

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

LİNEER AKTÜATOR MOTOR DİŞLİLİLERİNDE
KULLANILMAK ÜZERE KENDİ KENDİNİ YAĞLAYICI
POLİMERİK MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ

FATİH GÖKGÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ MERVE MOCAN

TEMMUZ 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

LİNEER AKTÜATOR MOTOR DİŞLİLİLERİNDE
KULLANILMAK ÜZERE KENDİ KENDİNİ YAĞLAYICI
POLİMERİK MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ

FATİH GÖKGÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ MERVE MOCAN

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**DEVELOPMENT OF SELF-LUBRICATING
POLYMERIC MATERIALS FOR USE IN LINEAR
ACTUATOR MOTOR GEARS**

FATİH GÖKGÖZ

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**

ADVISOR: ASST.PROF. MERVE MOCAN

JULY 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 01/07/2024 tarih ve 2024/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 19/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fatih GÖKGÖZ'ün tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Merve MOCAN

ÜYE

: Doç.Dr.Emel KURAM

ÜYE

: Dr.Öğr.Üyesi Gülşah Yaman UZUNOĞLU

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

*Aileme
ve
biricik eşime*

ÖZET

Lineer aktüatörlerde, DC motorun dönme hareketi dişli ve sonsuz vida yardımıyla doğrusal harekete çevrilir. Aktüatörlerde kullanılan dişli ve somunlar yüksek mekanik özellikler ve düşük sürtünme gerektirir, Uygulamalarda genellikle yüksek mekanik özellikleri ve diğer polimerlere nazaran sürtünme katsayısı daha düşük polioksimetilen (POM) gibi polimerler kullanılmaktadır. Fakat bu polimer tek başına kullanıldığında dışarıdan yağlayıcı bir malzeme kullanımı gereksinimi vardır. Bu çalışmanın amacı dışarıdan yağlayıcı kullanmadan en düşük sürtünme katsayılı bununla beraber yeterli mekanik özelliklere sahip ‘kendi kendini yağlayıcı’ polimer karışımları hazırlamaktır. Bu amaç için genellikle POM’a bir miktar politetrafloroetilen (PTFE) katılmakta ise de yeterli olmamaktadır. Sürtünme katsayısının daha fazla düşürülebilmesi hızlı tıbbi müdahalelerin gerektiği uygulamalarda avantaj sağlayacak, ürünün ömrünün uzamasıyla karbon, su, enerji ayak izini düşürerek, sürdürülebilirliğinin arttırması açısından büyük avantajlar sağlayacaktır. Bu çalışmada bu amaçla POM-PTFE polimer karışımına karbon nanotüp (CNT), molibden disülfür (MoS_2), titanyum dioksit (TiO_2), zirkonyum dioksit (ZrO_2) katkıları kullanılmıştır.

POM-PTFE'nin ağırlıkça %90:10 oranındaki temel karışımına, farklı oranlarda CNT, MoS_2 , ZrO_2 ve TiO_2 gibi nano ve mikro boyutlu katkı maddeleri eklenmiştir. Çift vidalı ekstrüder kullanılarak granül formunda malzemeler hazırlanıp ardından enjeksiyon kalıplama yöntemiyle testler için gerekli numuneler ve son ürün olarak dişli numuneleri üretilmiştir. Sürtünme özellikleri kuru koşullar altında pin-on-disk tribometre cihazında ölçülmüştür. Morfolojik özellikleri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca üretilen dişli numuneleri aktüatöre montaj edilerek son ürün testleri gerçekleştirilmiştir. Lineer aktüatörün çektiği akım ölçülerek yük değişimleri ve sürtünme etkileri analiz edilmiştir.

POM%90-PTFE%10’a karışımına CNT katkısının sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür (%0,5 CNT için %13,45 ve %1 CNT katkısı %9,80 iyileşme). Geleneksel POM ve POM-PTFE karışımlarına kıyasla 3 nokta eğme testinde %0,5 katkılı CNT için 82,75 MPa eğilme gerilmesi %2,80 iyileşme sağlamış ve %9,12 uzama miktarında ise %4,94 lük bir iyileşme sağlamıştır ve aynı zamanda esneme kabiliyetini artırdığı gözlemlenmiştir. POM%90-PTFE%10’a %0,5 TiO_2 eklenmiş karışımda eğilme dayanımı 82,12 MPa olmuş ve POM%90-PTFE%10’a göre %2,01 iyileşme sağlamıştır. Eğilme dayanımı %0,5 ZrO_2 eklenmiş kompozitlerde 82,76 MPa olmuş ve POM%90-PTFE%10’a göre %2,81 iyileşme sağlamıştır. Optimum formülasyon (%89,5 POM, %10 PTFE, %0,5 CNT) üstün mekanik ve sürtünme özellikleri sergileyerek onu yüksek performanslı lineer aktüatörlerde kullanım için ideal bir aday malzeme haline getirmiştir.

Sürtünme katsayısının azaltılmasının ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinin POM/PTFE malzemelerinin performansını artırıp kullanım ömrünü uzatarak malzemenin sürdürülebilirliğini başarıyla artırmıştır. Ek olarak, ürün daha az akım çektiği için daha düşük enerji tükettiği için bu malzemelerin kullanıldığı sistemler de daha sürdürülebilir ve verimli olarak tasarlanabilecektir.

Anahtar Kelimeler: POM, PTFE, Dişli ürünler, Lineer Aktüatör, Sürtünme katsayısı, Karbon nanotüp.

ABSTRACT

In linear actuators, the rotational motion of the DC motor is converted into linear motion with the help of gears and lead screws. The gears and nuts used in actuators require high mechanical properties and low friction. In applications, polymers such as polyoxymethylene (POM), which has high mechanical properties and a lower friction coefficient compared to other polymers, are generally used. However, when this polymer is used alone, it requires an external lubricant. The aim of this study is to prepare 'self-lubricating' polymer blends that have the lowest friction coefficient and sufficient mechanical properties without using an external lubricant. For this purpose, a small amount of polytetrafluoroethylene (PTFE) is generally added to POM, but this is not sufficient. Reducing the friction coefficient further will provide significant advantages by extending the product's life, reducing its carbon, water, and energy footprint, and increasing its sustainability. The use of actuators made from these materials will be effective in saving lives, especially in applications that require very rapid medical intervention in this study, carbon nanotubes (CNT), molybdenum disulfide (MoS_2), titanium dioxide (TiO_2), and zirconium dioxide (ZrO_2) additives were used in the POM-PTFE polymer blend for this purpose.

Different proportions of nano and micro-sized additives such as CNT, MoS_2 , ZrO_2 , and TiO_2 were added to the basic POM-PTFE mixture in a 90:10 weight ratio. The materials were prepared in granule form using a twin-screw extruder and then the necessary samples for tests and gear samples as the final product were produced using the injection molding method. Friction properties were measured under dry conditions using a pin-on-disk tribometer device. Morphological properties were examined using a scanning electron microscope (SEM). Additionally, the produced gear samples were mounted on actuators, and final product tests were performed. The current drawn by the linear actuator was measured to analyze load changes and friction effects.

It was observed that the addition of CNT to the POM%90-PTFE%10 mixture significantly reduced the friction coefficient (13.45% improvement for 0.5% CNT and 9.80% improvement for 1% CNT addition). Compared to traditional POM and POM-PTFE mixtures, the three-point bending test showed a bending stress of 82.75 MPa with a 2.80% improvement for 0.5% CNT and a 4.94% improvement in elongation amounting to 9.12%, while also increasing the flexibility. The bending strength in the mixture with 0.5% TiO_2 added to POM%90-PTFE%10 was 82.12 MPa, showing a 2.01% improvement compared to POM%90-PTFE%10. The bending strength in composites with 0.5% ZrO_2 added was 82.76 MPa, showing a 2.81% improvement compared to POM%90-PTFE%10. The optimum formulation (89.5% POM, 10% PTFE, 0.5% CNT) demonstrated superior mechanical and friction properties, making it an ideal candidate material for use in high-performance linear actuators. Reducing the friction coefficient and improving the mechanical properties have successfully increased the performance and extended the lifespan of POM/PTFE materials, enhancing their sustainability. Additionally, since the product draws less current and thus consumes less energy, systems using these materials can be designed to be more sustainable and efficient.

Keywords: POM, PTFE, Gear products, Linear actuator, Friction coefficient, Carbon nanotube.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, bana rehberlik eden danışman hocam Dr. Merve MOCAN'a bu süreçte gösterdiği sabır ve sunduğu değerli yönlendirmeler için minnettarım. Bilimsel bakış açımı geliştirmemdeki katkıları paha biçilemez. Kendisine derin şükranlarımı sunarım. Bilgi birikimi, deneyimi ve teşvikleri olmadan bu çalışma mümkün olamazdı.

Araştırma sürecinde bana her türlü desteği sağlayan Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve teknik personeline teşekkür ederim.

Üretim sırasında yardımcı olan Politem Plastik ve Tekstil Paz. San. Dış. Tic. A.Ş. ve çalışanlarına ve Polimot Lineer Hareket Sistemleri ve Mekatronik San. Ltd. Şti çalışanlarına emekleri için teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreçte bana sabır ve anlayış gösteren ve her zaman yanımda olan aileme en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Her birinizin katkısı, bu çalışmanın tamamlanmasında büyük bir rol oynamıştır. Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Lineer Aktüatörler	1
1.2. POM	3
1.2.1. POM'un İşlenmesi ve Kullanım Alanları	5
1.3. Polimerlerin Sürtünmesi ve Aşınması	7
1.3.1. Sürtünme	7
1.3.2. Yağlama	8
1.3.3. Plastiklerde Sürtünme	9
1.3.4. Aşınma	11
1.3.5. Plastiklerde Aşınma	12
1.4. POM-PTFE	13
1.5. Nano Katkıların POM ve/veya Diğer Polimerlerin Sürtünme Katsayısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi	14
1.5.1. Karbon Nanotüpler	14
1.5.2. TiO ₂	15
1.5.3. ZrO ₂	16
1.5.4. MoS ₂	17
1.6. Ön Değerlendirme	17
2. MALZEMELER ve YÖNTEM	19
2.1. Nano ve Mikro Katkıların Seçimi	19
2.2. Seçilen Malzemelerin Özellikleri	21
2.3. Karışımlar ve Numune Hazırlama	21
2.4. Plastik Enjeksiyon ile Numune Üretimi	23
3. BULGULAR ve YORUMLAR	25
3.1. Mekanik Test Sonuçları	25
3.2. Sürtünme Test Sonuçları	27
3.3. Karbon Nanotüpler (CNT)	29
3.4. TiO ₂	30
3.5. ZrO ₂	31
3.6. MoS ₂	31
3.7. Genel Değerlendirme	32

3.8. Mikro Yapılar Üzerine Etkiler	37
3.9. Lineer Aktüatörlerin Son Ürün Testleri ve Uygulama Değerlendirmeleri	43
4. SONUÇLAR	48
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	52
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR	53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

v	: Toplam özgül polimer hacmi
v_c	: Kristalin bölgelerin spesifik hacmi
v_a	: Amorf bölgelerin belirli hacmi
T_g	: Cam geçiş sıcaklığı
T_m	: Erime sıcaklığı
E	: Young modülü
V	: Kayma Hızı
P	: Temas basıncı
V_m	: Anafaz malzemesinin hacmi
MPa	: Mega Paskal
N	: Newton
$^{\circ}\text{C}$	: Celsius
τ	: Kesme gerilimi
p_0	: Maksimum normal gerilim
σ_{yy}	: Normal stres
d	: Deformasyon
F_N	: Normal kuvvet
F_T	: Teğetsel kuvvet
μ	: Sürtünme katsayısı
F_s	: Statik sürtünme kuvveti
F_d	: Dinamik sürtünme kuvveti
wt%	: Ağırlıkça yüzde
R_a	: Aritmetik ortalama
τ_y	: Kayma mukavemeti
F_p	: Sürtünme kuvveti (Dikey)
μm	: Mikrometre
A	: Amper
k	: Aşınma katsayısı
CNT	: Karbon Nanotüp
MoS_2	: Molibden disülfid
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
PA66	: Poliamid 6.6
PEO	: Polietilen oksit
POM	: Polioksimetilen
PTFE	: Politetrafloroetilen
TiO_2	: Titanyum dioksit
ZrO_2	: Zirkonyum dioksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Lineer Aktüatör Motor.	1
Şekil 1.2: Hasta Karyolası.	2
Şekil 1.3: Jinekolojik Muayene Masası.	2
Şekil 1.4: Polioksimetilen Moleküler Yapısı.	4
Şekil 1.5: POM Malzemeden Enjeksiyon Metodu ile Üretilmiş Dişliler.	6
Şekil 1.6: POM Dişlinin Lineer Aktüatör İçerisinde Kullanımı.	6
Şekil 1.7: Yatay ve Dikey Kuvvetler.	7
Şekil 1.8: Pürüzlü Yüzeyler.	8
Şekil 1.9: Yüzeyler Arası Yağlanmış Film Tabakası.	9
Şekil 1.10: Farklı Polimer Malzemeler İçin Sürtünme Katsayısı.	10
Şekil 1.11: Aşınma Öncesi ve Sonrası Yüzeler.	11
Şekil 1.12: Farklı Polimer Malzemeler İçin Aşınma Oranları.	12
Şekil 1.13: Nano-TiO ₂ İçermeyen ve Nano-TiO ₂ İçeren Kompozitlerin Yüksek Kayma Hızında Kayma Süresine Karşı Kıyaslama.	15
Şekil 1.14: Sürtünme Katsayısının Nano ZrO ₂ Miktarına Göre Değişimi	16
Şekil 2.1: Çift Vidalı Ekstrüder.	22
Şekil 2.2: Çift Vidalı Ekstrüder Kesit Diyagramı.	22
Şekil 2.4: Plastik Enjeksiyon Makinesi.	23
Şekil 2.5: Çekme Numuneleri İçin Plastik Enjeksiyon Kalıbı.	23
Şekil 2.6: Çekme Testi ve 3 Nokta Eğme Test Numuneleri.	24
Şekil 2.7: Dişli Numuneleri.	24
Şekil 3.1: Çekme Mukavemeti (MPa)-Çekme Gerinimi % .	26
Şekil 3.2: Eğilme Gerinimi (MPa)-Esneme Oranı %.	26
Şekil 3.3: %Eğilme Gerilimi İyileşme	33
Şekil 3.4: % İyileşme (Sürtünme Kats. (μ))	34
Şekil 3.5: POM %100 SEM 500X	38
Şekil 3.6: POM%90-PTFE%10 SEM 500X	38
Şekil 3.7: POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5 SEM 500X	39
Şekil 3.8: POM%89-PTFE%10-CNT%1 SEM 500X	39
Şekil 3.9: POM %89,5-PTFE%10-TiO ₂ %0,5 SEM 500X	40
Şekil 3.10: POM%89-PTFE%10-TiO ₂ %1 SEM 500X	40
Şekil 3.11: POM %89,5-PTFE%10-ZrO ₂ %0,5 SEM 500X	41
Şekil 3.12: POM%89-PTFE%10-ZrO ₂ %1 SEM 500X	41
Şekil 3.13: POM%89-PTFE%10-MoS ₂ %1 SEM 500X	42
Şekil 3.14: POM%88-PTFE%10-MoS ₂ %2 SEM 500X	42
Şekil 3.15: Muayene Masasının Statik Test Fotoğrafı (450 kg).	43
Şekil 3.16: Lineer Aktüatör Test Cihazı.	44
Şekil 3.17: Lineer Aktüatör İtme Yönünde Çalışırken Çektiği Akım Grafiği	46

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1: Farklı Katkılarla POM’da Sürtünme Katsayısındaki Değişiklikler.(Grafit (C), Polietileneoksit (PEO))	13
Tablo 2.1: Hazırlanan Formülasyonlar	20
Tablo 3.1: Çekme Testi Tablosu	25
Tablo 3.2: Üç Nokta Eğme Testi	27
Tablo 3.3: Sürtünme Katsayısı ve POM%90-PTFE%10'a Göre %İyileşme	28
Tablo 3.4: Sürtünme Katsayısı ve POM%100’e göre %İyileşme.	35
Tablo 3.5: Örnek Lineer Aktüator Test Raporu	45
Tablo 3.6: POM%90-PTFE%10’a Göre %Akım İyileşme	46

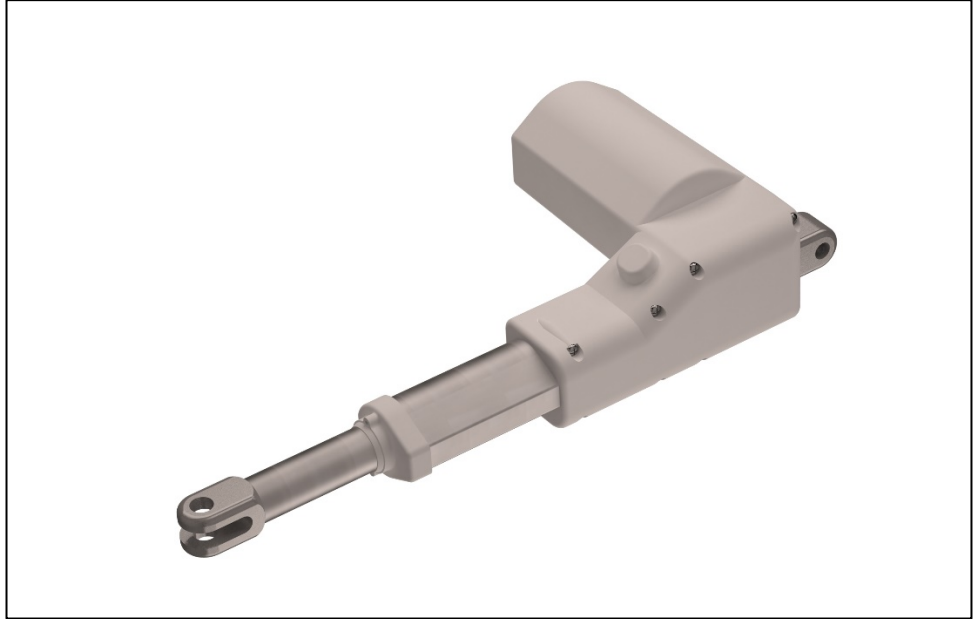
1. GİRİŞ

Lineer aktüatörlerin çalışma prensibini ve aktüatör dişlilerinde gereksinim olan malzeme ihtiyacı için yapacağımız araştırmalar ve çalışmaları ortaya koyacağız. Lineer aktüatör nedir, dişli kısımlarında neden POM kullanılıyor, POM malzemelerin mekanik özellikleri ve POM malzemelere yapılan katkılarla sürtünme/mechanik özellikler arasındaki ilişkiler ve ayrıca mikro ve nano katkıların diğer polimerler üzerindeki sürtünmeye ve mekanik özelliklere olan etkilerini inceleyerek üreteceğimiz malzeme, karışım oranları için nasıl bir yol izleyeceğimizi ortaya koyacağız.

1.1 Lineer Aktüatörler

Lineer aktüatör sistemleri, doğrusal hareket ve kuvvet ihtiyacının olduğu mekanizmalarda doğrusal kuvvet ileticisi olarak kullanılmaktadır.

Ülkemizde ilk defa yerli olarak üretilen, tamamı yurt dışından ithal ürünler yerine ikame edilen ve hastane ekipmanlarında çok yoğun olarak kullanılan Lineer Aktüatör Motor ve Kontrol Sistemlerinin seri olarak üretimidir. Ürün görseli **Şekil 1.1'** de verilmiştir.



Şekil 1.1: Lineer Aktüatör Motor.

Lineer aktüator sistemlerinin kullanım alanlarından bazıları

- * Medikal sektöründe hasta yatakları, hasta koltukları, dişçi koltukları, ameliyat masaları
- * Savunma Sanayi
- * Sanayi sektöründe endüstriyel otomasyon projeleri
- * Mobilya sektöründe ayarlanabilir ev ve ofis sistemlerinde
- * Otomotiv sektöründe elektronik ayarlı koltuklar, otomatik açılabilir tavan sistemleri, otomatik kapı ve bagaj sistemleri
- * Uydu anteni otomatik ayar sistemleri
- * Otomatik garaj kapıları ve daha birçok farklı uygulamalardır.

