yük değeri 20 N yerine 40 N değerine çıkarılınca, sırasıyla %32,9; %28 ve %19,6 oranlarında arttığı görülmüştür.

PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkıli kompozitin aşınma oranındaki değişim 0,8 m/s değerinde, yük değeri 20 N yerine 40 N değerine çıkarıldığında %31 oranında artarak $1,085E^{-10}$ mm^3/Nm değerinde elde edilmiştir. %3 oranında MoS_2 katkısı ilavesi ile elde edilen PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozite, 20 N yük uygulandığında $6,866E^{-11}$ mm^3/Nm olan aşınma oranı değeri, 40 N yük altında %26,5 oranında artarak $8,683E^{-11}$ mm^3/Nm değerinde elde edilmiştir. %3 silikon katkısı ilaveli PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitte ise bu artış %36,8 oranında elde edilmiştir.

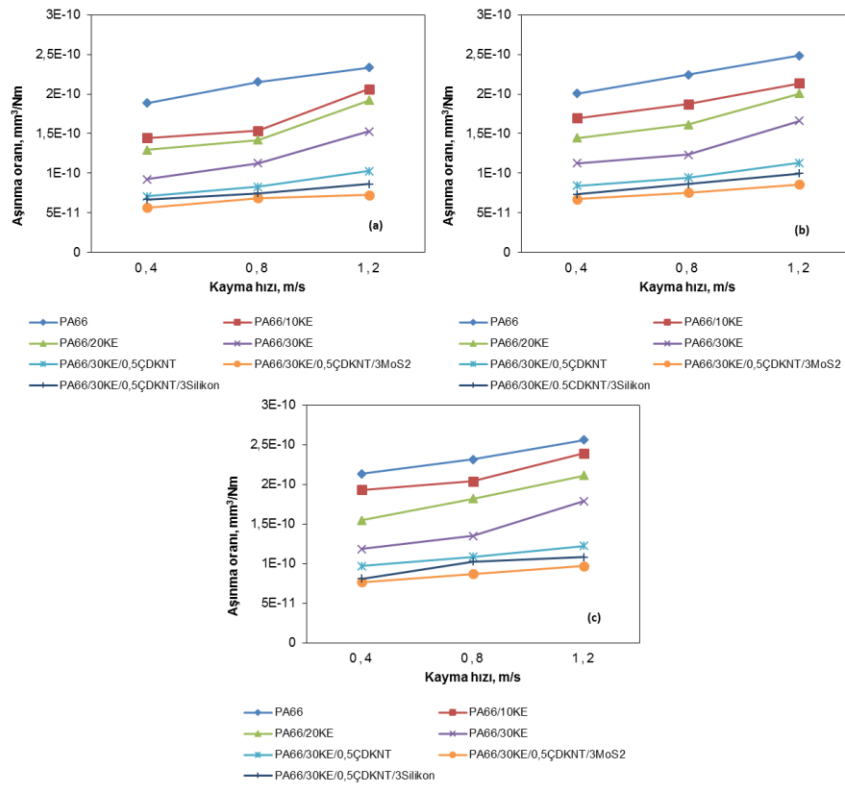


Şekil 5.21. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin aşınma oranı– yük ilişkisi grafiği, a)0,4 m/s, b)0,8 m/s, c)1,2 m/s.

Şekil 5.22.'de ise katkısız PA66 polimeri ve kompozitlerinin 20-40 N yükler altındaki, sırası ile 0,4 m/s; 0,8 m/s ile 1,2 m/s kaymadaki hızda elde edilen aşınma oranlarındaki değişim grafikleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, PA66 polimerinin yük değeri 30 N iken, 0,4 m/s

kaymadaki hızda tespit edilen aşınma oranı $2,00479E^{-10}$ mm^3/Nm iken, aynı yükte 1,2 m/s kayma hızındaki aşınma oranı %23,9 oranında artarak $2,4835E^{-10}$ mm^3/Nm değerinde elde edilmiştir. PA66 polimerine %10-30 oranlarında eklenen KE katkılı kompozitler arasında, en düşük aşınma oranı %30 KE katkılı kompozitte elde edilmiştir. PA66/30KE kompozitin 0,4 m/s kayma hızındaki abrasiv aşınma değeri, 1,2 m/s kayma hızında %47,6 oranında artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitine uygulanan hız değeri, 0,4 m/s değerinden 1,2 m/s hız değerine çıkarıldığında aşınma değeri %34,4 oranında artarak $1,1313E^{-10}$ mm^3/Nm elde edilmiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompozitinde ise, 0,4 m/s'de $6,7312E^{-11}$ mm^3/Nm olan aşınma oranı değeri, 1,2 m/s kaymada ise $8,616E^{-11}$ mm^3/Nm değerinde elde edilmiştir. %3 silikon katkısı ilaveli PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitin kayma hızı 0,4 m/s'den 1,2 m/s değerine çıkarıldığında, oran %35,7 artarak, $9,9659E^{-11}$ mm^3/Nm değerinde elde edilmiştir.



Şekil 5.22. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin aşınma oranı (mm^3/Nm) – kayma hızı (m/s) ilişkisi grafiği, a) 20 N, b) 30 N, c) 40 N.

Şekil 5.23.'de saf yapıda bulunan PA66 ve oranları farklı KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66 kompozitlerinin, 0,8 m/s kayma hızında ve 30 N yük altındaki malzemeye bağlı olarak aşınma oranlarındaki değişime ait grafik belirtilmiştir.

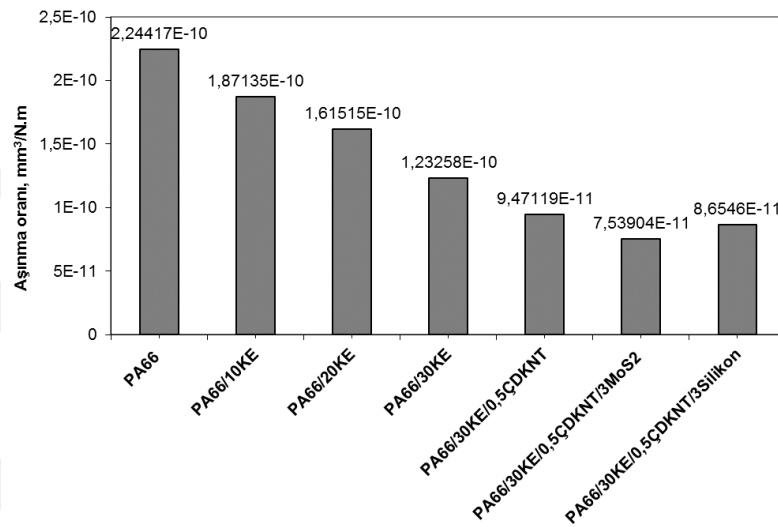
Şekil incelenecek olursa, PA66' a ait aşınma oranındaki değişim değeri $2,244E^{-10}$ mm³/Nm iken, PA66 polimerine sırası ile %10, 20 ve 30 oranlarında eklenen KE katkısı ilavesi ile elde edilen kompozitlerin aşınma oranlarındaki değişim değerleri azalmıştır. %10 KE ilavesi ile aşınma oranındaki değişim değeri %16,6 oranında azalarak $1,871E^{-10}$ mm³/Nm değerinde, %20 KE ilavesi ile %28 oranında azalarak $1,615E^{-10}$ mm³/Nm değerinde ve %30 KE ilavesi ile %45 oranında azalarak $1,233E^{-10}$ mm³/Nm değerinde elde edilmiştir. Katkısız polimer içerisine ilave edilen KE oranı arttıkça aşınma oranlarındaki değişim değeri de azalmaktadır. Li, (2012), yaptığı çalışmada, POM polimeri içerisine ilave ettiği %5-10-15-20 ve 25 oranlarında karbon elyaf katkısı ile elde ettiği kompozit malzemelerde benzer sonuçlar elde etmiştir. Bu çalışmada polimer içerisine ilave edilen KE oranı artışı ile kompozitlerin tribolojik özelliklerinde artış olduğunu ve KE katkısının POM polimerinin aşınma direncini büyük oranda arttırdığını tespit etmiştir. Buna sebebini KE' ın kendinden yağlayıcı özelliğine bağlamıştır (Li, 2012).

PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkısı, kompozitin aşınma oranındaki değişim değerini %23,2 oranında azaltmış ve elde edilen kompozitin aşınma oranındaki değişim değeri $9,471E^{-11}$ mm³/Nm değerinde elde edilmiştir. Kompozite eklenen ÇDKNT katkısı ile kompozitin aşınma oranındaki değişim değeri önemli oranda azaltmıştır. Bu azalışın sebebi, ÇDKNT' lerin kompozit malzeme yüzeyinde film tabakası oluşturarak pim matriks malzemesi olan PA66 polimerinin çelik disk yüzeyi ile temasını kesmesine bağlanmıştır. Brian vd., (2009), çalışmalarında YYPE matris polimerine oranları farklılık gösteren KNT katkılı kompozitler için aşınma sonuçlarını incelediğinde, KNT miktarı arttıkça aşınma değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Liu ve Chen, (2000), termoplastik içerisine ilave ettiği nanoparçacıklarla, pim ile disk arasında oluşan film tabakasının kompozitlerde oluşana aşınma direnç değerini artırdığı sonucunu tespit etmişler.

%3 oranında MoS₂ katkısı ilavesi ile elde edilen PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompoziti, PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin aşınma oranındaki değişim değerini %20 oranında azaltarak $7,539E^{-11}$ mm³/Nm değerinde elde edilmiştir. MoS₂ katkısı, kompozit yüzeyindeki film tabakasını artırarak, PA66 polimerinin çelik diske olan temasını iyice azalttığı için aşınma oranındaki değişim değerinin azalmasına önemli katkı sağlamıştır. Basavaraj vd., (2013), çalışmalarında benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışmalarında PA66/1KS içerisine %0,5-1-2 ve 3 oranlarında MoS₂ katkısının aşınma direncini büyük oranda arttırdığını tespit

etmişlerdir. Bunun nedenini, polimer matrisinde bulunan MoS₂'nin bariyer görevi görmesi ve ayrıca PA66/1KS matrisinin büyük ölçekli parçalanmasını önlemesidir şeklinde açıklamışlardır.

%3 silikon katkısı ilavesi ise, PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin aşınma oranındaki değişim değerini %8,6 oranında azaltarak silikon katkılı kompozitin aşınma oranındaki değişim değeri $8,655E^{-11}$ mm³/Nm olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.23. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin malzemeye bağlı olarak aşınma oranındaki değişim grafiği (kayma hızı:0,8 m/s ve yük: 30 N).

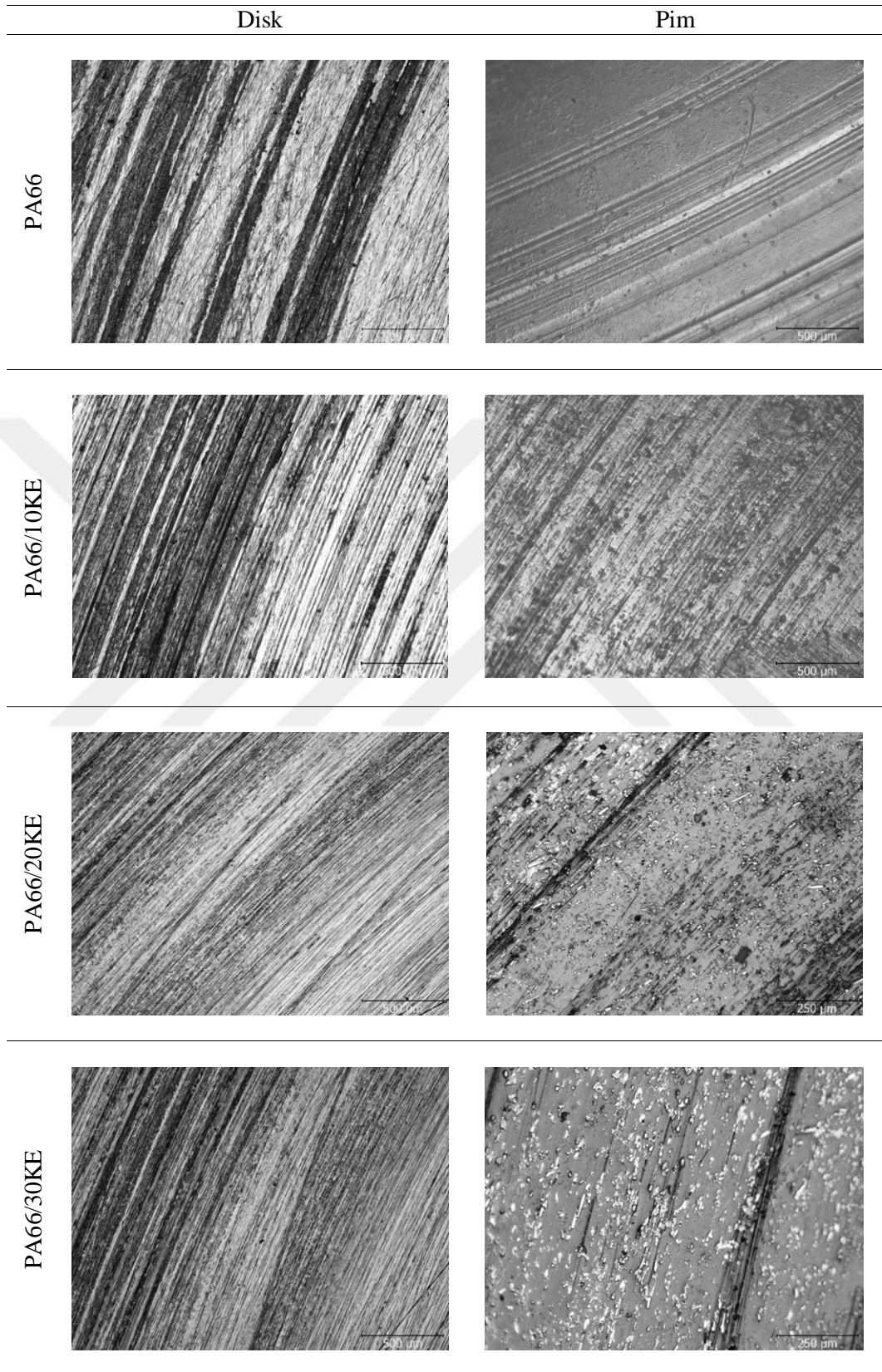
Şekil 5.24.'de PA66 polimeri ve PA66 kompozitlerinin 0,4 m/s kayma hızı ve 40 N yük altındaki aşınma deneyi sonrası elde edilen makro-disk resimleri verilmiştir.