En yaygın kullanım alanı ise hastaneler ve diğer kliniklerdir. Hasta servis karyoları, diyaliz ve kemoterapi koltukları, KBB ve jinekoloji masaları, ameliyathane masaları, dişçi koltukları vb. gibi ürünlerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Örnek görseller **Şekil 1.2** ve **Şekil 1.3**’ te gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Hasta Servis Karyolası.



Şekil 1.3: Jinekolojik Muayene Masası.

Lineer aktüatörlerin çalışma prensibi bir DC motorun dönme hareketini dişli ve sonsuz vida yardımı ile doğrusal harekete çevirmektir.

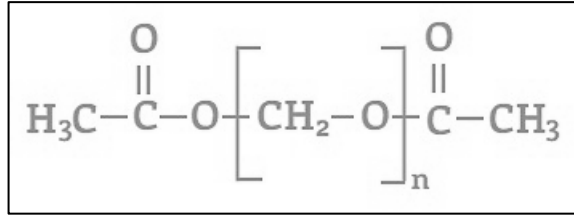
Dişli ve somun parçalarının insan sağlığını ve hasta konforunu direkt ilgilendirdiği ve bakım gerektirmeden yıllarca çalışması istendiği için üretimi genellikle POM malzemeden gerçekleştirilmektedir. Özellikle çok hızlı tıbbi müdahale etmenin gerektirdiği uygulamalarda bu malzemelerden üretilmiş aktüatörlerin kullanımı insan hayatını kurtarmada da etkili olacaktır.

1.2 POM

Polioksimetilen (POM) aynı zamanda poliasetal olarak da bilinen bir mühendislik plastik çeşididir. Alman kimyager Hermann Staudinger, polimer biliminin öncüsü olarak kabul edilir ve polimerlerin moleküler yapısını anlamak için önemli katkılarda bulunmuştur. Staudinger'in çalışmaları, polimerlerin uzun moleküler zincirlerden oluştuğunu ve bu zincirlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirlediğini gösterdi [1].

1930'larda, Alman kimyagerler Arthur Eichengrün ve Rudolf Schöpf, polietilen ve polipropilen gibi polimerlerin sentezini gerçekleştirdiler. Ancak, polimerlerin pratik uygulamaları için daha dayanıklı ve mukavemetli bir malzemeye olan ihtiyaç devam etti. 1952'de Dupont, POM'un sentezini tamamladı ve ticari olarak Delrin markası altında piyasaya sundu. Delrin, yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci gibi özellikleriyle dikkat çekti ve otomotiv, elektronik, tüketici ürünleri ve diğer birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaya başlandı [2]. Delrin'in başarısı, POM'un genel kabul görmesine ve polimer endüstrisinde önemli bir yere sahip olmasına yol açtı. Günümüzde, POM, plastik enjeksiyon kalıplama, makine parçaları, rulmanlar, dişliler ve birçok farklı uygulamada kullanılan çok yönlü bir malzemedir.

Yaygın olarak poliasetal veya polioksimetilen (POM) olarak da bilinen poliasetal, iki -OR grubuna bağlı bir karbonun fonksiyonel grubunu içeren formaldehit bazlı, yarı kristalin bir mühendislik termoplastıdır. %100 geri dönüştürülebilir.



Şekil 1.4: Polioksümetilenin Moleküler Yapısı (Kimyasal formül: $[\text{CH}_2\text{O}]_n$).

POM, formaldehit ve tiroksine gibi monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilen bir polimerdir. Bununla birlikte, POM'un homopolimer ve kopolimer versiyonlarını üretmek için farklı üretim süreçleri kullanılır. Alkali ortamlarda, kopolimerler homopolimerlerden daha karardır. Öte yandan, homopolimerler kopolimerlerden daha iyi mekanik özellikler sağlar. POM yüksek mekanik mukavemeti, sertliği ve kimyasal direnci ile bilinir [2]. Polimer, düşük sürtünme ve aşınma özelliklerinin yanı sıra mekanik ve kimyasal özelliklerin mükemmel dengesi nedeniyle metallere alternatif olarak hizmet eder.

POM reçineler, mekanik-fiziksel ve yanıcılık performansı için iyi dengelenmiş özellikler gösterir. POM reçinelerinin temel faydaları şunlardır:

- o -40 °C'den 140° C'ye kadar sıcaklık aralığında mükemmel mekanik özellikler
- o Yüksek çekme dayanımı, sertlik ve tokluk (kısa süreli)
- o Düşük sürtünme eğilimi (naylon ile karşılaştırıldığında) ve yorulma (uzun süreli).
- o Yüksek derecede kristallik ve mükemmel boyutsal kararlılık
- o Mükemmel aşınma direnci
- o Düşük sürtünme katsayısı
- o Oda sıcaklığında organik çözücülere ve kimyasallara (fenoller hariç) karşı iyi direnç
- o Düşük duman emisyonu
- o Parlaklığı yüksek yüzeyler
- o Düşük nem emilimi

POM'un avantajları arasında yüksek mukavemet, darbe dayanımı ve kimyasal direnç bulunurken, yüksek termal genleşme katsayısı, hidrolik sıvılarla reaksiyona girebilme eğilimi ve düşük oksijen direnci gibi sınırlamaları vardır [3].

1.2.1. POM'un İşlenmesi ve Kullanım Alanları

Poliasetal reçineler granül formda tedarik edilir ve ısı ve basınç uygulanarak istenen şekle kalıplanabilir. Enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, sıkıştırılmalı kalıplama, rotasyonel döküm veya üfleli kalıplama gibi termoplastiklere uygun tüm yöntemlerle işlenebilir. Enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon, POM işleme için en yaygın kullanılan yöntemlerdir. POM reçineleri 190–230°C sıcaklık aralığında işlenmelidir ve higroskopik olduğu için şekillendirmeden önce kurutulması gerekebilir [1]-[4].

Enjeksiyon kalıplama için işleme koşulları

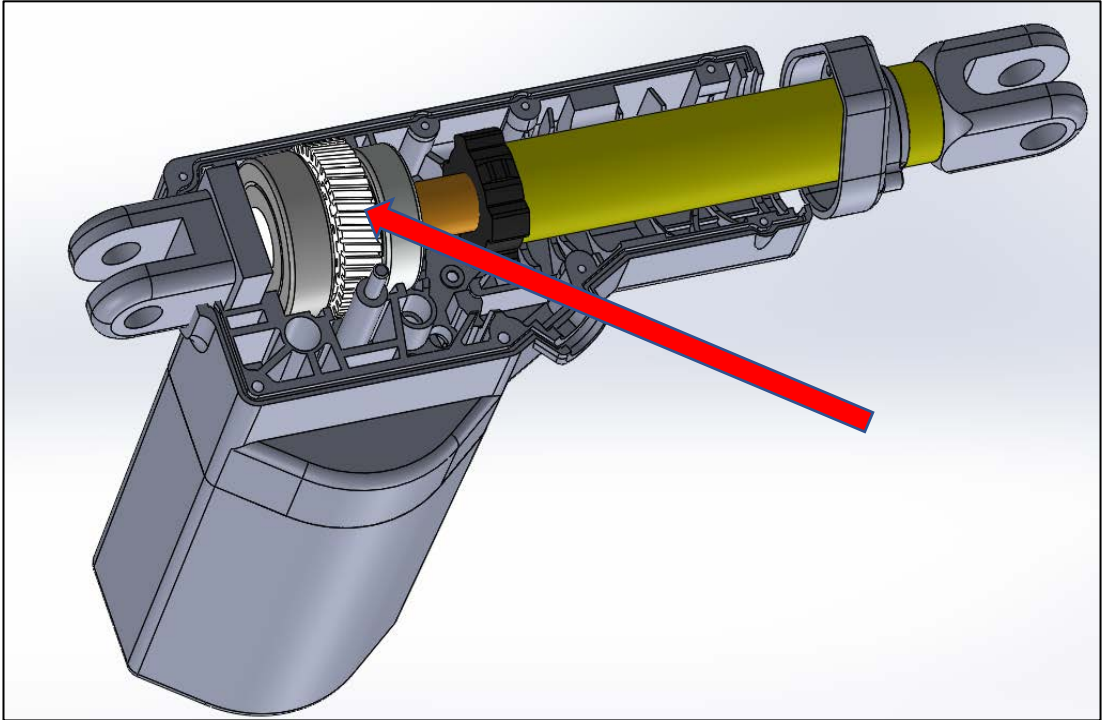
- o Eriyik sıcaklığı
- o Homopolimer reçineler: 180-230 °C
- o Kopolimer reçineler: 190-210 °C
- o Kalıp sıcaklığı: 50-150 °C (Kalıplama sonrası büzülme azaltmak için hassas kalıplama için daha yüksek kalıplama sıcaklıkları kullanılır.)
- o Enjeksiyon basıncı: 70-120 MPa
- o Enjeksiyon hızı: Orta ila yüksek [5].

Hassas parça üretimlerinde (ölçü aletleri, saat, beyaz eşya, telefon parçaları, otomobil göstergeleri vb.), kam, dişli, kalem, anahtar, valf, pencere çerçeveleri ve plastik çakmak gibi parçaların yapımında kullanılır [6]. **Şekil 1.5'** te enjeksiyon metodu ile üretilmiş dişliler ve **Şekil 1.6'** da bu dişlilerin lineer aktüatör içerisinde kullanımı gösterilmektedir.

POM reçineleri, iyi boyutsal stabilite ve kayma özellikleri gerektiren uygulamalar için hassas parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar otomotiv, elektrik ve elektronik, mobilya, endüstriyel uygulamalar, ilaç taşıma, dağıtım ve yönetim sistemleri gibi sektörlerdir.



Şekil 1.5: POM Malzemedan Enjeksiyon Metodu ile Üretilmiş Dişliler.



Şekil 1.6: POM Dişlinin Lineer Aktüatör İçerisinde Kullanımı.

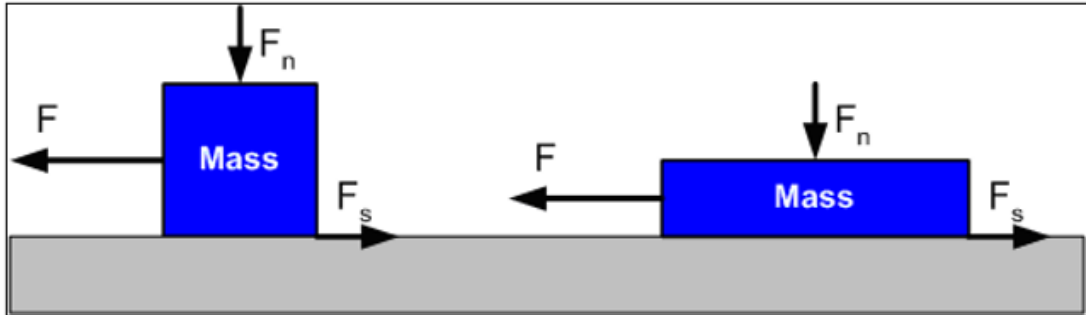
1.3. Polimerlerin Sürtünmesi ve Aşınması

Triboloji, göreceli hareket halindeki yüzeylerin etkileşimini inceleyen bilim dalıdır. Sürtünme, aşınma ve yağlamayı içeren geniş bir konu olup hepimiz için büyük önem taşır.

Sürtünme ve aşınma, mühendisler tarafından genellikle olumsuz olarak değerlendirilir ve genellikle bunlar azaltılmaya çalışılır. Sürtünme, iki yüzeyin birbirine temas ettiği ve birbirine göre hareket ettiği bir olgudur. Polimerlerin sürtünme davranışı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey yağlaması ve temas basıncı gibi faktörlere bağlıdır [7] .

1.3.1. Sürtünme

Bloklar aynı kütle ve yüzey kaplamasına sahip, ancak birinin temas alanı diğerinin iki katıdır. Bloklara dikey bir kuvvet (F_n) uygulanmışsa ve yatay bir kuvvet (F) uygulanarak hareket ettirilmişse, sürtünme kuvveti (F_s) kaymayı engelleyecektir (Şekil 1.7).

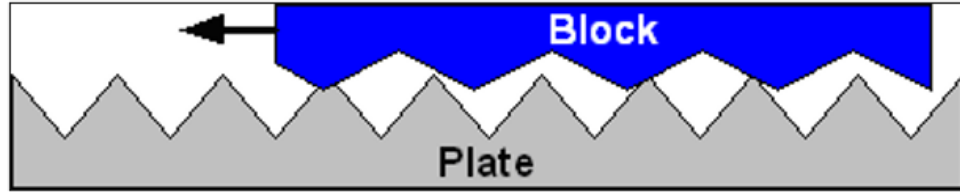


Şekil 1.7: Yatay ve Dikey Kuvvetler.

Şaşırtıcı ve sezgilere aykırı olan şey, yüzey temas alanı farklı olsa bile, sürtünme kuvvetinin (F_s) her iki blok için de aynı olacağıdır. Sürtünme kuvveti (F_s), yalnızca dikey uygulanan kuvvete (F_n) bağlıdır ve ilişki: $F_s = \mu \times F_n$ veya $\mu = F_s / F_n$ olarak ifade edilir. Burada μ (mu olarak telaffuz edilir), blok ve levhanın malzeme kombinasyonu için sürtünme katsayısıdır ve birçok malzeme kombinasyonu için yaklaşık 0,5'tir.

Bu garip görünen sonucun nedeni, yüzeylerin ölçülen temas alanı üzerinde tamamen temas etmemesidir. En düzgün yüzey bile çok mikro ölçekte pürüzlüdür ve iki yüzey arasındaki kavşakta malzemeler sadece 'asperiteler' adı verilen küçük noktalara temas

eder. Asperiteler yükü taşır ve dengeye ulaşmak için deforme olur (hem elastik hem de plastik olarak). Görünür temas alanı olarak ölçtüğümüz şey, tribolojik açıdan gerçek temas alanı ile çok az ilişkilidir ve görünür temas alanı genellikle gerçek temas alanından çok daha büyüktür (Şekil 1.8).



Şekil 1.8: Pürüzlü Yüzeyler.

Bunu görselleştirmek için, blok ve plaka arasındaki temasın mikro düzeyde gerçekleştiğini hayal edebiliriz. Hem blok hem de plaka tribolojik açıdan pürüzlüdür ve yüzeyleri kaplayan bu zirve ve vadiler asperitelerdir. Dikey kuvvet, plakanın yükü düzgün bir şekilde taşıyana kadar hem blok hem de plaka üzerindeki asperiteleri (elastik ve plastik olarak) ezecektir. Görünür temas alanı yük artmadan büyürse, asperiteler kuvvet dengelenmeden önce fazla deforme olmaz.

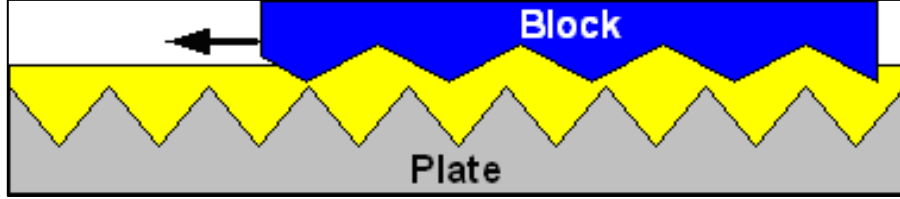
Hareket başladığında, asperiteler birbirine sürtünerek, kayarken ve birbirlerini deforme ederken harekete karşı doğal bir direnç oluşturur. Bu harekete karşı direnç, yukarıdaki denklemlerde tanımlandığı gibi sürtünme kuvvetidir (F_s) [8].

1.3.2. Yağlama

Yağlama, sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı önlemek için kullanılan bir tekniktir. Yağlama yağları, yüzeyler arasında bir film oluşturarak sürtünmeyi düşürür [7].

İki kuru yüzeyde, asperitelerin deformasyonu sürtünme kuvvetini belirler, ancak iki temas yüzeyi arasına üçüncü bir madde (bir yağlayıcı) koyduğumuzda ne olur? Sıkıştırılamaz katı veya sıvı yağlayıcı, asperiteler arasındaki boşlukları doldurarak (Şekil 1.9’da gösterildiği gibi) iki yüzeyin daha pürüzsüz hareket etmesini sağlamak için akışkan bir yatak işlevi görür. Bu, yağlanmamış harekete kıyasla çok daha az sürtünme kuvveti (ve dolayısıyla çok daha düşük μ) sağlar. Geleneksel sıvı yağlayıcılar çeşitli kaynaklardan elde edilen yağlardır, ancak yağ veya suda kararlı bir dağılım olarak grafit, molibden disülfid (MoS_2) veya PTFE gibi katı yağlayıcılar da

kullanılabilir. Sıvı yağlayıcılarla yapılan yağlama, blok ile plaka arasında kısmi temas olduğunda yarı hidrodinamik olarak veya blok ve plakanın tamamen yağlayıcı bir tabaka ile ayrıldığı durumda tam hidrodinamik olarak sınıflandırılır.



Şekil 1.9: Yüzeyler Arası Yağlanmış Film Tabakası

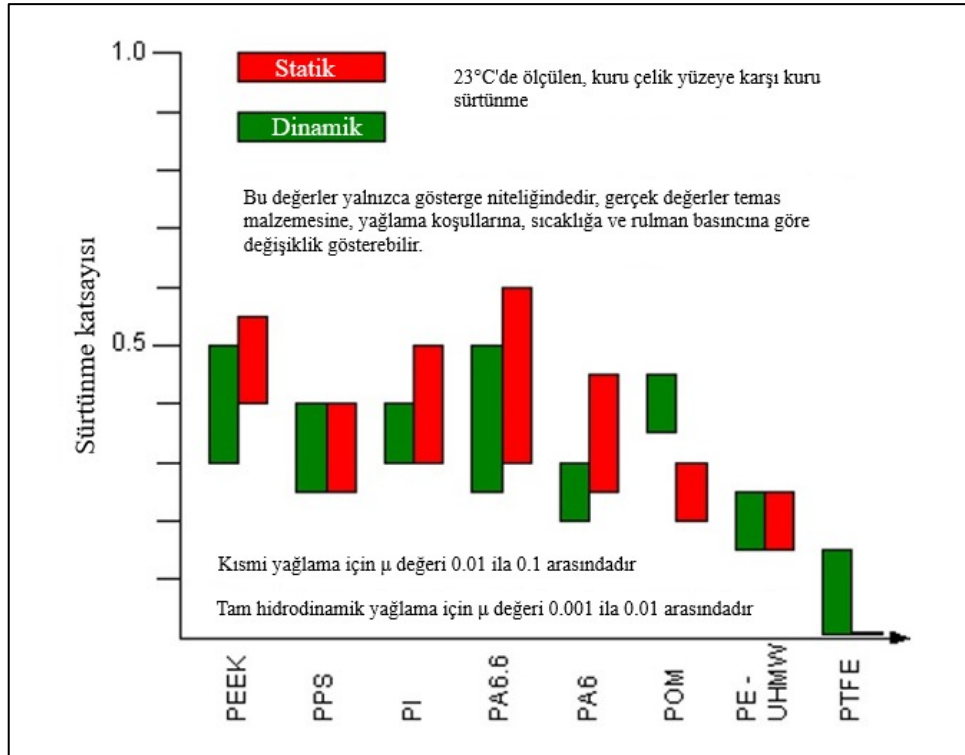
Yağlama, çok düşük sürtünme katsayısına sahip malzemeler için bile faydalıdır, çünkü yağlayıcı tabaka sadece sürtünme katsayısını büyük ölçüde azaltmakla kalmaz, aynı zamanda asperitelerin neden olduğu yüzey hasarını da önler. Kısmi yağlama durumunda sürtünme katsayısı genellikle 0,01 ile 0,1 arasında değişir ve tam hidrodinamik yağlama ile bu değer 0,001 ila 0,01 arasına düşer. PTFE gibi bazı malzemeler, kuru çeliğe karşı yaklaşık 0,05 gibi son derece düşük sürtünme katsayılarına sahip olmasına rağmen, etkili yağlama uygulamasıyla bu özellikler daha da iyileştirilebilir [8].

1.3.3. Plastiklerde Sürtünme

Gerçek uygulamalardaki sürtünmeyi tahmin etmek aşağıda verilen nedenlerden dolayı çok zordur:

- o Geniş yüzey kombinasyonları yelpazesi; Çok çeşitli yağlama olanakları,
- o Temas basıncı(P), kayma hızı (V) ve sürtünme katsayısı (μ) arasındaki doğrusal olmayan ilişki;
- o Sürtünmeli ısınma nedeniyle herhangi bir sıcaklık artışının sürtünme katsayısı (μ) üzerindeki etkisi.

Plastikler için bu daha da karmaşık olabilir, çünkü plastikler her zaman asperitelerin uçlarında meydana gelen büyük plastik deformasyonları nedeniyle geçerli olan klasik sürtünme yasalarını takip etmezler. Plastikler bu şekilde reaksiyona girmezler ve daha geniş elastik deformasyon aralığı, sürtünme katsayısının genellikle aynı koşullar altında diğer malzemelerden daha düşük olduğu anlamına gelir. Bu nedenle, plastikler için sürtünme katsayısı için gösterge değerleri vermek ancak özel uygulama koşulları test edilmedikçe mümkündür. **Şekil 1.10'** da kuru çeliğe karşı çeşitli plastikler için bazı tipik değerleri gösterilmektedir[8].

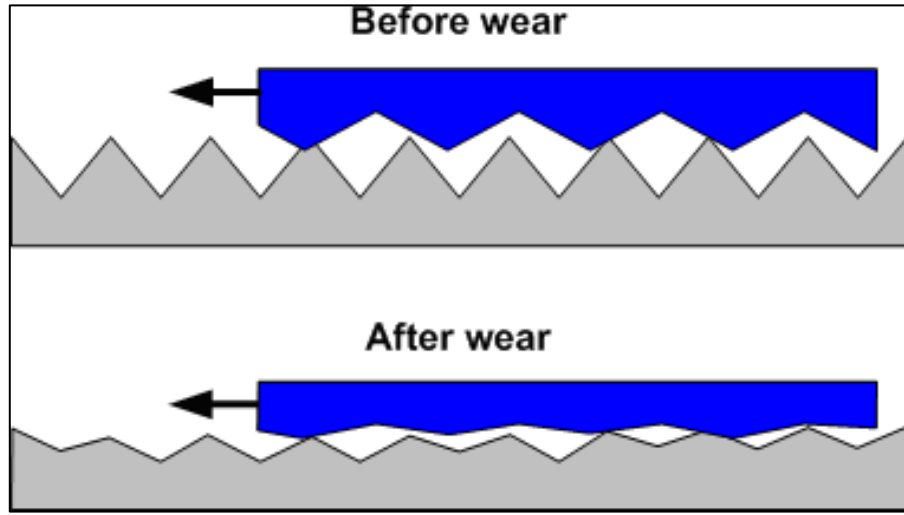


Şekil 1.10: Farklı Polimer Malzemeler İçin Sürtünme Katsayısı [8].

Çoğu polimer 0,2 ila 0,6 aralığında sürtünme katsayılarına sahiptir, ancak florokarbonlar genellikle bu aralıktan daha düşük sürtünme katsayılarına sahiptir. PTFE, 0,05 ila 0,15 arasında dinamik sürtünme katsayısına ve yaklaşık 0,05 statik sürtünme katsayısına sahip herhangi bir malzeme için kaydedilen en düşük μ değerine sahiptir.

1.3.4. Aşınma

Aşınma; sürtünme veya darbeden kaynaklanan katı bir yüzeyden malzemenin çıkarılması veya bozulmasıdır. Yüzeyler birbirlerinin üzerine kaydığında, sadece sürtünme yaşamakla kalmaz, aynı zamanda biri diğerinden çok daha sert olsa bile, her iki yüzeyden de aşınır ve malzeme kaybolur (**Şekil 1.11**). Bu elmas gibi çok sert malzemeler için bile geçerlidir; elmas diğer tüm malzemeleri çizer, ancak diğer malzemeyi aşındırdığı için hala bazı malzemeleri kaybeder. Aşınma, sürtünmeye neden olan aynı işlemlerin yüzeylerdeki asperitelerin birbirleri üzerindeki hareketinin doğrudan sonucudur.



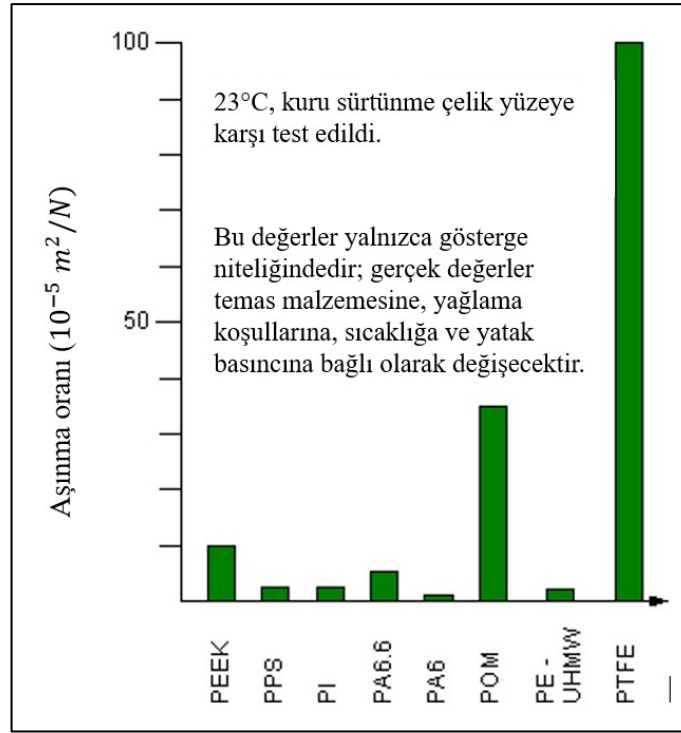
Şekil 1.11: Aşınma Öncesi ve Sonrası Yüzeler.

Sürtünme bloğu ve plaka modeli göz önüne alındığında, tekrarlanan elastik ve plastik deformasyon ile asperitelerin birbirleri üzerindeki sürekli hareketinin, malzemenin çıkarılmasına ve asperitelerin öğütülmesine yol açacağını görmek kolaydır. Gösterilen model kasıtlı olarak basittir ve sonunda iki pürüzsüz yüzeye yol açacaktır, gerçekte çıkarılan malzeme blok ve plaka arasında sıkışır ve yüzeyler birbirine sürtündükçe yeni oluklar (ve dolayısıyla yeni asperiteler) oluşturur. Yağlama, sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı önlemek için kullanılan bir yöntemdir. Yağlama yağları, yüzeyler arasında bir film oluşturarak sürtünmeyi azaltır [8].

1.3.5. Plastiklerde Aşınma

Sürtünmede olduğu gibi, malzemelerdeki aşınmayı çok çeşitli değişkenler nedeniyle tahmin etmek çok zordur ve bu nedenle, belirli uygulama koşulları test edilmedikçe, belirli bir plastiğin aşınması için gösterge değerleri vermek mümkündür değildir.

Şekil 1.12' de verilen grafik, kuru çeliğe karşı çeşitli plastikler için bazı tipik değerleri göstermektedir [8] .



Şekil 1.12: Farklı Polimer Malzemeler İçin Aşınma Oranları [8].

Çoğu polimer 2 ila $10 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{N}$ aralığında aşınma oranlarına sahiptir, ancak florokarbonlar genellikle daha yüksek aşınma oranlarına sahiptir. Buna rağmen, florokarbonlar, son derece düşük sürtünme katsayıları gibi, onları diğer plastikler için katkı maddesi olarak ve agresif ortamlarda çok çeşitli sıcaklıklarda yüksüz uygulamalarda conta ve bağlantı parçası olarak kullanılmak üzere gerekli kılan benzersiz bir özellik yelpazesine sahiptir.

1.4. POM – PTFE

POM ve PTFE karışımlarından üretilen dişliler, çeşitli uygulamalarda geleneksel metal dişlilere ciddi alternatifler olarak kendilerini göstermektedir. POM, yüksek sertlik, düşük sürtünme ve mükemmel boyutsal stabilite gerektiren hassas parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, düşük aşınma direnci, hareket ve düşük güç aktarımı uygulamalarında kullanımını sınırlamaktadır. Aşınma direncini artırmak için POM, politetrafloroetilen (PTFE) ile karıştırılması ile sonucu aşınma özellikleri iyileştirilmiştir [9] .

A.K.Matta ve ekibinin bir çalışmasında, POM ve PTFE karışımlarını üretmeyi ve bu karışımların mekanik ve aşınma özelliklerini araştırmayı amaçlamaktadır. Farklı POM ve PTFE karışım kompozisyonlarını hazırlamak için çift vidalı ekstrüder kullanılmış ve elde edilen malzeme enjeksiyon kalıplama ile test numune haline getirilip numunelerin mekanik özellikleri ve aşınma özelliklerini değerlendirilmiştir. %10'a kadar PTFE eklenmesi ile mekanik özelliklerde önemli bir değişiklik gözlenmesine rağmen aşınma özellikleri PTFE eklenmesi ile sürekli olarak iyileşmiştir. % 15 PTFE ilavesi için mekanik özelliklerde ise azalma görülmüştür [10].

Farklı katkı maddelerinin POM'un sürtünme ve aşınma katsayısındaki değişiklikleri **Tablo 1.1'**de verilmektedir.

Tablo 1.1: Farklı Katkılarla POM'da Sürtünme Katsayısındaki Değişiklikler. (Grafite (C), Polietilen oksit (PEO)) [11].

Malzeme	μ	$(10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1})$	Koşullar
POM	0.69	1.3	62.5 N - 0.3 m s ⁻¹
POM+ 15% PTFE	0.24	0.6	
POM+ 15%PTFE + 20%C	0.36	2.3	
POM+ 15% PTFE + 20% Cam	0.33	6.7	
POM	0.36	50	10 N - 0.1 m s ⁻¹ AISI-52100 Sertleştirilmiş çelik
POM+ 20% Cam Elyaf	0.35	40	
POM+ 20% PTFE Elyaf	0.2	10	
POM+ 20% PTFE Mikro toz	0.29	15	
POM	0.17	1.8	196 N - 0.4 m s ⁻¹
POM+ 5% PTFE	0.165	1.5	
POM+ 10% PTFE	0.14	1.3	
POM+ 15% PTFE	0.13	1.25	
POM+ 20% PTFE	0.12	1.2	
POM+ 10% PEO	0.14	2.1	
POM+ 15% PEO	0.145	2.25	

1.5. Nano Katkıların POM ve/veya Diğer Polimerlerin Sürtünme Katsayısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Aşağıda nanomalzemelere genel bir giriş yapıp, nanomalzemelerin POM ve diğer polimerlerdeki mekanik özelliklere ve sürtünmeye etkilerini inceleyeceğiz. Son olarak ta kendi üreteceğimiz malzemede karışım oranlarını seçebilmemiz için malzemeleri değerlendireceğiz.

Nano katkıları, geleneksel olarak mikro boyutta kullanılan katkılara kıyasla üstün özelliklere sahiptir. Birincisi, daha geniş yüzey alanlarıyla ana faz ile etkileşimi artırmalarıdır. İkincisi, mikro boyutlu katkılara göre daha az miktarda kullanılmalarıdır. Bu sayede anafaz malzemesi; hafiflik, esneklik ve iyi işlenebilirlik gibi özelliklerini korur. Üçüncü olarak, nano katkıları, mikro katkılara kıyasla daha az olumsuz etkiye sahiptir. Nano taneciklerin malzeme içerisindeki dağılımı, üretilen malzemenin özelliklerini doğrudan etkiler. Ancak nano tanecikler üretim sürecinde toplanma eğilimindedir, bu nedenle bu taneciklerin polimer içerisinde mümkün olduğunca homojen bir şekilde dağılması önemlidir [12].

1.5.1. Karbon Nanotüpler

Bhanu K. Goriparthi ve ekibinin bir çalışmasında POM malzemesinin mekanik, aşınma ve yorulma davranışları karbon nanotüpler (CNT'ler) ile takviye ederek iyileştirmiştir. CNT'ler ve POM arasındaki uyumu artırmak için CNT yüzeyi çeşitli fonksiyonlandırma yöntemleri (karboksilasyon, silanasyon, karbonilasyon ve aminasyon) ile değiştirilmiştir. Fonksiyonel grupların CNT yüzeyine bağlandığını doğrulamak için Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi kullanılmıştır. Farklı derişimlerde fonksiyonlandırılmış CNT'ler (MWCNT) içeren POM/CNT nanokompozitleri geliştirilmiştir (ağırlıkça %0,25 ile 2 arasında değişen). Silanize edilmiş CNT'lerin %1 oranında kullanılması, sürtünme katsayısını 0,47 seviyelerinden 0,32 seviyelerine düşürmüştür [13].

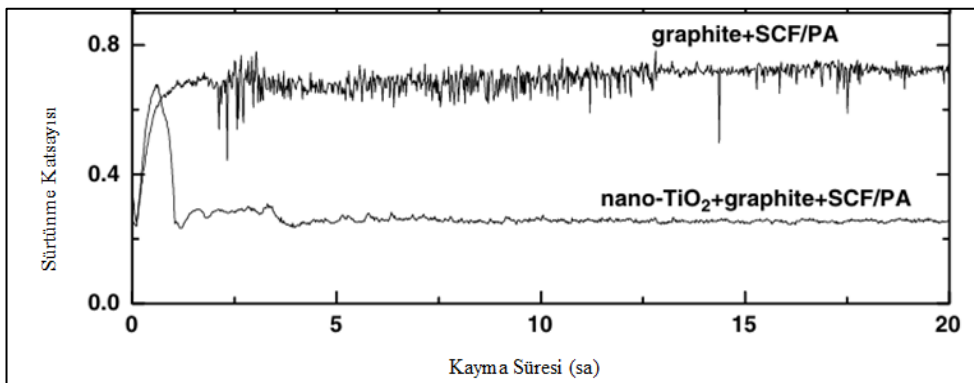
Bhanu K. Goriparthi ve ekibinin yaptığı başka bir çalışmada, PTFE eklenmesi, çekme özelliklerinde, eğilme özelliklerinde ve yorulma dayanımında önemli bir düşüşe yol açmıştır. Ancak, spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı önemli ölçüde artmıştır. PTFE-POM kompozitlerinin %1 oranında fonksiyonel CNT'ler ile takviye edilmesi, mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve yorulma dayanımında iyileşme sağlamıştır. %10 PTFE ve %1 fonksiyonel CNT içeren hibrit kompozitler, mukavemet ve sertlikte

sırasıyla %31 ve %50 oranında iyileşme, aşınma oranında ve sürtünme katsayısında ise sırasıyla %67 ve %44 oranında azalma göstermiştir. Daha yüksek PTFE oranlarında (örneğin %15 ve %20) aşınma oranı ve sürtünme katsayısı artmıştır. Bu durum, PTFE parçacıklarının kümelenmesinden kaynaklanabilir [9]. Bu çalışma, PTFE ve fonksiyonel CNT'ler ile takviye edilmiş POM kompozitlerinin mekanik, aşınma ve yorulma davranışlarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. PTFE'nin eklenmesi mekanik özelliklerde düşüşe yol açarken, CNT'ler ile yapılan takviye, mekanik ve aşınma özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. Geliştirilen hibrit kompozitler, POM dişlilerinin yük taşıma kapasitesini ve ömrünü artırma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür [9].

CNT'ler ayrıca atık plastiklerden elde edilebilmektedir. Polietilen ve polipropilen gibi yüksek karbon içeriğine sahip plastik atıklardan başarılı bir şekilde CNT üretimi gerçekleştirilebileceği ve bunun ekonomik ve çevresel kazançlar sağlayacağı da görülmüştür [14].

1.5.2. TiO₂

Bir araştırmada Chang L.ve ekibi tarafından, PA66'ya nano-TiO₂, grafit ve kısa cam fiber eklenerek oluşturulan malzemenin aşınma davranışları incelenmiştir. **Şekil 1.13'** te görüldüğü üzere, grafit ve kısa cam fiber ilavesi sürtünme katsayısını önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, nano-TiO₂ eklenmesi sürtünme katsayısını daha da düşürmekle kalmayıp daha kararlı hale getirmiştir. Nano-TiO₂ içermeyen malzemelerde ise zamanla sürtünme katsayısının artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir [15].

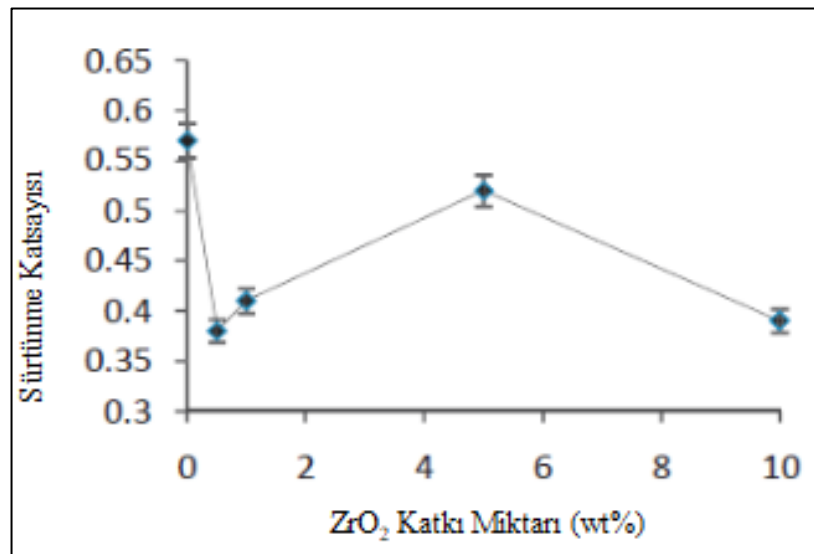


Şekil 1.13: Nano-TiO₂ İçermeyen ve Nano-TiO₂ İçeren Kompozitlerin Yüksek Kayma Hızında Kayma Süresine Karşı Kıyaslama (3 m/s ve 2 MPa temas basıncı) [15].

TiO₂ nano partiküllerinin sürtünme sırasında malzeme çiftleri arasında yuvarlanarak kayma direncini azalttığını ortaya koyulmuştur. Bu yuvarlanma etkisi, liflerin aşınmasını ve kopmasını azaltarak, sürtünme katsayısını ve aşınma oranını düşürmüştür. Sonuç olarak, TiO₂ nanopartiküllerinin eklenmesi, PA66 kompozitlerinin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını önemli ölçüde azaltmış, bu nanopartiküller yüksek P / V koşullarında bile sürtünme katsayısını düşük tutarak, malzemenin yük taşıma kapasitesini artırmıştır. TiO₂ nanopartiküllerinin yuvarlanma etkisi, polimer nanokompozitlerin tribolojik performansını iyileştirmede kritik bir rol oynamaktadır [15].

1.5.3. ZrO₂

Kurahatti ve ekibi, çalışmalarında epoksi içerisine 60-100 nm boyutlarında ve %0,5-10 oranında ZrO₂ ekleyerek malzemenin kuru ortamdaki aşınma davranışlarını incelemiştir. Şekil 1.14' te nano-ZrO₂ miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim gösterilmektedir. En düşük sürtünme katsayısı, %0,5 nano-ZrO₂ içeren malzemede elde edilmiştir. Katkısız epoksinin sürtünme katsayısı 0,57 iken, %0,5 nano-ZrO₂ eklenmesiyle bu değer 0,38'e düşmüştür. Bu düşüş oldukça büyük ve önemlidir. Araştırmacılar, bu azalmanın nedenini, nanopartiküllerin katı yağlayıcı etkisi göstermesi, ZrO₂'nin kesme (kırılma, kopma) etkisini azaltması ve sürtünme sırasında temas bölgesinde anafaz malzemenin sarılarak sürtünmeyi azaltmasına bağlamışlardır [16].



Şekil 1.14: Sürtünme katsayısının nanoZrO₂ miktarına göre değişimi [16].