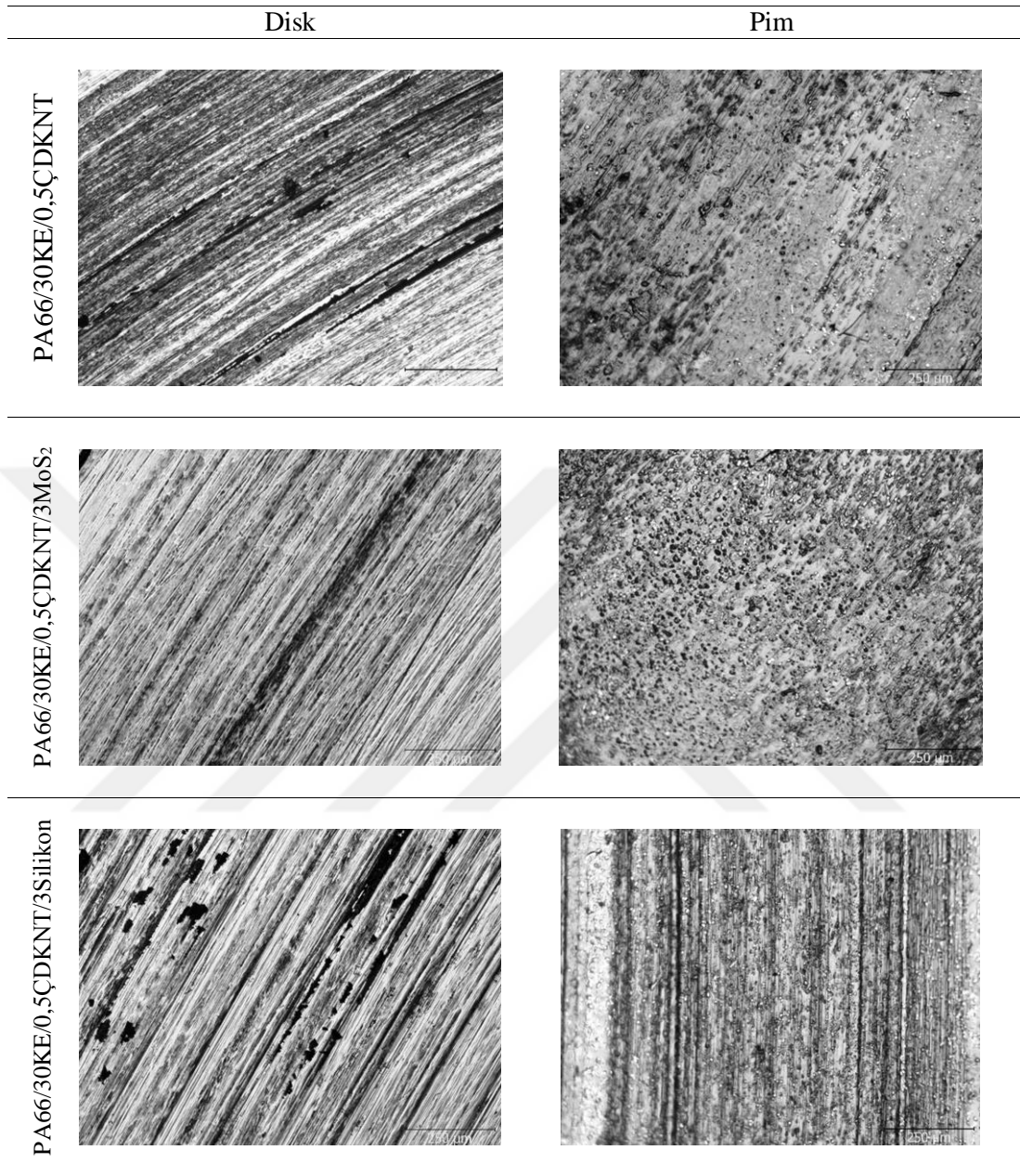
Şekil 5.24. PA66 polimeri ve PA66 kompozit numunelerinin aşınma deneyi disk incelemeleri (kayma hızı: 0,4 m/s ve yük: 40 N).

Şekil 5.25.'de PA66 termoplastiği ve farklı oranlarda KE katkılı PA66 kompozitlerinin, Şekil 5.26.'da ise PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 ÇDKNT, %3 MoS₂ ve %3 silikon katkılı PA66 kompozitlerinin, aşınma deneyi sonrası elde edilen aşınmış pim ile diskin yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri belirtilmiştir.

Disk resimleri incelendiğinde, tüm numunelerin yüzeylerinde transfer filmi tabakası oluşumu tespit edilmiştir. Bu tabakanın yoğunluğu PA66 kompozitlerinin aşınma ve sürtünme davranışlarını etkilemiştir. Pim resimleri incelendiğinde ise katkısız PA66 polimerinin yüzeylerinde derin ve geniş oyuklar gözlenirken, PA66 polimerine ilave edilen KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkıları ile bu oyukların sayısı ve etkisi azalmış, daha yumuşak bir yüzey elde edilmiştir. Li vd., (2013), PA6 polimeri ile, karbon ve cam elyafı ilaveli nanokompozit kullandıkları çalışmada, KE ilaveli kompozitin, PA6 polimeri ve CE ilave edilmiş kompozitten elde edilen yüzeye göre çok daha pürüzsüz bir yüzey oluşturduğunu bildirmişlerdir. Sebebi olarakta, KE malzemenin düşük yoğunluklu olması neticesinde KE'lerin birbirleriyle rahatlıkla bağlanmalarını ayrıca bu oluşan bağ sayesinde termal olarak muhteşem iletkenlikte zincirlenme oluşumunu göstermişlerdir.



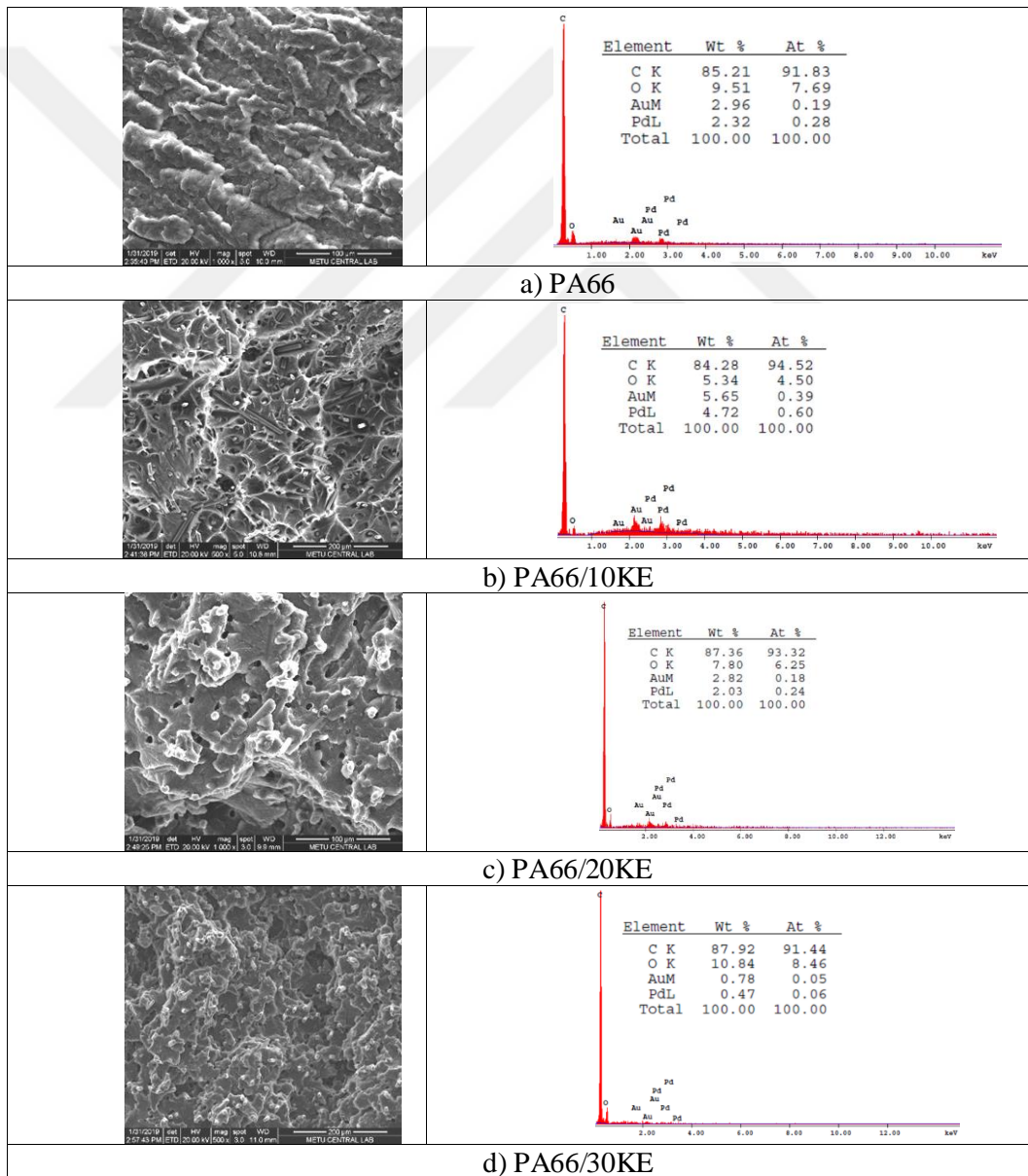
Şekil 5.25. PA66 polimeri ve KE katkı PA66 kompozitlerinin aşınmış pim ve disk yüzeyi elektron mikroskobu mikroyapı görüntüleri (kayma hızı: 0,4 m/s ve yük: 40 N).