1.5.4. MoS₂

Hu K. ve ekibinin çalışmasında, MoS₂ nano-toplarının POM bazlı kompozit katmanda dolgu maddesi olarak kullanıldığında tribolojik (sürtünme ve aşınma) özelliklerini incelemektedir. MoS₂ nano-topları, Na₂MoO₄ ve CH₃CSNH₂ kullanılarak sentezlenmiş ve POM içerisine eklenmiştir. Karşılaştırma için mikro boyutlu MoS₂ parçacıkları içeren POM bazlı kompozit de hazırlanmıştır. Elde edilen POM/MoS₂ kompozitleri, üç katmanlı kendi kendine yağlama malzemelerinde polimerik katman olarak kullanılmıştır.

Tribolojik testler sonucunda MoS₂ nano-topları içeren POM, mikro MoS₂ içeren POM'a göre daha iyi tribolojik özellikler göstermiştir. MoS₂ nano-toplarının içeriği %1 ağırlık oranını aştığında, daha düşük sürtünme katsayısı ve daha küçük aşınma hacmi gözlemlenmiştir. %1 MoS₂ katkılı POM içeren malzemenin sürtünme katsayısı saf POM a göre göre 0,17'den 0,15'e düşmüştür ve %11.77 iyileşme olmuştur. Testler 480N yükte, 0,8 m/s hızda ve 30dk süre ile yapılmıştır.

SEM görüntülerindeki aşınma izleri, MoS₂ nano-toplarının içeriğinin arttıkça POM'un aşınma şeklini değiştirdiğini göstermiştir.

MoS₂ nano-toplarının POM içerisine eklenmesi, üç katmanlı kendi kendine yağlama malzemelerinin tribolojik özelliklerini belirli bir oranda iyileştirmiştir. Ancak, aşırı miktarda MoS₂ nano-topları kristallenme derecesini olumsuz etkileyerek kendi kendine yağlama özelliklerini bozmuştur [17] .

1.6. Ön Değerlendirme

PTFE miktarındaki artışla birlikte, literatürdeki çalışmalardan mekanik özelliklerde (çekme mukavemeti, yüzde uzama, elastik modül, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü) ve aşınma kaybı miktarında (aşınma direnci) kademeli bir düşüş gözlemliyoruz. Başka bir deyişle aşınma özelliklerinde bir iyileşme elde edildiği anlaşılmaktadır. Ancak, en iyi dişli malzemesini elde etmek için hem aşınma özelliklerini hem de mekanik özellikleri birlikte değerlendirmemiz gerekmektedir. Bu nedenle, PTFE ve POM'un bu oranları için geliştirilmiş aşınma özellikleri ve mekanik özelliklerde ciddi bir azalma olmadığı için, dişli malzemeleri için %10 PTFE + %90 POM'un en uygun kombinasyon olduğu görülmektedir.

Ancak, daha yüksek mekanik özellikler, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme gereksinimi için PTFE katkısının yanında CNT, MoS₂ ve TiO₂ katkılarını da birlikte ve farklı miktarlarda kullanarak bir malzeme elde etmek mümkündür. Diğer CNT çalışmalarında da mekanik özellikler üzerindeki etkilerin, aşınma direncinin artması ve sürtünme katsayısının azalmasıyla birlikte gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu çalışmalardan yola çıkarak, bu yüksek lisans tez çalışmasında POM%90-PTFE%10 malzemesinde PTFE oranını sabit tutarak ve CNT, MoS₂, TiO₂ ve ZrO₂ katkılarının eklendiği özgün bir çalışma ortaya konmaktadır.

2. MALZEMELER VE YÖNTEM

2.1. Nano ve Mikro Katkıların Seçimi

Lineer aktüatörlerin çalışma prensibini ve aktüatör dişlilerinde gereksinim olan malzeme ihtiyacını Bölüm 1’de ortaya koymuştuk. Lineer aktüatör nedir, dişli kısımlarında neden POM kullanılıyor, POM malzemelerin mekanik özellikleri ve POM malzemelere yapılan katkılarla sürtünme/mechanik özellikler arasındaki ilişkilerden bahsettik. Burada ise nano ve mikro katkıların polimerler üzerindeki sürtünmeye olan etkilerini inceleyerek üreteceğimiz malzeme, karışım oranları için nasıl bir yol izleyeceğimizi ortaya koyacağız.

Lineer aktüatör dişlilerinde düşük sürtünme, yüksek aşınma direnci ve yüksek mekanik özellikler gerekmektedir. Hatta sürtünme katsayısının yetersizliğinden dolayı ilave yağlayıcılar kullanılmakta ve bu da maliyetleri çok fazla artırmaktadır. İlave yağlayıcılar sürtünmeyi düşürmesine rağmen mekanik özelliklerde ise iyileştirme sağlamamaktadır.

Sürtünme katsayısının düşürülmesi için üretici firmalar tarafından kendinden yağlayıcı malzeme olarak en yaygın PTFE katkıları kullanılmıştır. POM malzemelerde PTFE katkıları ile ilgili akademik çalışmalar da PTFE’deki artışla birlikte mekanik özelliklerde (çekme mukavemeti, yüzde uzama, elastisite modülü, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü) ve sürtünme katsayısında azalma ve aşınma mukavemetinde artma gözlenmektedir. Bu çalışmalarda farklı miktarlarda PTFE katkısının yapıldığı fakat en iyi mekanik özelliklerin ve düşük sürtünmenin %10 katkı yapılan malzemelerde optimize olduğu görülmektedir. %10 dan fazla PTFE katkısı kullanılması durumunda ise mekanik özellikler istenmeyen seviyelere düşmektedir [11].

En iyi dişli malzemesinin tasarımı için hem aşınma özelliklerini hem de mekanik özellikleri birlikte düşünülmesi gereklidir. Bu nedenle, PTFE ve POM’ un bu oranları için geliştirilmiş aşınma özellikleri ve mekanik özelliklerde çok ciddi bir azalma olmadığı için dişli malzemeleri için %10 PTFE + %90 POM’ un en uygun olduğu görülmektedir. Fakat daha yüksek mekanik özellikler, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı şartlarını sağlamak için PTFE katkısı yanında CNT, molibden MoS₂ ve silikon gibi katkıları da fayda sağlamaktadır [2].

CNT ile POM nanomalzemeleri hazırlanmasının da tribolojik özellikleri olumlu yönde etkilediğini gösteren çalışmalar mevcuttur [3].

Literatürdeki bu çalışmalardan nano katkıların etkilerini değerlendirmiş olup, aşağıdaki tabloda verilen formülasyonlar ile POM/PTFE içerisine sürtünmeyi düşürecek nano ve mikro katkıları yaparak sürtünme ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. %10 PTFE + %90 POM'a ideal bir karışım olmasına rağmen CNT haricinde diğer nano katkıların etkilerini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada %10 PTFE katkılı POM içerisinde PTFE'yi sabit tutarak farklı oranlarda diğer katkıların mekanik özelliklere ve sürtünmeye ne şekilde etki ettiğini araştırılmış, **Tablo 2.1'** de verilen karışım oranlarıyla oluşturulmuş formülasyonlardan elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Tablo 2.1: Hazırlanan formülasyonlar.

NUMUNE İSMİ	POM (%)	PTFE (%)	
POM %100	100	-	-
POM%90-PTFE%10	90	10	-
NUMUNE İSMİ	POM (%)	PTFE (%)	CNT (%)
POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5	89,5	10	0,5
POM%89-PTFE%10-CNT%1	89	10	1
NUMUNE İSMİ	POM (%)	PTFE (%)	TiO ₂ (%)
POM %89,5-PTFE%10-TiO ₂ %0,5	89,5	10	0,5
POM%89-PTFE%10-TiO ₂ %1	89	10	1
NUMUNE İSMİ	POM (%)	PTFE (%)	ZrO ₂ (%)
POM %89,5-PTFE%10-ZrO ₂ %0,5	89,5	10	0,5
POM%89-PTFE%10-ZrO ₂ %1	89	10	1
NUMUNE İSMİ	POM (%)	PTFE (%)	MoS ₂ (%)
POM%89-PTFE%10-MoS ₂ %1	89	10	1
POM%88-PTFE%10-MoS ₂ %2	88	10	2

2.2. Seçilen Malzemelerin Özellikleri

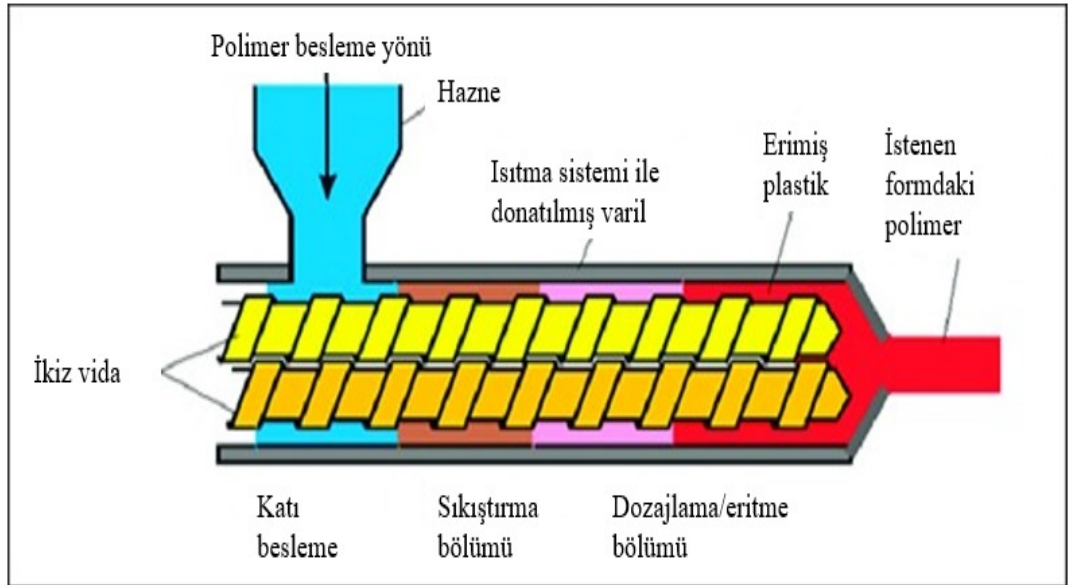
- CNT'ler çok duvarlı (multi-walled) CNT olup Nanokar firmasından temin edilmiştir, ince boş silindir şeklindedirler ve elastik modülü yaklaşık 1 TPa'dır. Saflığı > 96 %, (-COOH), içeriği 0,70 ağırlık%, dış çapı (nm) 28-48, iç çapı (nm) 5-15 ve uzunluğu (µm) 10-25 dir.
- TiO₂ Labor Teknik A.Ş firmasından temin edilmiştir. Saflığı >=99,2 %, Hegman inceliği >=7 ,Hegman bitişi >=4 ve molar kütlesi 79,09 g/mol dür.
- ZrO₂ Malzeme Hane firmasından temin edilmiştir. Saflığı >=99,8%, beyaz renkli, küresel ve molar kütlesi 123,218 g/mol dür. Ortalama parçacık boyutu 30-50 µm dur.
- MoS₂ Sizen firmasından tedarik edilmiştir. Küresel MoS₂ tozu %99,95'e kadar yüksek bir saflık seviyesine sahiptir. Parçacıkların %98'inden fazlasının bu forma ulaşmasıyla neredeyse mükemmel bir küresel şekle sahiptir. Ek olarak, parçacık boyutunu ortalama 34 µm civarındadır.
- POM ve POM-PTFE malzemelerini Jurapom tescilli markası ile Politem firması tarafından üretilmiş ve tüm karışımlar yine Politem firmasında bu çalışmaya özel olarak üretilerek tarafımıza tedarik edilmiştir.

2.3. Karışımlar ve Numune Hazırlama

Hazırlık için çift vidalı ekstrüder kullanılmıştır. Çift vidalı ekstrüderler termoplastik malzemelerin diğer polimerler, katkılar, boya ve stabilizanlar ile homojen bir şekilde karıştırarak yeni bir ürün elde ederek Ar-Ge çalışmalarında kullanılan makinelerdir. Ekstrüderleri oluşturan ana birimler; motor, redüktör, kovan grubu ve taşıyıcı gövdedir. Gerekli karışımın bileşimleri hem POM hem de PTFE ve diğer katkıları eklenmiştir ve çift vidadan gelen malzemeler ekstrüder çıkışı su banyosundan geçerek soğutularak kırıcıya ulaşarak küçük peletler (granüller) halinde elde edilmiştir. POM ve PTFE'nin ağırlıkça %90:10 oranındaki baz karışıma, farklı oranlarda **Tablo 2.1'** de gösterildiği gibi CNT, MoS₂, ZrO₂ ve TiO₂ gibi nano ve mikro katkı maddeleri eklenmiştir ve ekstrüzyon işlemi, 175°C eriyik sıcaklığında, 700 rpm devir ve %55 tork ile gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon ısıtıcılarının sıcaklıkları ise 170 °C ile 230 °C arasında kademeli olarak ayarlanmıştır.



Şekil 2.1: Çift Vidalı Ekstrüder.



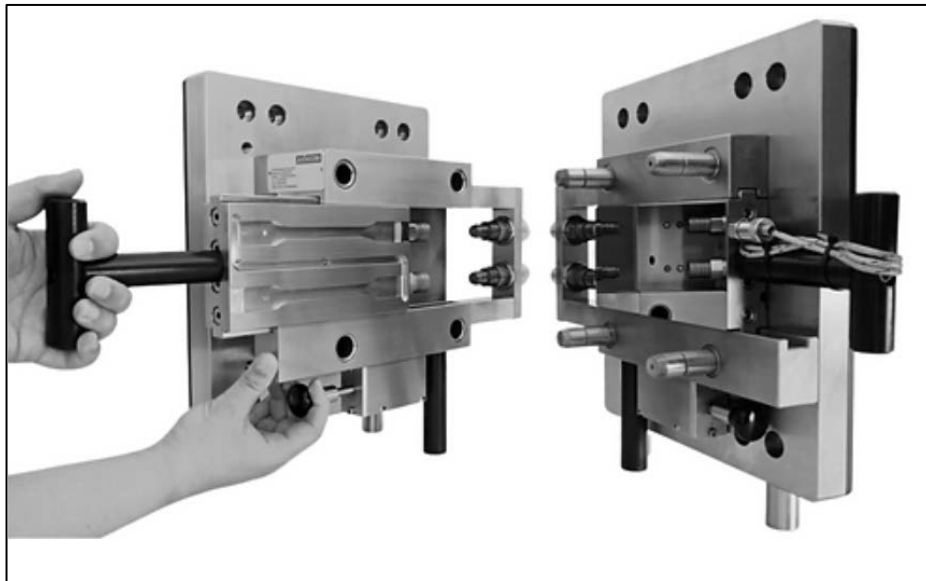
Şekil 2.2: Çift Vidalı Ekstrüder Kesit Diyagramı [18].

2.4. Plastik Enjeksiyon ile Numune Üretimi

Elde edilen granül hammaddeler, plastik enjeksiyon makinesinde baskı yapılarak istenen boyutlarda ürünler elde edilir. Enjeksiyon kalıplama işlemi eriyik polimerin basınç altında kalıpta şekil verme işlemidir. Deney numuneleri Arburg Allrounder 470 Model plastik enjeksiyon makinasında (**Şekil 2.4**) 210 °C sıcaklıkta ve 750 bar basınçta 55°C kalıp sıcaklığında şartlandırılarak basılmıştır. **Şekil 2.5'** te gösterilen çekme numuneleri enjeksiyon kalıbında **Şekil 2.6'** da gösterilen test numuneleri üretilmiştir. **Şekil 2.7'** de dişli numuneleri gösterilmiştir.



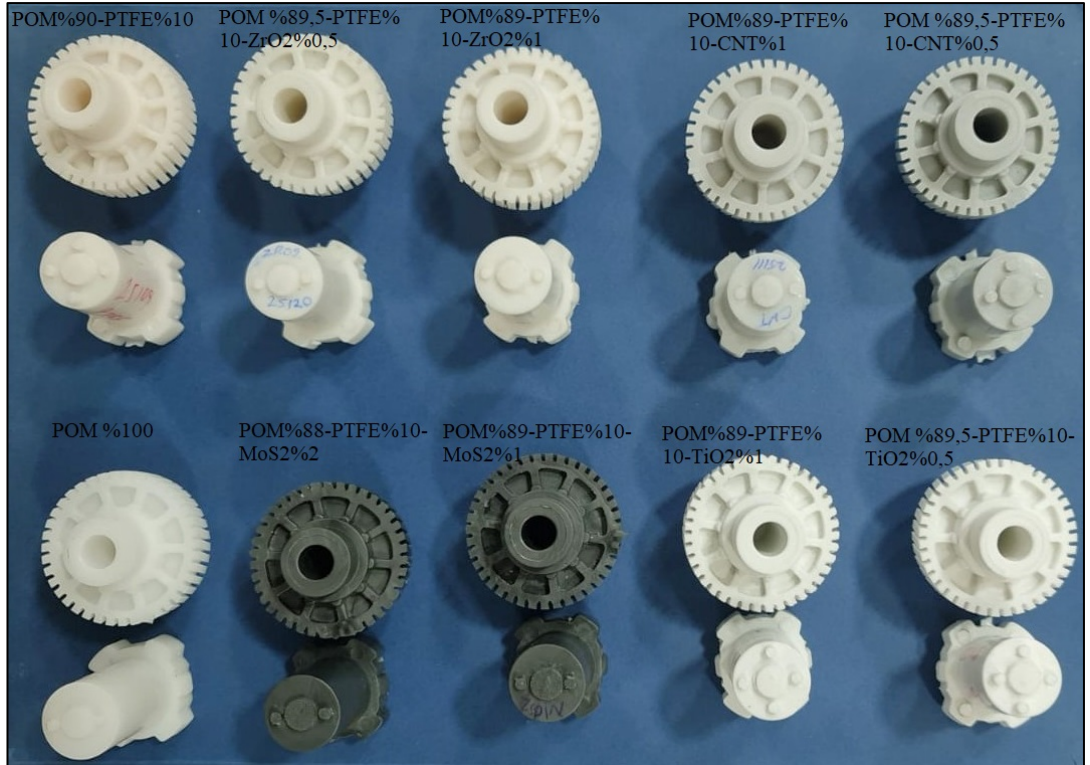
Şekil 2.4: Plastik Enjeksiyon Makinesi.



Şekil 2.5: Çekme Numuneleri İçin Plastik Enjeksiyon Kalıbı.



Şekil 2.6: Çekme Testi ve 3 Nokta Eğme Test Numuneleri.



Şekil 2.7: Dişli Numuneleri.

3. BULGULAR VE YORUMLAR

3.1. Mekanik Test Sonuçları

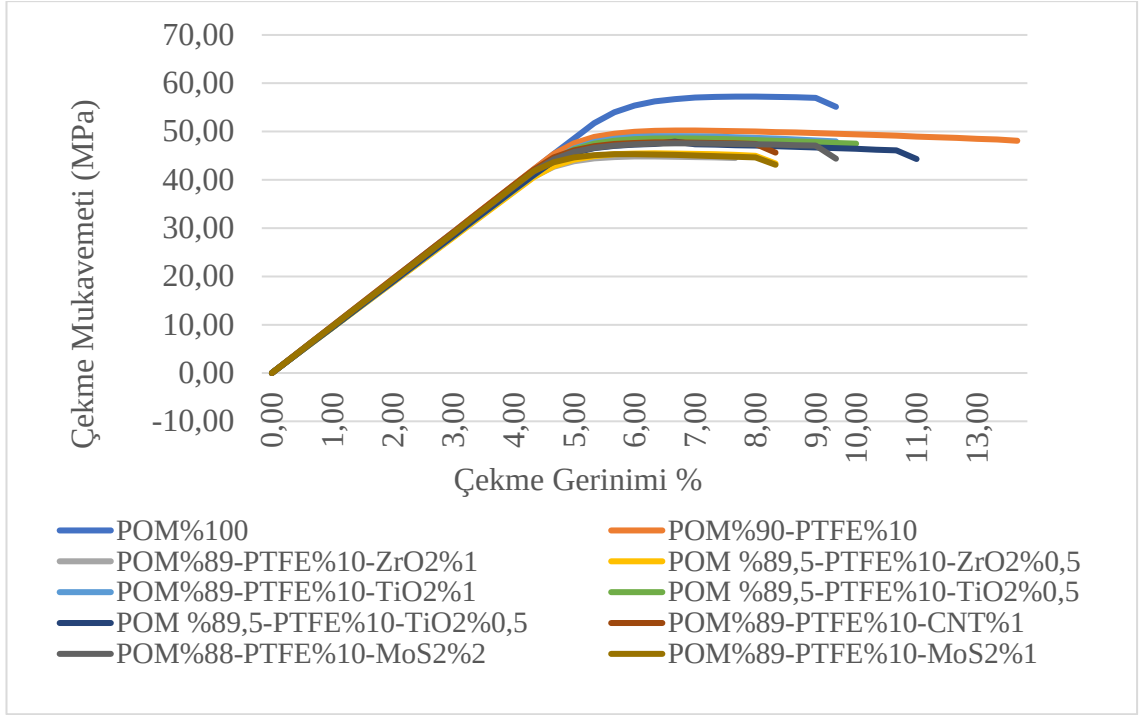
Numuneler 50kN'luk yük hücresi kullanılarak çekme ve 5kN'luk yük hücresi kullanılarak eğme testine tabi tutulmuştur. Instron 5569 model cihazda kullanılarak,15mm/dk hızında çekme ve üç nokta eğilme testlerine tabi tutulmuş ve test sonuçları aşağıda **Tablo 3.1** ve **Tablo 3.2'** de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Çekme Testi Tablosu.

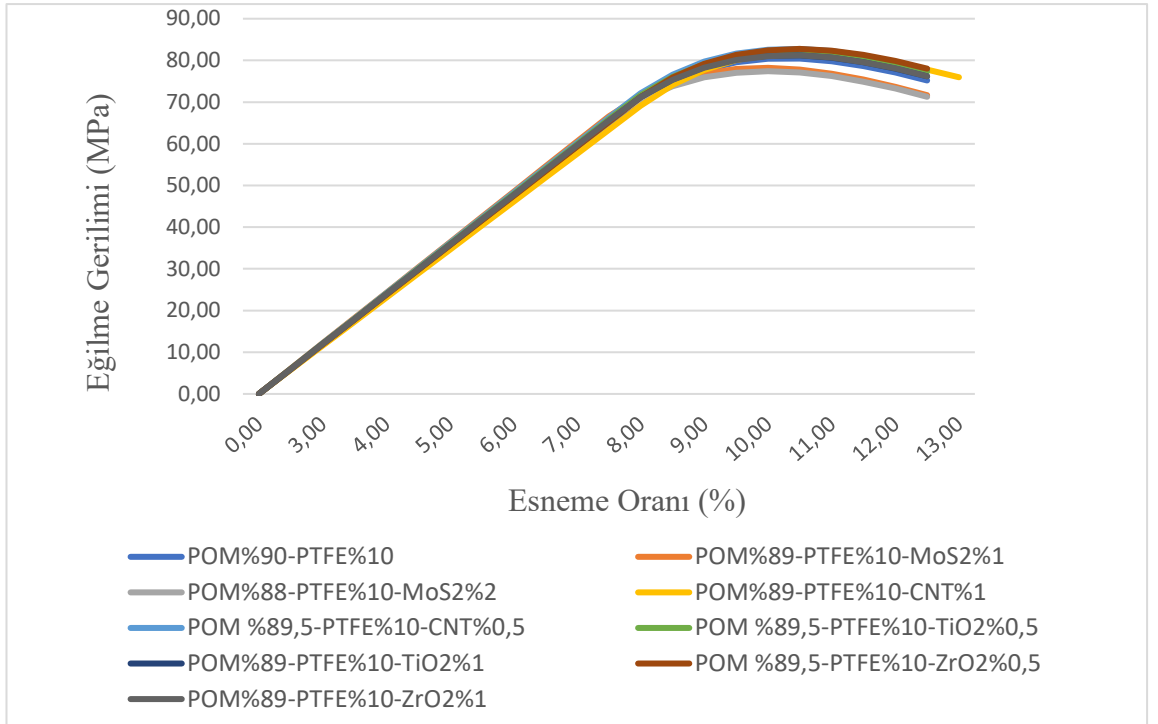
MALZEME	Ort. Çekme Mukavemeti MPa	Std. Sapma.	Avr Çekme Gerinimi %	Std. Sapma.	% İyileşme
POM %100	57,24	1,05	10,07	1,73	25,79
POM%90-PTFE%10	50,22	0,10	14,13	0,05	0,00
POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5	47,91	0,21	12,34	1,05	-4,59
POM%89-PTFE%10-CNT%1	47,75	0,17	9,17	1,28	-4,91
POM%89-PTFE%10-TiO ₂ %1	49,04	0,03	9,64	0,31	-2,34
POM %89,5-PTFE%10-TiO ₂ %0,5	48,58	0,19	10,12	0,19	-3,25
POM %89,5-PTFE%10-ZrO ₂ %0,5	45,50	1,72	9,07	0,69	-9,38
POM%89-PTFE%10-ZrO ₂ %1	44,84	0,72	8,87	1,85	-10,71
POM%89-PTFE%10-MoS ₂ %1	45,31	0,32	9,67	1,13	-9,77
POM%88-PTFE%10-MoS ₂ %2	47,55	0,40	10,36	1,00	-5,31

Tablo 3.1' de çalışmaların çekme testlerinden elde edilen ortalama çekme mukavemeti (MPa), ortalama çekme gerinim (%), ve bunların standard sapmalarını içermektedir ve **Şekil 3.1'** de de Çekme Mukavemeti (MPa)-Çekme Gerinimi % grafiği gösterilmektedir.

İlk iki malzeme POM %100 (Saf POM) ve POM%90-PTFE%10 bu çalışmadaki diğer malzemelerle kıyaslanması ve referans değerleri vermesi için aynı testlere tabi tutulmuştur. **Tablo 3.2'** de ve **Şekil 3.2'** de ise üç nokta eğme testlerinden elde edilen test sonuçları yer almaktadır.



Şekil 3.1: Çekme Mukavemeti (MPa)-Çekme Gerinimi %.



Şekil 3.2: Eğilme Gerinimi (MPa)-Esneleme Oranı %.

Tablo 3.2. Üç Nokta Eğme Testi.

MALZEME	Ort. Eğilme Gerilimi MPa	Std. Sap.	Ort. Esnekleme Oranı %	Std. Sap.	% İyileşme
POM %100	95,00	1,08	9,89	0,19	18,02
POM%90-PTFE%10	80,50	1,65	8,69	0,27	0,00
POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5	82,75	1,14	9,12	0,11	2,80
POM%89-PTFE%10-CNT%1	81,90	0,83	5,97	0,12	1,75
POM %89,5-PTFE%10-TiO ₂ %0,5	82,12	0,77	8,90	0,56	2,01
POM%89-PTFE%10-TiO ₂ %1	81,22	0,86	8,89	0,34	0,90
POM %89,5-PTFE%10-ZrO ₂ %0,5	82,76	1,52	9,04	0,20	2,81
POM%89-PTFE%10-ZrO ₂ %1	81,22	0,32	11,20	0,10	0,89
POM%89-PTFE%10-MoS ₂ %1	78,22	2,28	8,38	0,26	-2,83
POM%88-PTFE%10-MoS ₂ %2	77,41	1,14	8,67	0,07	-3,83

3.2. Sürtünme Test Sonuçları

Tablo 3.3' te, çalışmamızdaki malzemelerin sürtünme katsayıları ölçümelerini gösteriyor. Bu testler CSM Instruments marka Pin-On-Disk cihazında 20N yükte, 8,5mm genlikte, 250m mesafede 6mm küresel çelik bilya ile yapılmıştır.

Tablo 3.3. Sürtünme Katsayısı ve POM%90-PTFE%10 a Göre %İyileşme.

MALZEME	Sürtünme Kats. (μ)	Std.Sapma.	%İyileşme
POM %100	0,159	0,020	-33,89
POM%90-PTFE%10	0,119	0,003	0,00
POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5	0,103	0,004	13,45
POM%89-PTFE%10-CNT%1	0,107	0,009	9,80
POM %89,5-PTFE%10-TiO ₂ %0,5	0,117	0,002	1,40
POM%89-PTFE%10-TiO ₂ %1	0,107	0,005	9,80
POM %89,5-PTFE%10-ZrO ₂ %0,5	0,115	0,002	3,64
POM%89-PTFE%10-ZrO ₂ %1	0,112	0,011	5,60
POM%89-PTFE%10-MoS ₂ %1	0,108	0,006	9,24
POM%88-PTFE%10-MoS ₂ %2	0,114	0,006	4,20

Referans alınan POM%90-PTFE%10 malzemeye göre diğer malzemelerin sürtünme katsayıları ile kıyaslanmıştır. Yüksek bir iyileşme yüzdesi, düşük sürtünme katsayısına işaret eder. POM %100 (Saf POM) en yüksek sürtünme katsayısına (0,1593) sahiptir ve POM%90-PTFE%10'a göre %-33,89 daha yüksek sürtünmeye sahiptir. Bu, diğer tüm materyallerin sürtünme katsayısının düşürülmesi açısından ne kadar iyileştirildiğinin bir göstergesidir. Saf POM'un yüksek sürtünme katsayısı, mekanik parçalar arasındaki sürtünme direncinin en yüksek olduğunu göstermiştir.

POM%90-PTFE%10 referans malzemedir. Diğer tüm malzemelerin sürtünme katsayılarındaki değişim oranları bu malzemeye göre hesaplanmıştır. Ortalama sürtünme katsayısı 0,1190 ve sürtünme katsayısı en yüksek ikinci malzeme olup, referans malzememizdir.

3.3. Karbon Nanotüpler (CNT)

Bu çalışmada, %10 PTFE katkılı POM kompozitlerine %0.5 ve %1 oranlarında CNT eklenmiştir. %0,5 CNT eklenmiş POM/PTFE kompozitlerinin çekme dayanımı 47,91 MPa, çekme gerinimi %12,34 olarak ölçülmüştür. %1 CNT eklenmiş kompozitlerde ise çekme dayanımı 47,75 MPa, çekme gerinimi %9,17 olmuştur. Eğilme dayanımı %0,5 CNT eklenmiş kompozitlerde 82,75 MPa, %1 CNT eklenmiş kompozitlerde 81,90 MPa olarak belirlenmiştir. Eğilme gerinimi %0,5 CNT eklenmiş kompozitlerde %9,12; POM%89-PTFE%10-CNT%1 malzeme; 81,90 MPa eğilme gerilmesi ve %5,97 esneme oranı ile %1,75 iyileşme sağlamıştır. Ancak, daha fazla CNT eklenmesi esneme kabiliyetini önemli ölçüde düşürmüştür. Bu durum, katkı maddesinin optimum miktarının aşılması halinde performansın olumsuz etkilendiğini göstermektedir.

Çekme mukavemetinde referans malzememiz POM-PTFE ye göre -% 4,5 azalmıştır. Sürtünme katsayısı açısından bakıldığında, %0,5 CNT eklenmiş POM/PTFE kompozitlerinin sürtünme katsayısı 0,1030 olup, bu değer saf POM'a göre %35.36 iyileşme göstermektedir. %1 CNT eklenmiş kompozitlerde sürtünme katsayısı 0.1090 olup, %31.6 iyileşme sağlanmıştır. POM%90-PTFE%10'ye kıyasla sürtünme katsayısını %13.45, %1 CNT eklenmesi ise %9.80 oranında düşürmüştür.

Bhanu K. Goriparthi ve ekibinin çalışmasında karbon nanotüplerin (CNT) POM kompozitleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, silanize edilmiş CNT'lerin (S-CNT) %1 oranında kullanılması, POM/CNT nanokompozitlerinin çekme ve eğilme özelliklerinde maksimum iyileşmeyi sağlamıştır. Özellikle, %1 oranında S-CNT eklenmesi, çekme dayanımında %20, eğilme dayanımında %15 artış sağlamıştır. Yorulma dayanımı ve spesifik aşınma oranı, fonksiyonlandırma ve CNT konsantrasyonuna bağlı olarak artış göstermiştir. Ayrıca, %1 S-CNT içeren kompozitler, aşınma direncinde ve sürtünme katsayısında en yüksek iyileşmeyi göstermiş, sürtünme katsayısında %30 oranında azalma sağlanmıştır [9].

Bu tez çalışmasında ise %0,5 ve %1 oranlarında CNT eklenmesi ile %35,36, %1 CNT eklenmesiyle %31,6 iyileşme göstermiştir. Bu sonuçlar, her iki çalışmada da CNT katkısının POM kompozitlerinin mekanik ve sürtünme özelliklerini iyileştirdiğini

ortaya koymaktadır. Ancak, optimal CNT oranının belirlenmesi önemlidir, çünkü belirli bir konsantrasyonun üzerinde performans düşüşü gözlemlenebilir.

3.4. TiO₂

Bizim çalışmamızda, POM%90-PTFE%10'a %0,5 ve %1 oranlarında TiO₂ eklenmiştir. %1 TiO₂ eklenmiş POM/PTFE kompozitlerinin çekme dayanımı 49,04 MPa, çekme gerinimi %9,64 olarak ölçülmüş, %0,5 TiO₂ eklenmiş kompozitlerde çekme dayanımı 48,58 MPa, çekme gerinimi %10,12 olmuştur. Eğilme dayanımı %0,5 TiO₂ eklenmiş kompozitlerde 82,12 MPa olmuş ve POM%90-PTFE%10'a göre %2,01 iyileşme sağlamıştır, %1 TiO₂ eklenmiş kompozitlerde 81,22 MPa olarak belirlenmiştir. Eğilme gerinimi ise %0,5 TiO₂ eklenmiş kompozitlerde %8,90, %1 TiO₂ eklenmiş kompozitlerde %8,89 olmuştur. Sürtünme katsayısı açısından bakıldığında, %1 TiO₂ eklenmiş POM/PTFE kompozitlerinin sürtünme katsayısı 0,1090 olup, bu değer saf POM'a göre %31,6 iyileşme göstermektedir. %0,5 TiO₂ eklenmiş kompozitlerde sürtünme katsayısı 0,1100 olup, %30,8 iyileşme sağlanmıştır.

Chang L.ve ekibinin çalışmasında TiO₂ katkısının PA66 kompozitlerinin sürtünme özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, TiO₂'nin PA66'ya eklenmesi, sürtünme katsayısını önemli ölçüde azaltmış ve daha kararlı hale getirmiştir. TiO₂ içermeyen malzemelerde sürtünme katsayısının zamanla artma eğiliminde olduğu belirtilmiştir. Chang L.ve ekibinin çalışmasında TiO₂'nin PA66'nın sürtünme katsayısını 0,60'tan 0,44'a düşürerek %9,16 iyileştirmiştir. PA66 için camsı geçiş sıcaklığı (T_g) yaklaşık 75 °C olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta PA66, camsı halden kauçuksu hale geçer ve mekanik özellikleri önemli ölçüde değişir. Ancak, çalışma sonucunda nano-TiO₂ ilavesinin, T_g üzerinde doğrudan bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Yani, nano-TiO₂ eklenmesi PA66'nın cam geçiş sıcaklığını değiştirmemiştir. Bu sonuçlar, TiO₂'nin polimer kompozitlerde düşük sürtünme katsayısı ve yüksek mekanik özellikler elde etmek için etkili bir katkı maddesi olduğunu göstermektedir [15].

Sonuç olarak, TiO₂ katkısı, her iki çalışmada da sürtünme katsayısını azaltmada etkili olmuş ve mekanik özelliklerde de belirgin iyileşmeler sağlamıştır.

3.5. ZrO₂

Bizim çalışmamızda , %10 PTFE katkılı POM kompozitlerine %0,5 ve %1 oranlarında ZrO₂ eklenmiştir. Sürtünme katsayısı açısından bakıldığında, %0,5 ZrO₂ eklenmiş POM/PTFE kompozitlerinin sürtünme katsayısı 0,1125 olup, bu değer saf POM'a göre %3,6 iyileşme göstermektedir. %1 ZrO₂ eklenmiş kompozitlerde sürtünme katsayısı 0.1080 olup, %5.6 iyileşme sağlanmıştır.

%0,5 ZrO₂ eklenmiş POM/PTFE kompozitlerinin çekme dayanımı 45,50 MPa, çekme gerinimi %9,07 olmuştur. %1 ZrO₂ eklenmiş kompozitlerde çekme dayanımı 44,84 MPa, çekme gerinimi %8,87 olarak gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı %0,5 ZrO₂ eklenmiş kompozitlerde 82,76 MPa, %1 ZrO₂ eklenmiş kompozitlerde 81,22 MPa olarak belirlenmiştir. Eğilme gerinimi ise %0,5 ZrO₂ eklenmiş kompozitlerde %9,04, %1 ZrO₂ eklenmiş kompozitlerde %11,20 bir iyileşme olmuştur.

Kurahatti ve ekibinin çalışmasında, ZrO₂'nin epoksi içerisine %0,5 oranında eklenmesi, sürtünme katsayısını önemli ölçüde azaltmıştır. Katkısız epoksinin sürtünme katsayısı 0,57 iken, %0,5 ZrO₂ eklenmesiyle bu değer 0,38'e düşmüştür. Bu düşüş, ZrO₂'nin katı yağlayıcı etkisi göstermesi ve sürtünme sırasında temas bölgesinde anafaz malzemenin sarılarak sürtünmeyi azaltmasıyla açıklanmıştır. Eğilme dayanımı ZrO₂ katkılı ve saf epoksi karşılaştırıldığında 38 MPa'dan 48 MPa'a yükseltmiş ve %26 bir iyileşme sağlamıştır **[16]**.

Sonuç olarak, ZrO₂ katkısının POM-PTFE içerisinde, sürtünme katsayısını azaltmada etkili olduğu ancak mekanik özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlamadığı görülmüştür.

3.6. MoS₂

Bizim çalışmamızda , %10 PTFE katkılı POM kompozitlerine %1 ve %2 oranlarında MoS₂ eklenmiştir. %1 MoS₂ eklenmiş POM/PTFE kompozitlerinin çekme dayanımı 45,31 MPa, çekme gerinimi %9,67 olarak ölçülmüş, %2 MoS₂ eklenmiş kompozitlerde çekme dayanımı 47,5 MPa, çekme gerinimi %10,36 olmuştur. Eğilme dayanımı %1 MoS₂ eklenmiş kompozitlerde 78,22 MPa, %2 MoS₂ eklenmiş kompozitlerde 77,41 MPa olarak belirlenmiştir. Eğilme gerinimi ise %1 MoS₂

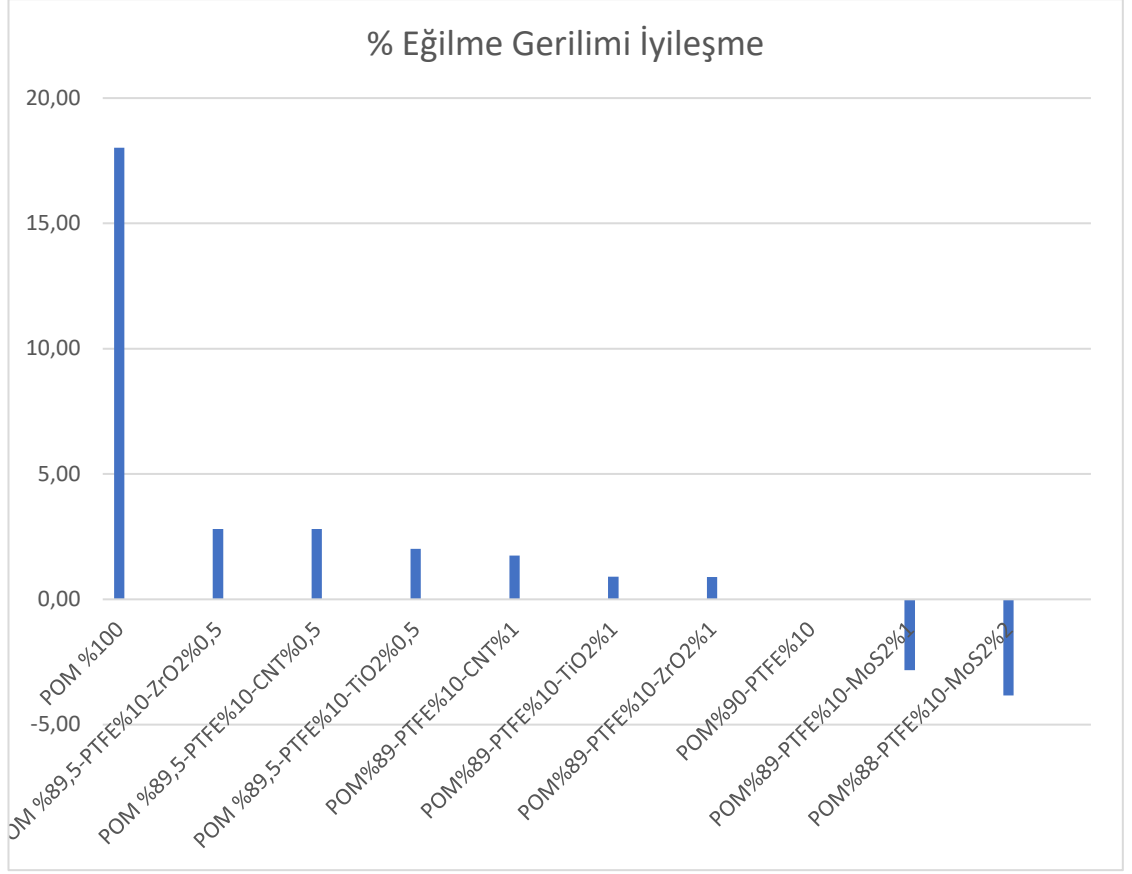
eklenmiş kompozitlerde %8,38, %2 MoS₂ eklenmiş kompozitlerde %8,67 olarak gözlemlenmiştir.