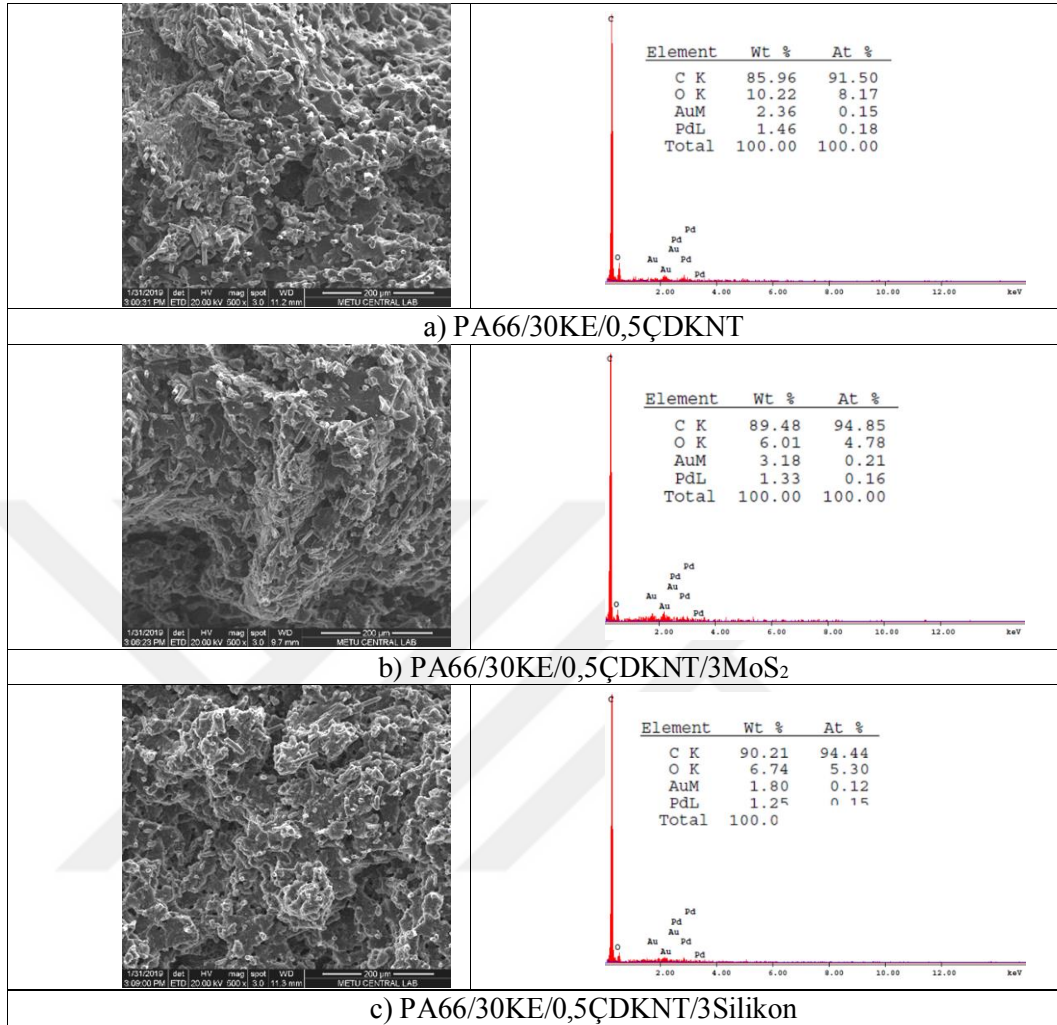
Şekil 5.26. ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66/30KE kompozitlerin aşınmış pim ve disk yüzeyi elektron mikroskopu mikroyapı görüntüleri (kayma hızı: 0,4 m/s ve yük: 40 N).

Şekil 5.27. ve Şekil 5.28.'de karbon elyaf, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66 kompozitlerinin kırılma yüzeyi morfolojileri verilmiştir. Olası takviye mekanizmasını ortaya çıkarmak için karbon elyaf, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66 polimer kompozitlerin kırılma yüzeyleri SEM analizi ile incelenmiştir. Kırılma yüzeyi morfolojisi katkının dağılımı, kırılma mekanizması ve matris/elyaf arayüzeyi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Karbon elyafların farklı yönlerde hizalandığı (aligned) ve ekstrüzyon süresince kayma kuvveti nedeniyle homojen dağıldığı görülmektedir. Şekil 5.27.a.'da katkısız PA66 polimerinin tipik kırılma yüzeyi

verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi son kırılmadan önce numunenin plastik deformasyona uğradığını gösteren bulut benzeri (cloud-like) çatlaklar oluşmuştur. Şekil 5.27.b-d.'de ise PA66/KE kompozitlerinin gevrek olarak kırıldığını gösteren pürüzsüz bir yüzey (smooth surfaces) yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle kopma uzaması gibi çekme testi sonuçları ile tutarlıdır. Bununla birlikte, matristen fiberlerin sıyrıldığı da (pulling out) görülmektedir. Ayrıca, karbon fiberlerin matris içerisine iyi bir şekilde gömüldüğü (embedded) ve matris ile fiberler arasında boşluk oluşmadığı gözlenmiştir. EDX sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerde C ve O elementlerinin mevcut olduğu görülmektedir.



Şekil 5.27. PA66 ve KE katkıli PA66 kompozitlerinin SEM görüntüleri.



Şekil 5.28. ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkı PA66/30KE kompozitlerinin SEM görüntüleri.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Saf yapıdaki PA66 termoplastiği ile PA66 polimeri içerisine eklenen ağırlıkça %10-20 ve 30 oran değerlerindeki KE, %0,5 oranında ÇDKNT, %3 oranında MoS₂ ve %3 oranında silikon katkıları ile elde edilen kompozit malzemelerle üretilmiş deney numunelerinin mekanik özellikleri, termal performansları ve tribolojik niteliklerine ait sonuçlar incelenmiştir. Mekanik özelliklerin incelenmesinde, numunelere çekme - eğme ayrıca darbe deneyi, termal özelliklerin incelenmesinde, HTD, Vicat, DSC, TGA ve DMA deneyleri, tribolojik özelliklerin incelenmesinde ise aşınma ve sürtünme deneyleri yapılmıştır.

- Mekanik özelliklerin incelendiği deney sonuçlarına göre; PA66 polimerine ilave edilen farklı oranlardaki KE katkısının, PA66 polimerinin çekme mukavemeti değerini artırdığı tespit edilmiştir ve artan KE miktarına bağlı olarak çekme mukavemetinin daha da arttığı sonucu elde edilmiştir. PA66/30KE kompozitine ilave edilen ÇDKNT ve MoS₂ katkıları da çekme mukavemetinin daha da artmasını sağlamıştır. Deneyler sonucunda en yüksek çekme mukavemeti değeri ise 203,25MPa ile PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompozit numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda KE, ÇDKNT ve MoS₂ katkıları PA66 polimerinin yapısını gevrek hale getirdiği gözlemlenmiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitine ilave edilen %3 silikon katkısı ise, yapıyı belli oranda sünek hale getirerek PA66/30KE/0,5ÇDKNT' nin çekme mukavemetini %28,2 oranında azaltarak 141MPa olarak elde edilmiştir.
- Çekme mukavemeti deney sonuçlarına benzer bir sonuç da, elastiklik modülü deneyinde elde edilmiş ve artan KE ve ÇDKNT ilaveleri PA66 polimerinin elastiklik modülü değerini artırmıştır. MoS₂ ve silikon katkıları ise PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin elastiklik modülü değerini sırası ile %9,8 ve %40 oranlarında azaltmıştır.
- PA66 polimerine ilave edilen %10-20 ve 30 oranlarında KE, %0,5 ÇDKNT, %3 MoS₂ ve %3 oranındaki silikon katkıları PA66 polimerinin kopma uzaması değerini azalttığı gözlemlenmiştir. Deneyler neticesinde en düşük kopma uzaması değeri %4,7 ile PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinde gözlemlenmiştir.
- PA66 termoplastiğine katılan KE, ÇDKNT, MoS₂ ayrıca silikon malzemeler, PA66 polimerininin eğme mukavemeti ve eğmedeki elastiklik modülü değerlerini benzer şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu artışın PA66 polimerinin yapısının içerisine ilave edilen katkılar ile sünek halden gevrek hale dönüştürmesi neticesinde olduğu tespit edilmiştir. Her iki deneyde de en yüksek mukavemet değeri PA66/30KE/0,5ÇDKNT

kompozitinde elde edilmiş ve bu değerin eğme mukavemetinde %3 MoS₂ katkısı ile %7, %3 silikon katkısı ile %24 oranında ve eğmedeki elastiklik modülünde ise %3 MoS₂ katkısı ile %10,5; %3 silikon katkısı ile %33 oranlarında azaldığı gözlemlenmiştir.

- PA66 polimerine ilave edilen %10 ve 20 oranlarında KE katkısı polimerin izot çentikli darbe mukavemetini sırası ile %45,4 ve %22,2 oranlarında azaltmış ve %30 KE ilavesi ise PA66 polimerinin darbe mukavemetini %5,2 oranında artırarak PA66/30KE kompozitinin darbe mukavemeti 6,12 kJ/m² olarak elde edilmiştir. PA66/30KE kompozitile ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkısı ile kompozitin darbe mukavemetini %19,1 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Sırası ile %3 oranlarında MoS₂ ve silikon katkıları ise PA66/30KE/0,5ÇDKNT kompozitinin darbe mukavemet değerini %6 ve %20,8 oranlarında arttırmıştır.
- Termal özelliklerin incelendiği deneyler sonucunda; HDT sıcaklık deneyinde, PA66 polimeri içerisine ilave edilen KE oranı artışı ile HDT sıcaklık değerinin arttığı görülmüştür. Bu artış %30 KE katkılı kompozitte %229,3 oranında tespit edilerek 193,6°C değerinde elde edilmiştir. Kompozitler içerisinde en yüksek HDT sıcaklık değeri PA66/30KE/0,5ÇDKNT nanokompozitinde 238,6°C, MoS₂ ve silikon katkılı nanokompozitlerde ise sırası ile 221,9°C ve 156,2°C olarak gözlemlenmiştir.
- Vicat deneyi metot B test sonuçları incelendiğinde 50 N yük altında PA66 polimerine ilave edilen katkılar polimerin Vicat sıcaklık değerinin %3,7 ile %6,1 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. En yüksek Vicat sıcaklık değeri 251,6°C ile PA66/30KE kompozitinde elde edilmiştir.
- DSC deneyi sonuçları incelendiğinde, PA66 polimerinin 263°C olan ergime sıcaklığı farklı oranlarda KE ilavesi ile 266°C civarında elde edilmiştir. PA66/30KE polimerine ilave edilen ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkıların ergime sıcaklığını çok düşük oranda azalttığı belirlenmiştir. Kristallenme oranları incelendiğinde ise PA66 polimerinin %32,9 olan kristallenme oranı %10KE, %20KE ve %30 KE ilavesi ile %38,3; %38,7 ve %32,6 oranlarında elde edilmiştir. PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 oranındaki ÇDKNT ise kristallenme oranını değiştirmemiştir. PA66/30KE/0,5ÇDKNT nanokompozitine ilave edilen %3 MoS₂ ve silikon katkıları ise kristallenme oranını artırmış ve kristallenme oranları %42,4 ve %39,5 oranlarında elde edilmiştir.
- TGA deneyi sonuçlarına göre, PA66 polimeri içerisine ilave edilen katkılarla elde edilen kompozitlerin, PA66 polimerinin bozunma başlangıç sıcaklıklarını arttırdığı belirlenmiştir. Benzer şekilde yapısal kararlılığın bir göstergesi olan %50 kütle kaybındaki sıcaklıklar incelendiğinde, PA66 polimerine ilave edilen KE, ÇDKNT, MoS₂

ve silikon katkılarına bağlı olarak bozunma sıcaklıklarının 5-20°C arasında arttığı belirlenmiştir.

- DMA sonuçları incelendiğinde ise, PA66 polimerinin camı geçiş sıcaklığı 47,42°C elde edilirken %10; %20 ve %30 KE, ÇDKNT, MoS₂ ve silikon katkılı PA66 kompozitlerin camı geçiş sıcaklıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Sırası ile %10-20 ve 30 KE katkılı kompozitlerde bu sıcaklık 52,93; 49,16 ve 51,89°C elde edilmiştir. PA66/30KE kompozitine ilave edilen %0,5 ÇDKNT katkısı camı geçiş sıcaklığını 8°C artırırken, %0,5 MoS₂ katkısı ise camı geçiş sıcaklığını 64,58°C' ye kadar artırmıştır. %3 silikon ilave edildiğinde ise PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3Silikon nanokompozitin camı geçiş sıcaklığı ise 60,38°C olarak elde edilmiştir.
- PA66 ve PA66 kompozitlerin tribolojik deney sonuçları incelendiğinde; 1000 m kayma mesafesinde, 0,4; 0,8 ve 1,2 m/s farklı kayma hızlarında, 20, 30 ve 40 N değerlerinde değişken yüklerde, numunelerin uygulanan yüke karşı elde edilen sürtünme katsayısı değerleri değişimleri gözlemlenmiştir. Tüm kayma hızları ayrı ayrı incelendiğinde, sabit kayma hızında numuneye uygulanan yük değerinin 20 N değerinden 40 N değerine artırılması sonrası numunelerin sürtünme katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %10, 20 ve 30 oranlarında KE katkılı kompozitlerin sürtünme katsayıları ise, 0,4 m/s kayma hızındaki yük 20 N değerinden 40 N değerine çıkarılınca, sırasıyla %12,7; %13,4 ve %19,3 oranlarında arttığı gözlenmiştir.
- Benzer şekilde, numunelerin sabit yük altında, kayma hızlarının artırılması ile sürtünme katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına göre bir örnek verecek olur isek, PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompozitinin 40 N yükte altında, 0,4 m/s kayma hızında 0,2182 μ olan sürtünme katsayısı değeri, 1,2 m/s kayma hızında %12,4 oranda artış göstererek 0,2453 μ değerinde tespit edilmiştir.
- Deneyler sonucunda, PA66 polimerine ilave edilen katkıların sürtünme katsayısını azalttığı gözlemlenmiştir. Malzemeye bağlı olarak en düşük sürtünme katsayısı değeri PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ kompozitinde ve 0,2034 μ olarak elde edilmiştir. Buna sebebinin, PA66 polimerine ilave edilen farklı oranlarda KE ve ÇDKNT, MoS₂ katkılarının PA66 polimerini sünek halden rijit hale dönüştürmesine bağlanmıştır.
- PA66 ve PA66 kompozitlerine uygulanan farklı yüklerde, artan kayma hızmalarına göre aşınma oranlarındaki değişim incelenmiş ve tüm numunelerde kayma hızının artırılması ile aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, farklı kayma hızlarında numunelere uygulanan yüklerin artırılması ile aşınma oranının arttığı sonucu elde edilmiştir.