Sürtünme katsayısı açısından bakıldığında, %1 MoS₂ eklenmiş POM/PTFE kompozitlerinin sürtünme katsayısı 0,1088 olup, bu değer saf POM'a göre %9,24 iyileşme göstermektedir. %2 MoS₂ eklenmiş kompozitlerde sürtünme katsayısı 0,1140 olup, %4,20 iyileşme sağlanmıştır. Sonuç olarak, MoS₂ katkısı, her iki çalışmada da POM kompozitlerinde sürtünme katsayısını azaltmada etkili olmuş ancak yüksek oranlarda kullanıldığında mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir. Hu K. ve ekibinin çalışmasında belirtilen MoS₂'nin sürtünme katsayısını düşürme yeteneği, bizim çalışmada da gözlemlenmiş ve MoS₂ katkısının optimal oranının belirlenmesi ile performans artışı sağlanmıştır. Bu sonuçlar, MoS₂'nin POM kompozitlerinde düşük sürtünme katsayısı elde etmek için etkili bir katkı maddesi olduğunu göstermektedir, ancak yüksek oranlarda mekanik özelliklerde olumsuz etkiler gözlemlenmiştir.

Hu K. ve ekibinin çalışmasında, MoS₂ nano katkılarının POM tabanlı kompozitlerde dolgu maddesi olarak kullanılması, sürtünme katsayısını ve aşınma hacmini azaltmıştır. MoS₂ nano katkılarının içeriği %1 ağırlık oranını aşmadığında, düşük sürtünme katsayısı ve daha küçük aşınma hacmi gözlemlenmiştir. . %1 MoS₂ katkılı POM içeren malzemenin sürtünme katsayısı saf POM a göre göre 0,17'den 0,15'e düşmüştür ve %11.77 iyileşme olmuştur. Ancak, aşırı miktarda MoS₂ nano katkılarının kristallenme derecesini olumsuz etkileyerek kendi kendine yağlama özelliklerini bozduğu belirtilmiştir [17] .

3.7. Genel Değerlendirme

Genel olarak, referans malzeme olan POM%90-PTFE%10'a eklenen katkı maddeleri eğilme gerilimini farklı şekillerde etkilemiştir. CNT, TiO₂ ve ZrO₂ katkıları eğilme gerilimini artırırken, MoS₂ katkısı azaltmıştır. **Şekil 3.3'** te % eğilme gerilimi iyileşme grafiğinde görmekteyiz.



Şekil 3.3: %Eğilme Gerilimindeki İyileşmeler.

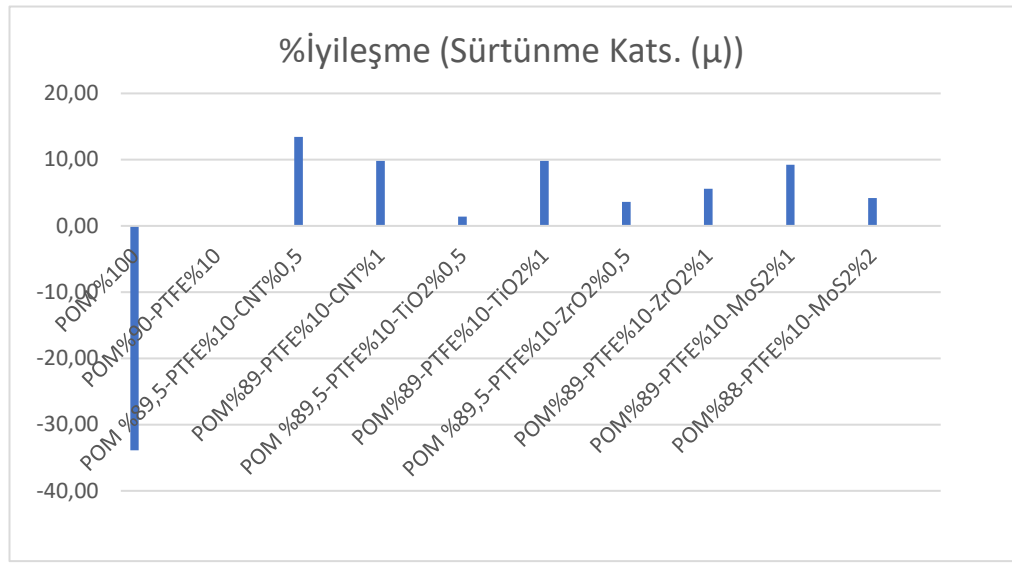
CNT eklenmiş malzemeler yüksek esneklik gösterirken, TiO₂ ve ZrO₂ içeriklerinin artırılmasının çekme mukavemetini düşürdüğü, ancak MoS₂ içeriğinin artırılmasının çekme mukavemetini daha fazla azalttığı ve esnekliği artırdığı gözlemleniyor. Genel olarak, katkı maddesi içeren malzemelerin saf POM'a göre daha düşük çekme mukavemeti değerlerine sahip oldukları görülüyor.

Plastikleşme etkisi ile polimer malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Plastikleşme, bir malzemenin daha esnek ve daha kolay şekil değiştirebilir hale gelmesi anlamına gelir. Katkı maddeleri, polimer anafazına eklenerek bu etkiyi yaratabilir. Katkı maddeleri polimer anafazına eklendiğinde, polimer zincirleri arasındaki mesafe artabilir. Bu, polimer zincirlerinin daha fazla hareket edebilmesine ve birbirine göre kayabilmesine olanak tanır. Sonuç olarak, malzeme daha esnek hale gelir ve eğilme gerinimi artar. Ancak, bu durum çekme kuvvetlerine karşı direnci azaltabilir ve çekme mukavemetinin düşmesine neden olabilir. Eğilme geriliminde artmasına sebep olabilir [19]. Burada çekme mukavemeti düşmesini buna bağlayabiliriz.

Plastifiyanlar, polimerlerin daha esnek hale gelmesini sağlayan maddelerdir. Örneğin, PVC (Polivinil klorür) malzemelere DOP (Dioktil ftalat) gibi Plastifiyanlar eklendiğinde, malzeme daha esnek hale gelir. Bu durum, eğilme geriniminde artışa ve çekme mukavemetinde azalmaya yol açabilir [19].

POM%90-PTFE%10 referans malzemesi ile ürettiğimiz malzemelerin sürtünme katsayılarındaki değişim oranlarının grafiği **Şekil 3.4**’ te gösterilmiştir.

CNT eklenmiş malzemelerde CNT katkısının sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığı görülüyor (%13,45 ve %9,80 iyileşme).



Şekil 3.4: % İyileşme (Sürtünme Kats. (μ)).

TiO₂ eklenmiş malzemeler %1 ve %0,5 TiO₂ katkılı malzemeler sırasıyla %9,80 ve %1,40 iyileşme sağlamış. Burada, %1 TiO₂ katkısının %0,5 oranına göre daha etkili olduğu görülüyor, ancak iyileşme oranları CNT katkılı malzemelere göre daha düşüktür.

MoS₂ ve ZrO₂ eklenmiş malzemeler, %9,24 ile %3,64 arasında değişen iyileşme oranları sunmuşlar. MoS₂ içeriği arttıkça iyileşme oranı azalmıştır (%9,24'den %4,20'ye). ZrO₂ içinse, %1 oranında bir katkı %5,60 iyileşme sağlarken, %0,5 oranında bir katkı %3,64 iyileşme sağlamış. Bu da, belirli bir konsantrasyonun üstünde, ek katkı maddenin sürtünme katsayısını düşürmede daha az etkili olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, CNT ve TiO₂ katkıları, POM/PTFE malzemelerin sürtünme katsayılarını düşürmede oldukça etkili olurken, MoS₂ ve ZrO₂'nin etkisi daha sınırlıdır.

Tablo 3.4: Sürtünme Katsayısı ve POM%100'e göre %iyileşme.

MALZEME	Sürtünme Kats. (μ)	Std.Sap ma.	%İyileşme
POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5	0,103	0,004	35,36
POM%89-PTFE%10-TiO ₂ %1	0,107	0,005	32,64
POM%89-PTFE%10-CNT%1	0,107	0,009	32,64
POM%89-PTFE%10-MoS ₂ %1	0,108	0,006	32,22
POM%89-PTFE%10-ZrO ₂ %1	0,112	0,011	29,50
POM%88-PTFE%10-MoS ₂ %2	0,114	0,006	28,45
POM %89,5-PTFE%10-ZrO ₂ %0,5	0,115	0,002	28,03
POM %89,5-PTFE%10-TiO ₂ %0,5	0,117	0,002	26,36
POM%90-PTFE%10	0,119	0,003	25,31
POM %100	0,159	0,020	0,00



Tablo 3.4' te ise elde edilen sürtünme katsayısı sonuçlarını ve bu sonuçların ikincil referans olarak POM %100 (Saf POM) malzemesine göre kıyaslamasını gösteriyor.

POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5 malzemesi sürtünme katsayısı önemli ölçüde azalmış (ortalama 0,1030) ve %35,36 ile en yüksek iyileşmeyi göstermiştir. Bu malzeme, eklenen katkı maddeleri arasında sürtünme katsayısını en fazla düşüren malzemedir ve bu durum CNT'nin mükemmel bir sürtünme azaltıcı olduğunu gösterir.

Genel olarak, CNT'nin diğer katkı maddelerine göre sürtünme katsayısını daha fazla azalttığı gözlemlenirken, MoS₂ ve TiO₂ eklemeleri de sürtünme katsayısını azaltmada belirli bir düzeyde etkili olmuştur. ZrO₂ eklemeleri, sürtünme katsayısını azaltma konusunda daha az etkili olmuş ancak yine de iyileşme sağlamıştır.

Lucas M. Kneissl ve ekibinin çalışmasında, POM kompozitlerine yapılan fiber katkılarının, özellikle selüloz fiberlerin, mekanik ve tribolojik özelliklerini ve performanslarını incelemişlerdir. Özellikle, düşük fiber içeriklerinde aşınma oranlarının azaldığı, ancak fiber içeriği arttıkça aşınma oranlarının tekrar yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu, fiberlerin mekanik içe geçme etkisi ve yüzeydeki transfer tabakası oluşumu ile ilişkilendirilebilir. Saf POM ve katkılı POM arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Ancak, %10 fiber içeriğinde sürtünme katsayısı 0,33'ten 0,64'e yükselmiştir. %30 fiber içeriğinde ise bu değer 0,48'e düşmüştür. Selüloz fiber katkıları POM kompozitlerinin çekme mukavemetini belirgin şekilde artırmaktadır. Örneğin, saf POM'un çekme mukavemeti 48,45 MPa iken, %30 selüloz fiber içeren POM kompozitinin çekme mukavemeti 87,55 MPa' ya kadar çıkmaktadır. Benzer şekilde, eğilme mukavemetinde de önemli artışlar gözlemlenmiştir; saf POM'un eğilme mukavemeti 74,91 MPa iken, %30 selüloz fiber katkılı POM kompozitinde bu değer 98,57 MPa' ya ulaşmıştır [20].

Seyyed M. M. Sabet ve ekibinin çalışmasında, POM plastiklerin kuru ve yağlanmış sürtünme özelliklerine odaklanmaktadır. Bosch Car Multimedia, büyük otomobil üreticileri için direksiyon açısı sensörü (SAS) üretmektedir. SAS muhafazası, kapağı ve merkezi POM malzemelerden yapılmış olup, bu malzemelerin sürtünme davranışı gürültü üretimine önemli ölçüde katkıda bulunur. Testlerde kullanılan örnek tutucu, merkezi muhafaza yüzeyi ile temas halinde tutarak statik ve kinetik sürtünme katsayılarının ölçülmesini sağlamıştır. Testler sırasında uygulanan normal yük ve açıl hız, sırasıyla 6 N ve 60 rpm olarak sabit tutulmuştur. Kuru kayma koşullarında, iki POM malzemesinin birbirine karşı kayma sürtünme katsayısı yaklaşık 0,314, Yağlanmış kaymada ise sürtünme katsayıları 0.281 olarak bulunmuştur. Buradan yağlamanın sürtünme katsayısında %11'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir [7].

Bizim çalışmamızda ise sürtünme katsayısı referans malzememiz olan POM%90-PTFE%10'a göre CNT eklenmiş malzemelerde CNT katkısının sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir (%13,45 ve %9,80 iyileşme). %1 TiO₂ eklenmiş katkılı malzemelerde ise %9,80 iyileşme olduğu gözlenmektedir, tüm bu sonuçlardan da malzemelerin yağlı koşullardaki yapılan testlerdeki sürtünme ölçümleri ile benzer sonuçlar elde ettiğimizi ortaya koymakta ve kendi kendine yağlamadaki performansı göstermektedir.

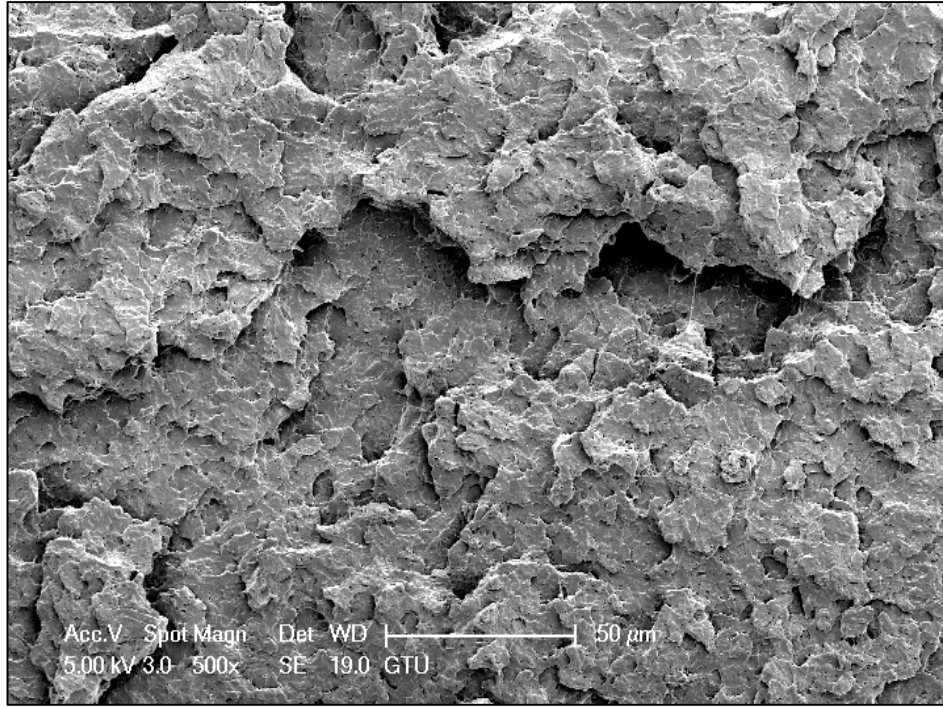
3.8. Mikro Yapılar Üzerine Etkiler

Numuneler Phillips XL30 SFEG (North Billerica, MA, ABD) Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak yüzeyinin mikroyapısal incelenmesi yapılmıştır. Yüzey görüntüleri 5 kV hızlanma voltajıyla 250, 500, 1000 ve 2000 büyütmelerde elde edilmiştir.

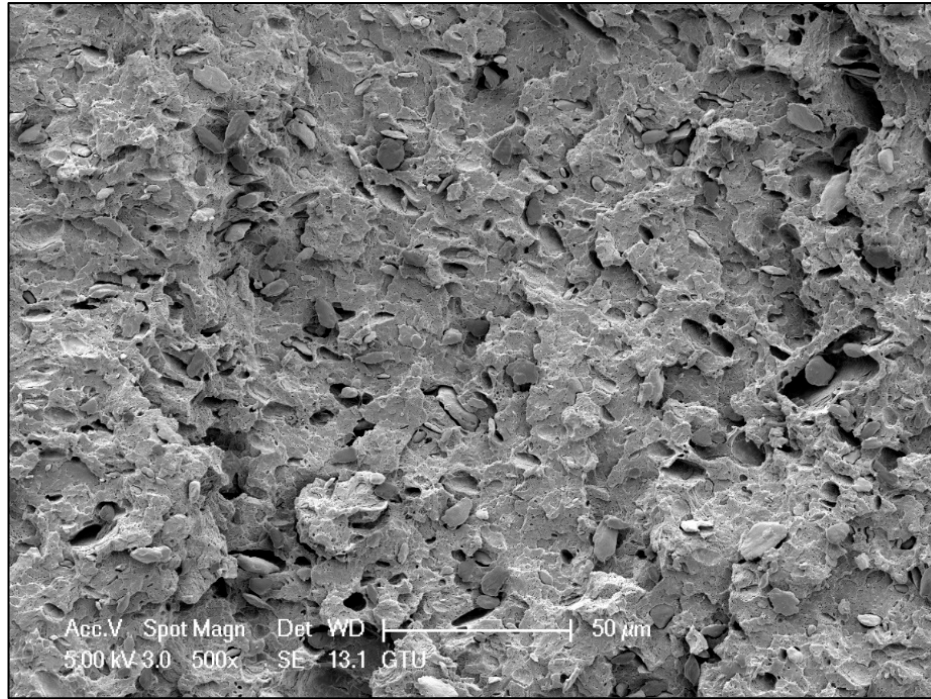
CNT ve PTFE eklenmesi, polimerlerin mikro yapısında belirgin değişikliklere neden olmuştur. SEM katkı maddelerinin polimer anafaz içindeki dağılımını ve morfolojik etkileşimlerini detaylı bir şekilde gösterir. Bu detaylı inceleme, CNT ve diğer nano katkı maddelerinin polimer malzemelere, özellikle POM ve POM/PTFE malzemelerine olan etkilerini anlamada önemli bir rehberdir. SEM analizleri, nano ve mikro katkı maddelerinin polimer anafazı içinde homojen bir dağılım sergilediğini ortaya koymuştur.

Katkılar, POM-PTFE anafazı içinde bir ağ yapısı oluşturarak geliştirilmiş mekanik özelliklere katkıda bulundu ve eşit şekilde dağılarak etkili bir yağlama sağlamış ve sürtünmeyi düşürerek daha az akım çekmesini sağlamıştır.