- Malzemeye bağılı olarak sabit kayma hızı ve sabit yük altında PA66 polimerine ilave edilen katkıların PA66 polimerinin aşınma oranının azalttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç polimere ilave edilen katkıların aşınma direncini artırdığını ifade etmektedir. Tüm deney numuneleri içerisinde, aşınmaya karşı gösterdiği direnç ve sürtünmeye karşı en dirençli kompozit PA66/30KE/0,5ÇDKNT/3MoS₂ olarak tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

- Farklı oranlarda ÇDKNT katkıları kullanılarak termal ve mekanik deney sonuçları karşılaştırılabilir.
- MoS₂ ve silikon oranları artırılarak aşınma ve sürtünme katsayılarını daha da azaltılabilecek çalışmalar yapılarak sonuçlar değerlendirilebilir.
- PA66 polimerine %50 oranında PP polimeri eklenerek aynı oranlarda nano ve mikro malzemeler eklenerek mekanik, termal ve tribolojik deneyler yapılarak sonuçlar incelenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

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

Akbulut, H., (2014). Nano Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ders Notu Slaytı, (Erişim Tarihi: Temmuz 2019).

Andrews, R., ve Weisenberger, M., (2004). Carbon nanotube polymer composites. *Current Opinion In Solid State and Materials Science*, 8, 31-37.

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

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

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*, 67, 2854-2863.

Autay, R., Missaoui, S., Mars, J., Dammak, F., (2019). Mechanical and tribological study of short glass fiber-reinforced PA 66. *Polymers and Polymer Composites*, 1–10.

Bahadur, S., ve Gong, D., (1992). The action of fillers in the modification of the tribological behavior of polymers. *Wear*, 158, 41–58.

Baird, D. G., (2001). Encyclopedia of Physical Science and Technology, Third Edition. *Elsevier Science*, 621-640.

Baker A. M. M., ve Mead J., (2000). Thermoplastics, Editor: Harper C. A., *Modern Plastics Handbook*, 1st ed., McGraw-Hill, New York, 18-23.

Basavaraj, E., Ramaraj, B., Lee, J. H., Siddaramaiah., (2013). Microstructure, Thermal, Physico-Mechanical and Tribological Characteristics of Molybdenum Disulphide-Filled Polyamide 66/Carbon Black Composites, Society of Plastics Engineers. *Polymer Engineering and Science*, 1676-1686.

Başer, İ., (1992). Elyaf Bilgisi. *Marmara Üniversitesi Yayını*, No: 524, İstanbul, 179.

Biron, M., (2007). Thermoplastics and Thermoplastic Composites, Technical Information for Plastics Users. *Elsevier*, U.K., 944.

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*, 19(33), 3304-3312.

Brandrup, J., ve Immergut, E. H., (1989). *Polymers Handbook*, 1st ed., Wiley-Interscience Chichester, 58-64.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

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*, 41, 1108-1115.

Budinski, K. G., ve Budinski M. K., (2010). Engineering Materials: Properties and Selection. *Prentice Hall PTR*, 774.

Cai, Z., ve Wang, W., (2012). Friction and wear properties of polyamide 66 composites filled with carbon fiber under dry sliding and oil lubricated condition. *Applied Mechanics and Materials*, 148-149, 612-615.

Campbell, F. C., (2004). Manufacturing Processes for Advanced Composites. *Elsevier*, 2-100.

Chang, K. K., (2001). Aramid Fibers, ASM Handbook Composites, ASM International. *Material Park*, Ohio, 46-84.

Chang, L., Zhang, Z., Zhang, H., Schlarb, A. K., (2006). On the sliding wear of nanoparticle filled polyamide 66 composites. *Composites Science and Technology*, 66, 3188–3198.

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*, 109, 22237-22243.

Chen, Z., Liu, X., Lu, R., Li, T., (2007). Friction and Wear Mechanisms of PA66/PPS Blend Reinforced with Carbon Fiber. *Journal of Applied Polymer Science*, 105, 602-608.

Choi, E. Y., Roh, S. C., Kim, C. K., (2014). Noncovalent functionalization of multi-walled carbon nanotubes with pyrene-linked nylon66 for high performance nylon66/multi-walled carbon nanotube composites. *ScienceDirect, Carbon*, 72, 160-168.

Chung, D. D. L., (1994). *Carbon Fiber Composites*, Butterworth-Heinemann, USA, 18-43.

Chung, D. D., (2010). Composite Materials Science and Application. *Springer*, 24-36.

Coleman, J. N., Khan, U., Gunko, Y. K., (2006). Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes. *Advanced Materials*, 18(6), 689-706.

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

Çelep, Ş., (2007). Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.

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

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Donnet, J. B., Wang, T. K., Peng, J. C. M., (1998). *Carbon Fibers*, Marcel Dekker, New York, 584.
- Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Jorio, A., (2004). Unusual Properties and Structure of Carbon Nanotubes. *Annual Reviews Material*, 34, 247-278.
- Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Saito, R., (1995). *Carbon*, 33, 883.
- Ebewele R. O., (2000). *Polymer Science and Technology*, 1st ed., CRC Press LLC, Florida, 8-74.
- Erkan, G., Erdoğan, Ü. H., Kayacan, O., (2005). Tekstil Sektöründe Nano-Teknoloji Uygulamaları, Tekstil Teknolojileri ve Tekstil Makinaları Kongresi, Gaziantep, 19-27.
- Ersoy, H. Y., (2000). *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, İstanbul, 11-15, 95-105, 110-116.
- Ersoy, H. Y., (2001). *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayınları, 66, 3-13.
- Esmizadeh, E., Irani, A., Naderi, G., Ghoreishy, M. H. R., Dobiou, C., (2017). Effect of Carbon Nanotube on PA6/ECO Composites. Morphology Development, Rheological and Thermal Properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(12), 45977.
- Fu, S. Y., Lauke, B., Mader, E., Yue, C. Y., Hu, X., Mai, Y. W., (2001). Hybrid Effects on Tensile Properties of Hybrid Short-Glass-Fiber and Short-Carbon-Fiber Reinforced Polypropylene Composites. *Journal of Materials Science*, 36, 1243-1251.
- Garcia, E. J., Wardle, B. L., Hart, A. J., Yamamoto, N., (2008). Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ. *Composites Science and Technology*, 68(9), 2034-2041.
- Gbadeyan, O. J., Kanny, K., Mohan, T. P., (2017). Influence of the multi-walled carbon nanotube and short carbon fibre composition on tribological properties of epoxy composites. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 1-7.
- Hahn, H. T., ve Tsai, S. W., (1980). *Introduction to composite material*, CRC Press., 1.
- Hançer, S., (2010). Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Mekanik Özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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*, 8, 177-186.
- Hatipoğlu, G., (2014). Polifitalamid Kompozitlerin Mekanik, Termal ve Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hazer, S., (2018). Karbon Elyaf Takviyeli Poli(Laktik Asit)/Polikarbonat Kompozitlerin Isıl, Yanma ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

Hollaway, L., (1994). *Handbook of Polymer Composites for Engineers*, UK, Woodhead Publishing, 47.

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

Hoque, A., Alam, M. K., Tibbets, G. G., (2001). Synthesis of catalyst particles in a vapor grown carbon fiber reactor. *Chemical Engineering Science*, 56(14), 4233-4243.

Horovistiz, A., Laranjeira, S., Davim, J. P., (2018). Influence of sliding velocity on the tribological behavior of PA66GF30 and PA66 + MoS₂: an analysis of morphology of sliding surface by digital image processing. *Polymer Bullets*, 75, 5113–5131.

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*, 4, 4848-4855.

<http://www.artikompozit.com.tr/> (Erişim tarihi: Temmuz 2019).

<http://www.carbon-fiber.com/cfminoz.pdf/> / (Erişim tarihi: Temmuz 2019).

<http://www.carbonfiber.gr.jp/english/> (Erişim tarihi: Temmuz 2019).

<http://www.zoltek.com/carbonfiber/how-is-it-made/> (Erişim tarihi: Temmuz 2019).

<https://inovatifkimyadergisi.com/molibden-disulfur/> (Erişim tarihi: Temmuz 2019).

Itoh, M., Inoue, K., Hirayama, N., Sugimoto, M., Seguchi, T., (2002). Fiber reinforced plastics using a new heat-resistant silicon based polymer. *Journal of Materials Science*, 37(17), 3795-3801.

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

Jikan, S. S., Ariff, Z. M., Ariffin, A., (2010). Influence of filler content and processing parameter on the crystallization behaviour of PP/kaolin composites. *Journal Thermal Analysis Calorimetry*, 102, 1011– 1017.

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

Kanapitsas, A., ve Tsonos, C., (2009). Study of Electrical/Dielectric and Thermomechanical Properties of Polymer-Carbon Nanotubes Nanocomposites. *Research Gate*, 45.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Karadurmuş, M., (2017). Epoksi Reçine ile Hazırlanan Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

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

Kaya A. İ., (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan Ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.

Kaya, A. İ., (1995). Atık Kâğıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması, Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Kickelbick, G., (2006). *Hybrid Materials: Synthesis Characterization and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 516.

Kiselev, N. A., ve Zakharov, D. N., (2001). Electron Microscopy of Carbon Nanotubes. *Crystallography Reports*, 46(4), 577-585.

Koyunbakan, M., Yetgin, S. H., Yıldırım, F., Kuş, G., Eskizeybek, V., Genç, A., (2017). Karbon Elyaf Dolgulu PA6 Polimer Kompozitlerinin Aşınma Özellikleri Üzerine Uygulanan Yük ve Kayma Hızının Etkisi, *APJES*, 5(3), 49-57.

Kuchibhatla, S. V., (2007). One Dimensional Nanostructured Materials. *Progress in Materials Science*, 52, 699-913.

Kumar, S. S., ve Kanagaraj, G., (2016). Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4347-4357.

Kurt, M., (2010). PA6 Kompozitlerinin Termal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Kuş, G., (2019). Karbon Nanotüp Katkılı Poliamit 6 Polimer Nanokompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.

Lee, S. M., Shin, M. W., Jang H., (2014). Effect of carbon-nanotube length on friction and wear of polyamide 6,6 nanocomposites. *Wear*, 320, 103-110.

Li, D. X., You, Y. L., Deng, X., Li, W. J., Xie, Y., (2013). Tribological properties of solid lubricants filled glass fiber reinforced polyamide 6 composites. *Materials and Design*, 46, 809-815.

Li, J., ve Xia, Y. C., (2010). The Friction and Wear Properties of Thermoplastic PA6 Composites Filled with Carbon Fiber. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 23, 337-349.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Li, M., Wan, Y., Gao, Z., Xiong, G., Wang, X., Wan, C., Luo, H., (2013). Preparation and Properties of Polyamide 6 Thermal Conductive Composites Reinforced with Fibers. *Materials and Design*, 51, 257–261.

Li, Z. H., (2012). Addition of CF on Tribological Properties of POM Composite. *Materials Technology*, 27(3), 230-232.

Liang, J., Xu, Y., Wei, Z., Song, P., Chen, G., Zhang, W., (2014). Mechanical properties, crystallization and melting behaviors of carbon fiber-reinforced PA6 composites, *Springer, Journal of Thermal Analysis Calorimetry*, 115, 209-218.

Lijima, S., (2002). Carbon nanotubes: past, present, and future. *Physica B*, 323, 1-5.

Lingesh B. V., Ravikumar, B. N., Rudresh, B. M., (2016). Mechanical Characterization of Hybrid Thermoplastic Composites of Short Carbon Fibers and PA66/PP. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, 4(4), 425-434.

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

Liu, W., Huang, C., Gao, L., Wang, J., Dang, H., (1991). Study of the friction and wear properties of MoS₂-filled nylon 6. *Wear*, 151, 111–118.

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*, 70, 328-335.

Luo, W., Liu, Q., Li, Y., Zhou, S., Zou, H., Liang, M., (2016). Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber. *Composites Part B: Engineering*, 91, 579-588.

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

Mareri, P., Bastide, S., Binda, N., Crespy, A., (1998). Mechanical behaviour of polypropylene composites containing fine mineral filler: effect of filler surface treatment. *Composites Science and Technology*, 58, 747-752

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

Mark, H. F., (2004). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc., 497-508.