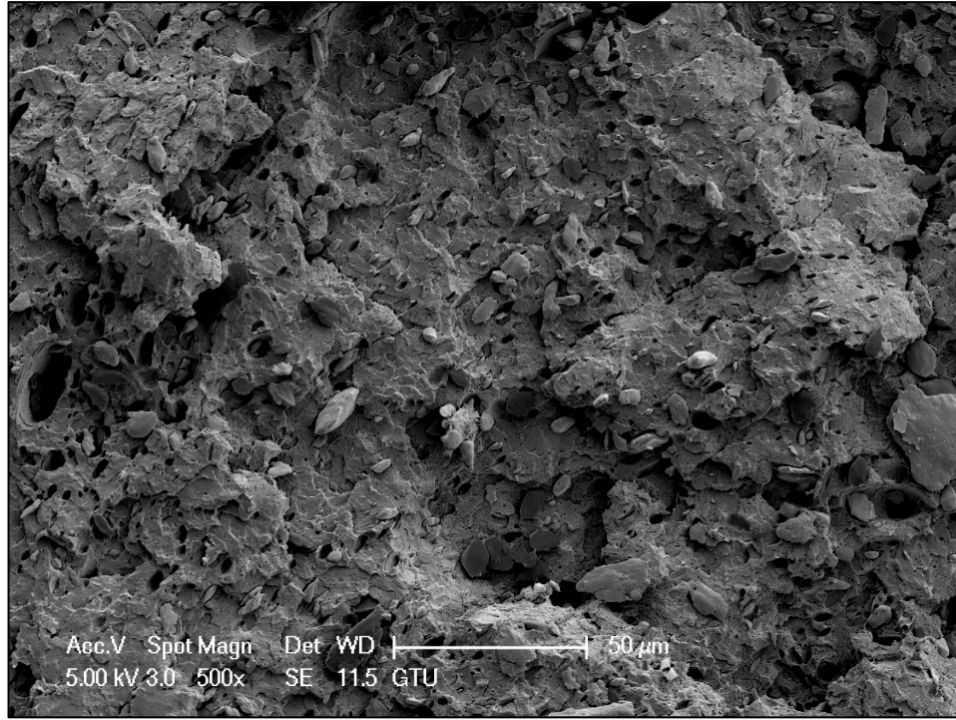
Şekil 3.4'teki POM %100'un SEM görüntüleri ile **Şekil 3.5'**teki POM%90-PTFE%10 SEM görüntüleri kıyasla PTFE'nin anafaz içindeki dağılımını göstermektedir. Süngerimsi yapının arttığı ve PTFE'nin de aralarında homojen bir şekilde dağılımından da bahsedilebilir. Öte yandan bu çalışmada kullanılan diğer katkılarda ise katkılar gözle görülür seviyede olmasa da noktasal farklılıklar oluşturmakta ve aynı zamanda renklerde koyulaşmaya sebep olduğu gözlenmektedir.



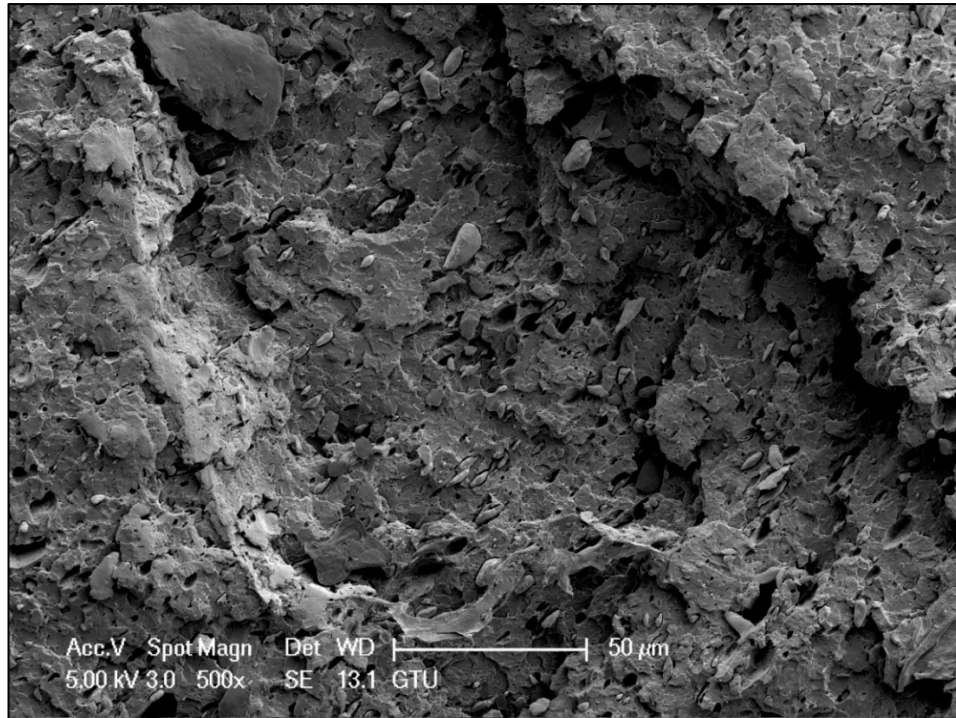
Şekil 3.5: POM %100 SEM 500X.



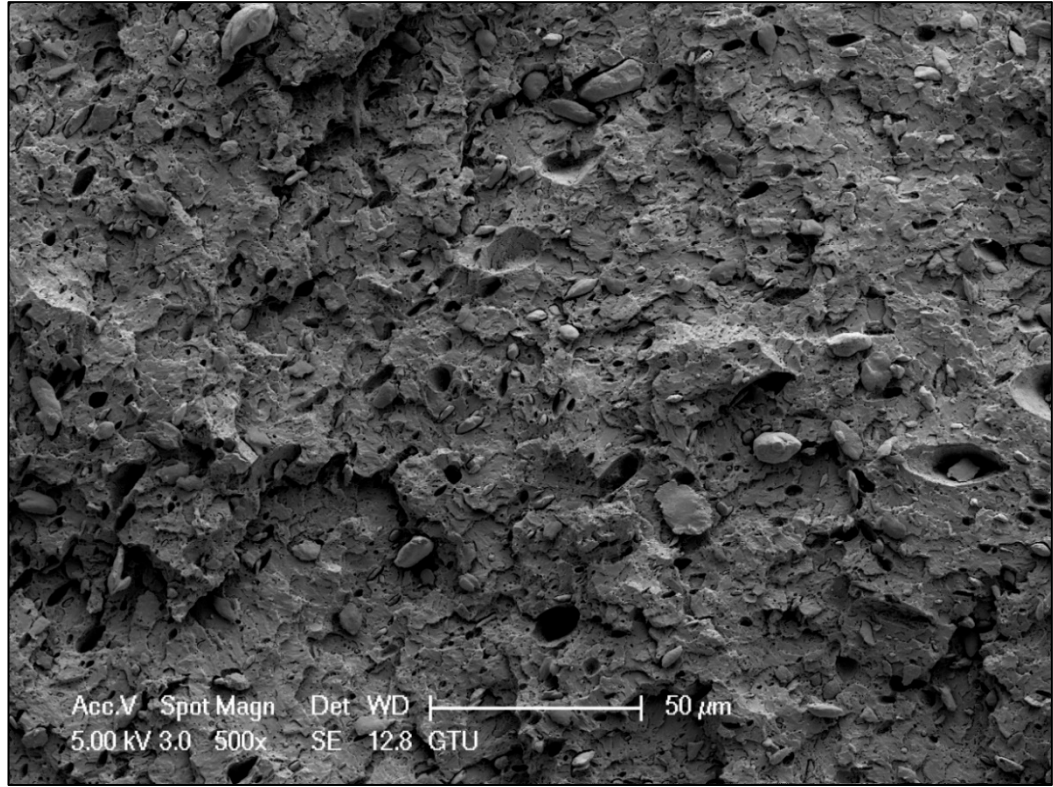
Şekil 3.6: POM%90-PTFE%10 SEM 500X.



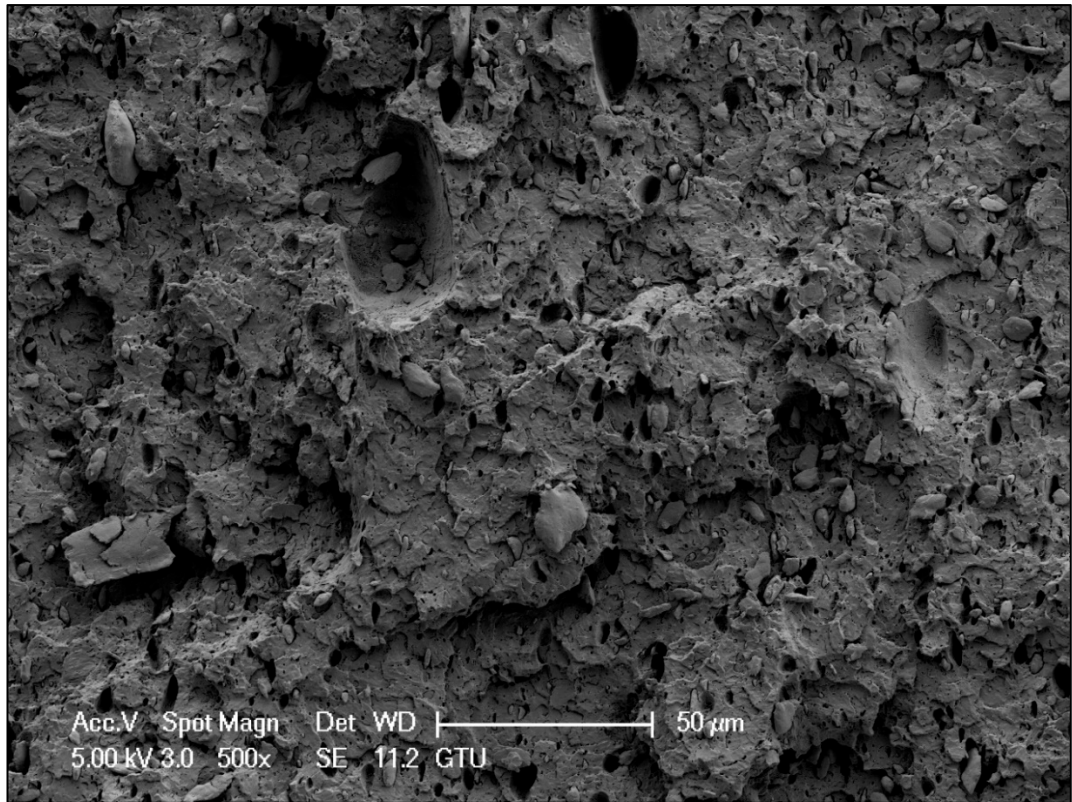
Şekil 3.7: POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5 SEM 500X.



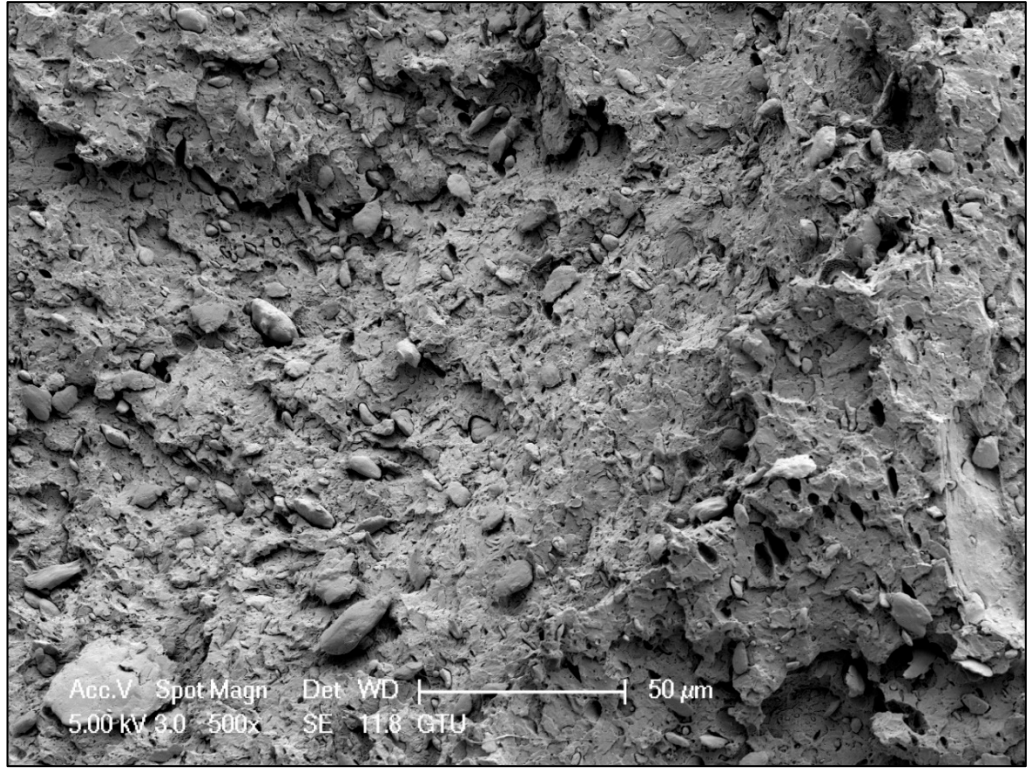
Şekil 3.8: POM%89-PTFE%10-CNT%1 SEM 500X.



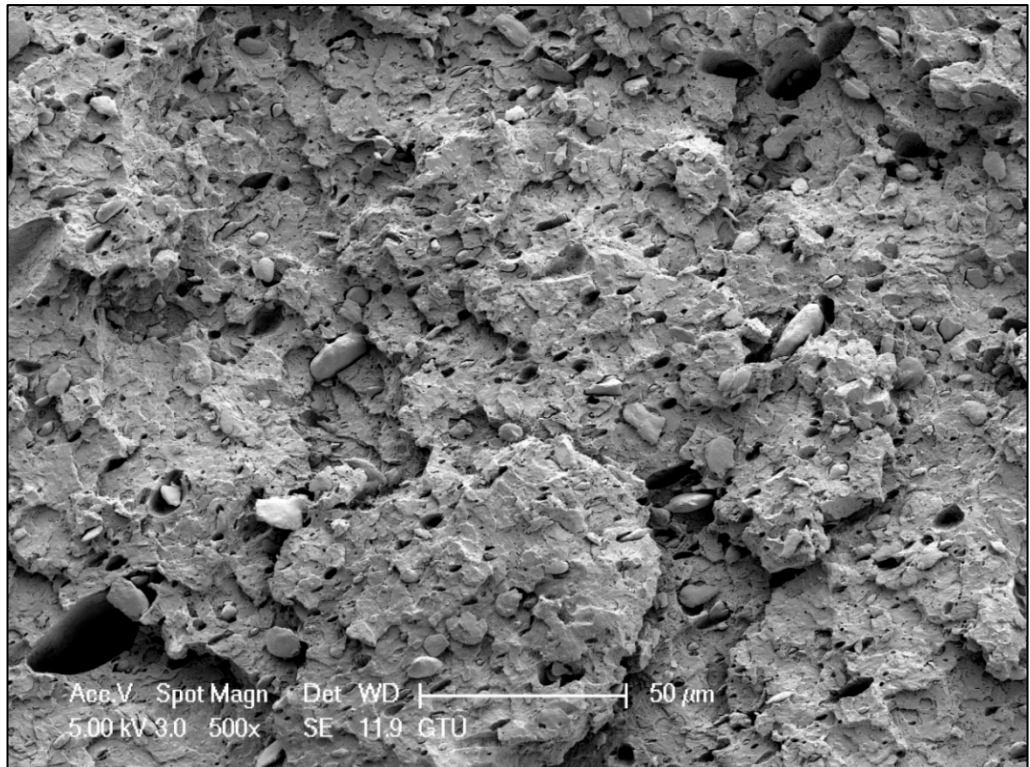
Şekil 3.9: POM %89,5-PTFE%10-TiO₂%0,5 SEM 500X.



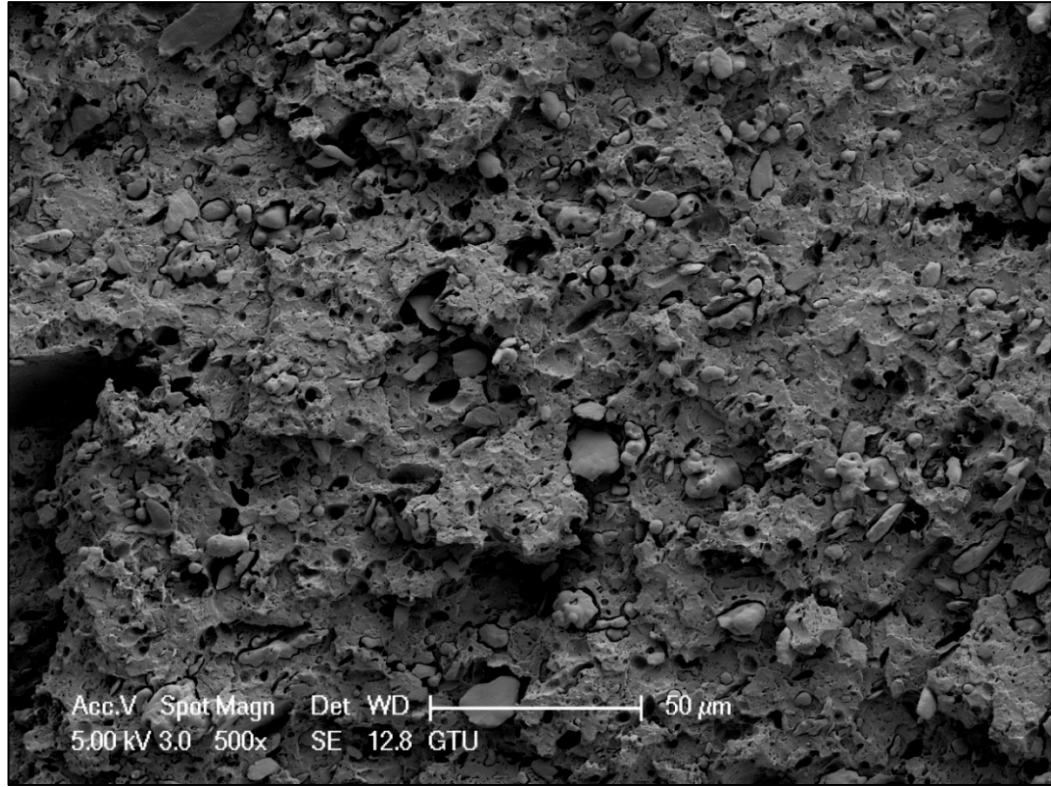
Şekil 3.10: POM%89-PTFE%10-TiO₂%1 SEM 500X.



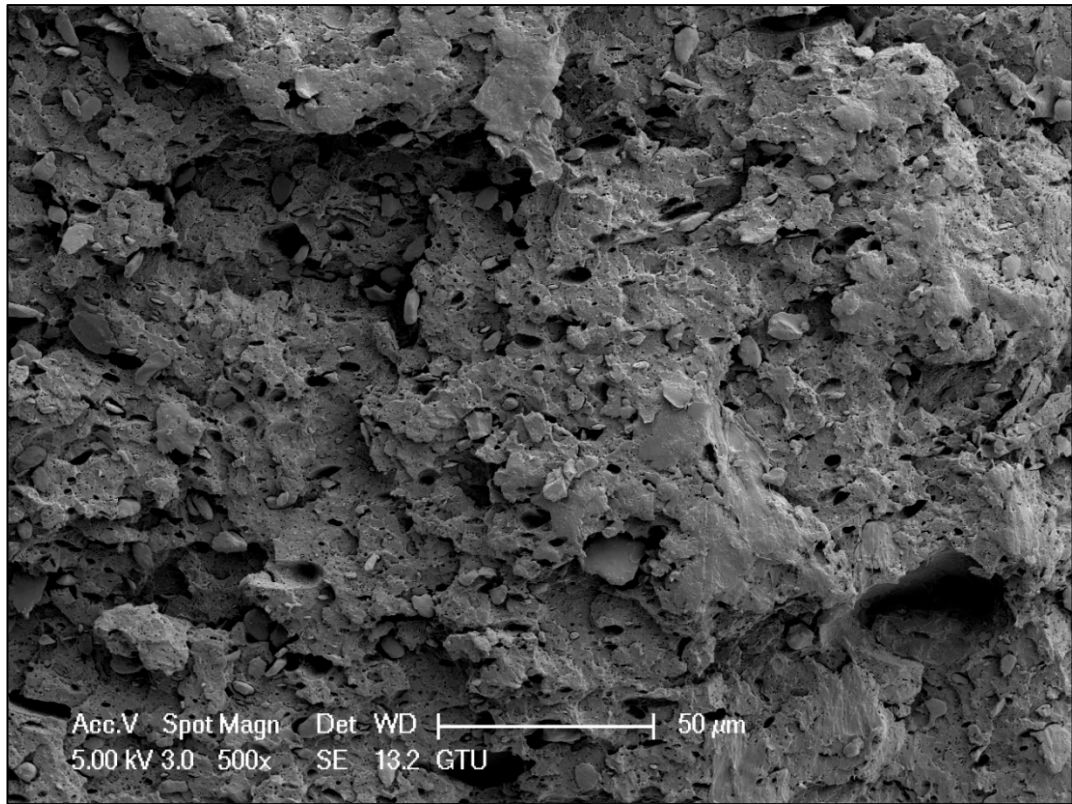
Şekil 3.11: POM %89,5-PTFE%10-ZrO₂%0,5 SEM 500X.