Marşoğlu, M., (1986). *Plastik Malzemeler*, Arpaz Matbaacılık Tesisleri, İstanbul.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mazumdar, S. K., (2002). *Composites Manufacturing - Materials, Product and Process Engineering*, CRC Press, 20-73.
- Mazumdar, S., (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*, CRC Press, 18-27.
- Melton G. H., Peters E. N., Arisman R. K., (2011). *Engineering thermoplastics*, Editors: Kutz M., Applied plastics engineering handbook: processing and materials, 1st ed., Elsevier, New York, 84.
- Miracle D. B., ve Donaldson, S. L., (2001). *Composites, ASM Handbook*, 1st ed., ASM International, New York, 340-360.
- Niyogi, 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*, 35, 1105-1113.
- Njuguna, B. J., Pielichowski, K., Alcock, J. R., (2007). Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites. *Advanced Engineering Materials*, 9(10), 835-847.
- Örs, A., (2009). Karbon Nanotüplerin Polimerler ile Fonksiyonlaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, E., (2001). Polipropilen (PP) ve Naylon 6 (PA6) Plastiklerine Katılan Cam Elyafın Mekanik Özelliklere Etkisinin Deneysel Araştırması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özsoy, N., (2015). Polimer Esaslı Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Tribolojik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Qu, J., (1993). The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials. *Mechanics of Materials*, 14(4), 269-281.
- Raajeshkrishna, C. R., Pradeep, A. S., Kumar, RD. R., (2019). Influence of fiber content on mechanical, tribological properties of short basalt fiber-reinforced nylon 6 and polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1–15.
- Ragondet, A., (2005). Experimental Characterization of the Vacuum Infusion Process, (Doctoral dissertation, University of Nottingham, 2005), Dissertation Abstracts International.
- Rajeshbijwe, J., ve Tewari, U., (2002). Abrasive wear performance of various polyamides. *Wear*, 252(9-10), 769-776.
- Ren, X., Chen, C., Nagatsu, M., Wang, X., (2011). Carbon Nanotubes as Adsorbents in Environmental Pollution Management A review. *Chemical Engineering Journal*, 170, 395- 410.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rezaei, F., Yunus, R., Ibrahim, N. A., (2008). Development of Short Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composite for Car Bonnet. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 47(4), 351-357.
- Rezaei, F., Yunus, R., Ibrahim, N. A., (2009). Effect of Fiber Length on Thermomechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composites. *Materials and Design*, 30, 260-263.
- Rezaei, F., Yunus, R., Ibrahim, N. A., Mahdi, E. S., (2007). Effect of Fiber Loading and Fiber Length on Mechanical and Thermal Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composite. *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 11(1), 181-188.
- Rosato, D. V., (1997). *Designing with reinforced composites*, Hanser Gardner Publications, 83.
- Rudresh, B. M., ve Kumar, B. N. R., (2018). Influence of Experimental Parameters on Friction and Wear Mechanisms of PA66/PTFE Blend Reinforced with Glass Fiber. *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 71(2), 339-349.
- Saçak, M., (2002a). *Lif ve Elyaf Kimyası*. Gazi Kitabevi, Ankara, 195.
- Saçak, M., (2002b). *Polimer Kimyası*, Gazi Kitabevi, Ankara, 85-89, 221-224, 275-297, 393-397.
- Saçak, M., (2005). *Polimer Teknolojisi*, Gazi Kitabevi, Ankara, 431.
- Samyn, P., De Baets, P., Schoukens, G., (2009). Influence of internal lubricants (PTFE and silicon oil) in short carbon fibre-reinforced polyimide composites on performance properties. *Tribology Letter*, 36(2), 135-146.
- Saylan, T., (2010). Poliamit 6 Kompozitlerin Termal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Schwartz, M. M., (1994). *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill Companies, USA, 651.
- Senthilvelan, S., ve Gnanamoorthy, R., (2006). Damping characteristics of unreinforced glass and carbon fiber reinforced nylon 66 spur gears. *Polymer Testing*, 25(1), 56-62.
- Seunghun, H., ve Myung, S., (2007). Nanotube Electronics, A Flexible Approach to Mobility. *Nature Nanotechnology*, 2, 207-208.
- Seventekin, N., (2003). *Kimyasal Lifler*. Ege Üniversitesi Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma-Uygulama Merkezi Yayını, İzmir, 130.
- Seydibeyoğlu, M. Ö., (2012). A Novel Partially Biobased Pan-Lignin Blend As A Potential Carbon Fiber Precursor, *Biomed Research International*, 25-76.
- Shalin R., (1995). *Polymer Matrix Composite*, Chapman and Hall, 43-96.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sirong, Y., Zhongzhen, Y., Wing, M. Y., (2007). Effects of SEBS-g-MA on Tribological Behaviour of Nylon 66 Prganoclay Nanocomposites. *Tribology International*, 40, 855-862.
- Song, Y. S., ve Youn, J. R., (2005). Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites. *Carbon*, 43, 1378–1385.
- Srinath, G., ve Gnanamoorthy, R., (2007). Sliding wear performance of polyamide 66-clay nanocomposites in water. *Composites Science and Technology*, 67(3-4), 399-405.
- Suresha, B., Kumar, B. N. R., Venkataramareddy, M., Jayaraju, T., (2010). Role of Micro/Nano Fillers on Mechanical and Tribological Properties of Polyamide66/Polypropylene Composites. *Materials and Desing*, 31, 1993-2000.
- Szymczyk, A., Roslaniec, Z., Zenker, C., Senderek, E., Funari S., (2011). Crystalization Behaviour of Poly Trimethylene Terephthalate SWNT Nanocomposites. *Express Polymer Letters*, 5, 977.
- Şahin, Y., (2000). *Kompozit Malzemeler Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara, 13-17, 25-32, 65-68, 327.
- Şahin, Y., (2006). *Kompozit Malzemelere Giriş*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 27-32.
- Şenol, F., Tayyar, A. E., Doğan, G., Yaman, N., (2005). Nanolifler ve Uygulama Alanları. *Tekstil Maraton*, 15(78), 20-25.
- Tang, G., Chang, D., Wei, G., Lu, H., Yan, W., Liu, B., (2012). The Effect of Arylboronic Acid Treatment of Carbon Fiber on the Mechanical and Tribological Properties of PA66 Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(4), 329-332.
- Terrones, M., (2003). Science and Technology of the Twenty-First Century, Synthesis, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes. *Annual Revie Materials Research*, 33, 419-501.
- Tewari, U. S., Bijwe, J., Mathur, J. N., Sharma. I., (1992). Studies on abrasive wear of carbon fiber (short) reinforced polyamide composites. *Tribology International*, 25, 53–60.
- Todd, D. B., (2005). *Functional Fillers for Plastics*, Xanthos, M., Wiley-VCH Verlag GmbH&Co KGaA, 1-16, 39-55.
- Turhan, M., (2007). Karbon Nanotüplerin Mekanik Özelliklerine Elyaf Hacim Oranlarının Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Ünal, H., (2018). PA6/PTFE Karışımlarının Tribolojik Performanslarının İncelenmesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi. *Technological Applied Sciences*, 13(2), 89–97.
- Valcarcel, M., Cardenas, S., Simonet, B. M., (2007). Role of Carbon Nanotubes in Analytical Science Analytica. *Chemistry*, 79, 4788-4797.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vasiliev, V. V., ve Morozov, E., (2001). *Mechanics and analysis of composite materials*, Elsevier Publisher, 26.
- Winer, W. O., (1967). Molybdenum disulphide as a lubricant: a review of fundamental knowledge. *Wear*, 10, 422–452.
- 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*, 93, 378-386.
- Xing, Y., Zhang, G., Ma, K., Chen T., Zhao X., (2009). Study on the Friction and Wear Behaviors of Modified PA66 Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48(6), 633-638.
- 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*, 25(7), 1218-1225.
- Xu, L., Zhu, Z., Chen, G., Qu, C., (2010). Effect of load and sliding velocity on tribological behaviors of aramid fiber reinforced PA1010 composites. *Industrial Lubrication and Tribology*, 62(1), 46–51.
- Yağlıkcı, S., (2012). Karbon Nanotüp Üretiminde Katalizörün Gaz Fazlı Değişim Profiline Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yaman, N., Öktem, T., Seventekin, N., (2006). Karbon liflerinin üretimi, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 16(3), 164-173.
- Yaman, N., Öktem, T., Seventekin, N., (2007). Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 17(2), 90-95.
- Yeşil, S., (2010). Processing and Characterization of Carbon Nanotube Based Conductive Polymer Composites, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- Yin, H., ve Zhao, Y., (2016). *Introduction to the Micromechanics of Composite Materials*, CRC Press, 32.
- Yurttaş, Ç., ve Afşar E., (2000). *CTP Teknolojisi*, 4. Basım, Cam Elyaf, 8-44.
- Zhang, W. D., Shen, L., Phang, I. Y., Liu, T., (2004). Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6 Composite Prepared by Simple Melt-Compounding, American Chemical Societ. *Macromolecules*, 37, 256-259.
- Zhao, L., Zheng, L., Zhao, S., (2006). Tribological performance of nano Al₂O₃ reinforced polyamide 66 composites. *Materials Letters*, 60, 2590–2593.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhou, S., Zhang, Q., Wu, C., Huang, J., (2013). Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of polyamide6/polyphenylene sulfide composites. *Materials and Design*, 44, 493–499.

Zhu, P., Wang, X., Wang, X., Huang, P., Shi, J., (2006). Tribology performance of molybdenum disulphide reinforced thermoplastic polyimide under dry and water lubrication conditions. *Industrial Lubrication and Tribology*, 58, 195–201.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı ve Adı : ÖZSARIKAYA, Bilal

Doğum Tarihi ve Yeri : 30.11.1979, Eğirdir/ISPARTA

E-Mail : bozsarikaya34@gmail.com

Eğitim Durumu

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	DPÜ, Fen Bilimleri Enst. İleri Teknolojiler Makine	Devam ediyor
Lisans	PAÜ, Makine Mühendisliği Fakültesi	2001
Lise	Isparta Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi,	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-.....	İhlas Ev Aletleri İml. San. Ve Tic. A.Ş.	ArGe Merkezi Mühendisi
2003-2017	İhlas Ev Aletleri İml. San. Ve Tic. A.Ş.	Ar&Ge Mühendisi

Yabancı Dil : İngilizce

Bildiriler

Maden, H., Kamber, Ö. Ş., Dipçin, E., Uğur, H., Özsarıkaya, B., İğneci, A., (2016), Fdm Teknoloji İle Üretilen Prototip Parçalarının Hataları Ve Hataların Önlenmesi, 3b Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, s. 65-75.

Maden, H., Kamber, Ö. Ş., Özsarıkaya, B., Kamber, B. R., (2108), Hassas ve Dar Yüzeylerin Temizlenmesi için Aparat Geliştirilmesi, 3'rd International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE 2018).

Kamber, Ö. Ş., Özsarıkaya, B., Maden, H., Kamber, B. R., (2018), Kasasız Su Arıtma Cihazının Metal Olan Taşıyıcılarının Plastik Olarak Üretilmesi İçin Tasarlanması Ve Prototip Üretilmesi, 3'rd International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE 2018).