Şekil 3.12: POM%89-PTFE%10-ZrO₂%1 SEM 500X.



Şekil 3.13: POM%89-PTFE%10-MoS₂%1 SEM 500X.



Şekil 3.14: POM%88-PTFE%10-MoS₂%2 SEM 500X.

3.9. Lineer Aktüatörlerin Son Ürün Testleri ve Uygulama Değerlendirmeleri

Lineer aktüatörler EN 60601-1 Standartlarına göre test edilirler. Kullanıldığı nihai ürüne montajı yapıldıktan sonra fonksiyonel yük testleri ve ömür testleri yapılır. Bu testler üreticinin ürünün kaldıracağını beyan ettiği yük miktarının güvenlik faktörü %20 fazlası ile dinamik (225 kg) ve %100 fazlası ile statik olarak yapılır. **Şekil 3.15'** te örnek uygulama görülmektedir ve 450kg da statik yük testi yapılmaktadır. Burada genelde motorların üzerindeki kuvvetler kullanıldığı ürünün tasarımından ve yükün dağılımının ve ağırlık merkezinin değişimlerinden dolayı momentlerin hesaplanabilmesi için motorun çektiği akım ölçülür. Aktüatörün lineer çalışması durumundaki her yük miktarı için akım (A) değerleri ölçülür. Sürtünme düştükçe aynı yüklerde çekilen akım değeri düşmektedir.



Şekil 3.15: Muayene Masasının Statik Test Fotoğrafi (450kg).

Test cihazına (Şekil 3.16) bağlanmış lineer aktüatöre değişken yükler uygulanarak kaç amper akım çektiğine bakılır. Birbirinden farklı sürtünmeye sahip dişli ve somundan üretilmiş aktüatörlerin sabit yüklerde farklı amper akım çektiği görülmüş ve sürtünmemin artması sisteme ekstra yük getirmiş ve daha fazla akım çekmesine sebep olmuştur. Ölçüm sonuçları örnek formu **Tablo 3.5'** te gösterilmiştir.



Şekil 3.16: Lineer Aktüatör Test Cihazı.

Tablo 3.5: Örnek Lineer Aktuator Test Raporu.

FP.12.02



POLIMOT
POWERED LINEAR MOTION

LINEAR ACTUATOR TEST REPORT

Date: 11.11.2022

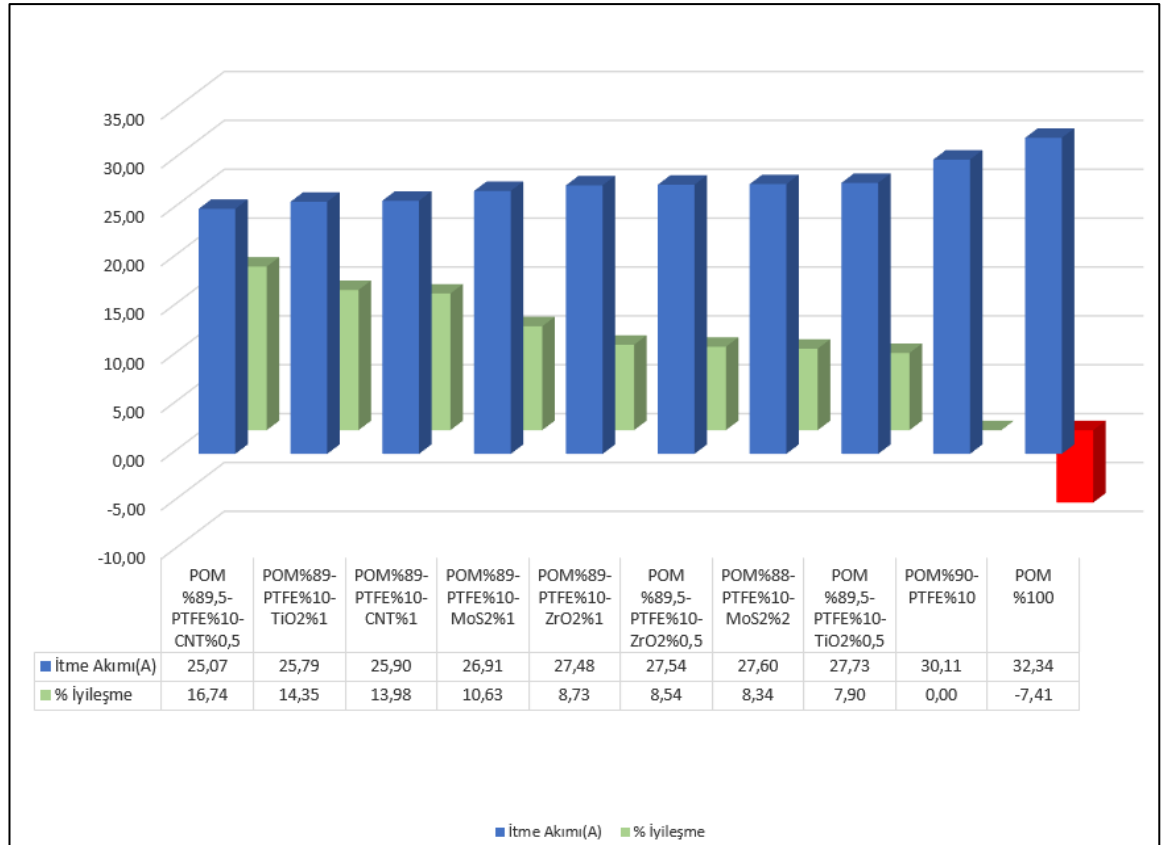
Code :	ELA01	Description:	Stabil Physiotherapy table hi&lo actuator	
ITEM No:		Stroke:	170 mm	
Customer:	Billister Tıbbi Cihazlar Ltd.	Retracted length:	385mm	
Serial nr:		Power :	8000N	

NR.	Push Current (A)	Pull Current (A)	Application Load (Kg)	Linear Equalization Load (kg)
1	1,15	0,70	Construction weight	120
2	1,60	0,60	50	250
3	2,14	0,52	100	380
4	2,44	0,42	150	455
6	2,85	0,33	200	570
7	3,50	0,28	250	730
8	3,77	0,24	275	>800
9				
10				

Tested By:		Approved By: Fatih Gökgöz	
Tedted By:			

Tablo 3.6: POM%90-PTFE%10'a Göre % Akım İyileşme.

Malzeme	İtme Akımı(A)	% İyileşme
POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5	25,07	16,74
POM%89-PTFE%10-TiO ₂ %1	25,79	14,35
POM%89-PTFE%10-CNT%1	25,90	13,98
POM%89-PTFE%10-MoS ₂ %1	26,91	10,63
POM%89-PTFE%10-ZrO ₂ %1	27,48	8,73
POM %89,5-PTFE%10-ZrO ₂ %0,5	27,54	8,54
POM%88-PTFE%10-MoS ₂ %2	27,60	8,34
POM %89,5-PTFE%10-TiO ₂ %0,5	27,73	7,90
POM%90-PTFE%10	30,11	0,00
POM %100	32,34	-7,41



Şekil 3.17: Lineer Aktüator İtme Yönünde Çalışırken Çektiği Akım Grafiği.

Tablo 3.6' da çalışmamızdaki farklı katkı maddelerinin (CNT, TiO₂, MoS₂, ZrO₂) POM/PTFE malzemelerine eklenmesiyle üretilmiş dişliler, lineer aktüatör motora monte edilerek test cihazına bağlanmış ve 50 kg'dan 600 kg'a (50 kg adımlarla) kadar olan yüklerde çektikleri akım (Amper) ölçülmüş ve ortalamaları tabloda gösterilmiştir. Bu testler, lineer aktüatörlerde hiçbir harici yağlayıcı kullanılmadan gerçekleştirilmiştir.

Katkı maddeleri eklenen malzemeler, katkısız POM'a kıyasla daha düşük akım çekmiş ve bu da malzemelerin iyileştirilmiş sürtünme özelliklerine işaret etmektedir. Akım değerlerindeki azalma, sürtünme katsayısının düşürüldüğünü ve bu sayede aktüatörlerin daha az enerji tükettiğini gösterir. Her bir malzemenin, katkısız POM (%100 POM) ile karşılaştırıldığında performansındaki artışı ifade eden iyileşme oranları şu şekilde yorumlanabilir:

CNT, TiO₂, MoS₂ ve ZrO₂ Katkılı Malzemeler: Bu katkı maddeleri eklenen malzemeler, %90 POM/%10 PTFE'ye göre %16,74 ile %7,90 arasında bir iyileşme göstermiştir. Özellikle, CNT ve TiO₂ katkıları daha yüksek oranda iyileşme sağlamıştır. Bu, bu katkı maddelerinin malzemenin sürtünme özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve böylece daha az enerjiyle daha verimli çalıştığını gösterir. Bu iyileşmeler **Şekil 3.17'** deki grafikte verilmiştir.

Katkısız POM (%100 POM): %90 POM/%10 PTFE'ye kıyasla -%7,41 olarak negatif bir değer göstermiş ve daha fazla akım çekmiştir. Bu, katkı maddesi eklenmemiş saf POM'un, katkı maddeleri içeren malzemelere göre daha yüksek sürtünme katsayısına ve dolayısıyla daha yüksek akım çektiğini ifade eder. Bu oran, katkısız POM'un performansının bu katkılı malzemelere göre daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu sonuçlar, sürtünme katsayısının azaltılmasının ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinin, POM/PTFE malzemelerinin performansını artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca, daha düşük enerji tüketimiyle daha verimli sistemlerin tasarlanabileceğini de ortaya koyar.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında geliştirilen kendi kendini yağlayan polimer kompozitler, özellikle tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan lineer aktüatör dişlileri için birçok avantaj sunmaktadır. Bu yenilikçi malzemeler, bakım gereksinimlerini azaltarak ve bileşenlerin ömrünü uzatarak daha sürdürülebilir ve verimli sistem operasyonlarına katkıda bulunmaktadır. Öne çıkan kompozit formülasyonu olan POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5, üstün mekanik ve sürtünme özellikleri sergileyerek yüksek performanslı lineer aktüatörlerde kullanım için ideal bir aday haline gelmiştir. Bu kompozit malzeme, düşük sürtünme katsayısı ve iyi mekanik özellikleri ile, aktüatör dişlilerinin uzun süreli ve daha verimli çalışmasını sağlayacaktır. Aynı zamanda, PTFE'nin mükemmel kayganlık özellikleri ile CNT'nin yüksek mukavemeti bir araya gelerek, malzemenin dayanıklılığını ve performansını daha da artırmaktadır. Böylece, bakım sıklığının azalması, işletme maliyetlerinin düşmesi ve sistem verimliliğinin artması gibi önemli avantajlar elde edilebilecektir. Ayrıca geri dönüştürülmüş CNT'lerin kullanımı da mümkündür ve bu sayede doğal kaynakların tüketimini azaltır ve çevresel ayak izini küçültür. Bu, sürdürülebilir bir üretim döngüsüne katkıda bulunur. Geri dönüşüm süreci, yeni CNT üretim maliyetlerini düşürür. Bu hem üreticiler hem de tüketiciler için maliyet avantajı sağlar. İleri teknolojiler ve yöntemler sayesinde, bu malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri korunabilir.

İkinci en iyi performansı gösteren POM%89-PTFE%10-TiO₂%1 formülasyonu da dikkat çekicidir. Bu formülasyon, CNT ve TiO₂'nin fiyatlarının kıyaslanması sonrasında, TiO₂'nin daha uygun üretim maliyetlerine sahip olması nedeniyle sanayide daha fazla tercih edilmektedir. TiO₂ katkısının, kompozit malzemenin maliyet etkinliğini artırırken aynı zamanda yüksek mekanik ve sürtünme özelliklerini koruması, onu cazip bir seçenek haline getirmektedir.

Üçüncü en iyi performansı gösteren POM %89,5-PTFE%10-ZrO₂%0,5 mekanik özelliklerde CNT ile eşdeğer performans sergilemiş ve sürtünme katsayısı ise POM'a kıyasla %28,03 bir iyileşme sağlamıştır.

Sonuç olarak, bu polimer kompozitler, tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan lineer aktüatör dişlileri için devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır.

Üstün performansları, düşük bakım gereksinimleri ve uzun ömürlü yapıları ile bu malzemeler, geleceğin sürdürülebilir ve verimli sistemlerinin temel taşlarından biri olma potansiyeline sahiptir. Optimal kompozit formülasyonlarının dikkatlice seçilmesi ve maliyet etkinliklerinin göz önünde bulundurulması, bu yenilikçi malzemelerin endüstride geniş çapta benimsenmesine ve kullanılmasına olanak tanıyacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]Mishra, M. (2018). Encyclopedia of Polymer Applications, 3 Volume Set. CRC press.
- [2]Briscoe, B. J., & Tabor, D. (1978). Friction and wear of polymers: the role of mechanical properties. British Polymer Journal, 10(1), 74-78.
- [3]Matta, A. K. (2016). Preparation and toughness studies of Acetal (POM) & PTFE blend. Int. JI for Modern Trends in Sci. Technol, 2(12), 63-66.
- [4]Mergler, Y. J., Schaake, R. P., & Huis, A. J. (2004). Material transfer of POM in sliding contact. Wear, 256(3-4), 294-301.
- [5] Dupont Corporation. (2006). DuPont TM Delrin ® acetal resin Molding Guide.
- [6]Dupont Corporation. (2001). Engineering Polymers General Design Principles-Module I ® DuPont registered trademarks of E.I. du Pont de Nemours and Company DuPont and The miracles of science TM are trademarks of E.I. du Pont de Nemours and Company.
- [7] Sabet, S. M., Dourado, M., Pereira, A., Silva, A., Carvalho, F., Brito, I., ... & Abreu, C. (2019). Friction Properties of Polyoxymethylene (POM) Materials in Dry and Lubricated Conditions. In Innovation, Engineering and Entrepreneurship (pp. 568-573). Springer International Publishing.
- [8]Zeus Technical Whitepapaer. (2005). **Friction** and Wear of Polymers. Retrieved March31 , 2024, from [https://www.appstate.edu/~clementsjs/polymerproperties/\\$p\\$lastics_\\$f\\$friction\\$5f\\$w\\$ear.pdf](https://www.appstate.edu/~clementsjs/polymerproperties/plastics_ffriction$5f$w$ear.pdf)
- [9]Goriparthi, B. K., Naveen, P. N. E., Shankar, H. R., & Ghosh, S. (2019). Mechanical, wear and fatigue behavior of functionalized CNTs reinforced POM/PTFE composites. Materials Research Express, 6(6), 065051.
- [10]Matta, A. K. (2016). Preparation and toughness studies of Acetal (POM) & PTFE blend. Int. JI for Modern Trends in Sci. Technol, 2(12), 63-66.
- [11]Lüftl, S., Visakh, P. M., & Chandran, S. (2014). Polyoxymethylene handbook: structure, properties, applications and their nanocomposites. John Wiley & Sons.
- [12]Zhi Rong, M., Qiu Zhang, M., Liu, H., Zeng, H., Wetzel, B., & Friedrich, K. (2001). Microstructure and tribological behavior of polymeric nanocomposites. Industrial Lubrication and Tribology, 53(2), 72-77.
- [13]Goriparthi, B. K., Naveen, P. N. E., Ravi Sankar, H., & Ghosh, S. (2019). Effect of functionalization and concentration of carbon nanotubes on mechanical, wear and fatigue behaviours of polyoxymethylene/carbon nanotube nanocomposites. Bulletin of Materials Science, 42(3), 98.

- [14]Özkan, A., Yapıcı, E., Günkaya, Z., & Banar, M. (2018). Plastik atıklardan karbon nanotüp (CNT) üretimi üzerine bir değerlendirme. *Anadolu University Journal of Science and Technology B-Theoretical Sciences*, 6(1), 98-107.
- [15]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(16), 3188-3198.
- [16]Kurahatti, R. V., Surendranathan, A. O., Kumar, A. R., Wadageri, C. S., Auradi, V., & Kori, S. A. (2014). Dry sliding wear behaviour of epoxyreinforced with nanoZrO₂ particles. *Procedia Materials Science*, 5, 274-280.
- [17]Hu, K. H., Wang, J., Schraube, S., Xu, Y. F., Hu, X. G., & Stengler, R. (2009). Tribological properties of MoS₂ nano-balls as filler in polyoxymethylene-based composite layer of three-layer self-lubrication bearing materials. *Wear*, 266(11-12), 1198-1207.
- [18]Mishra, V., Negi, S., Kar, S., Sharma, A. K., Rajbahadur, Y. N. K., & Kumar, A. (2022). Recent advances in fused deposition modeling fused deposition modeling based additive manufacturing of thermoplastic composite structures: a review. *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*.
- [19]Pita, V. J., Sampaio, E. E. M., & Monteiro, E. E. (2002). Mechanical properties evaluation of PVC/plasticizers and PVC/thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing. *Polymer Testing*, 21(5), 545-550.
- [20]Kneissl, L. M., Gonçalves, G., Joffe, R., Kalin, M., & Emami, N. (2023). Mechanical properties and tribological performance of polyoxymethylene/short cellulose fiber composites. *Polymer testing*, 128, 108234.

ÖZGEÇMİŞ

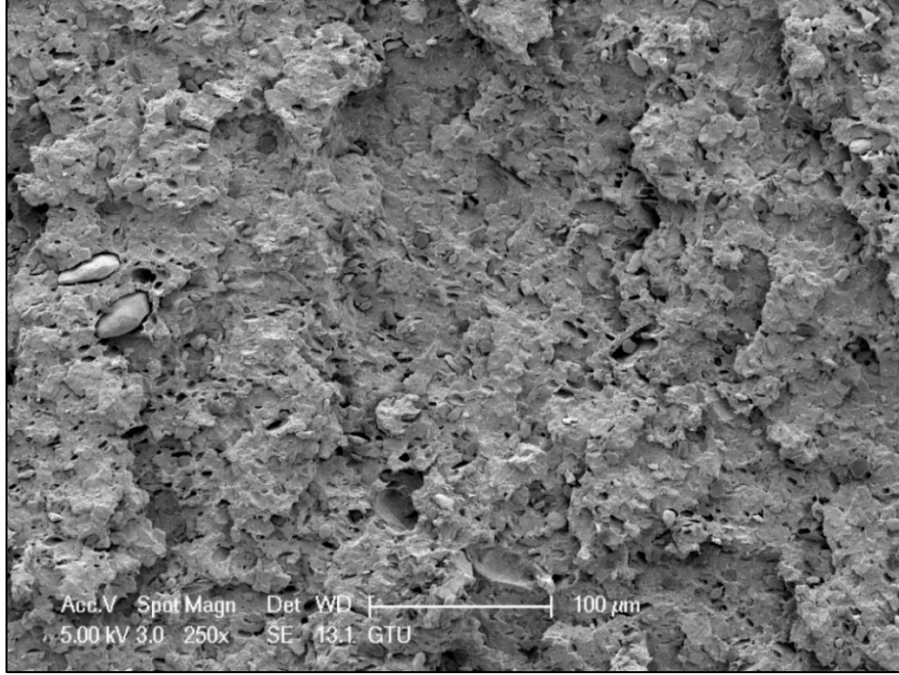
Fatih Gökğöz, İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden 1998'de mezun olmuştur. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Mühendisliği bölümünde 1999'da yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Daha önce MONE Medikal, PİRAMİT Medikal ve Şato Vakum Plastik gibi firmalarda kurucu ortak pozisyonlarında bulunan Fatih Gökğöz, tasarım, mühendislik, üretim ve satış süreçlerini yönetmiş ve birçok başarılı projeye imza atmıştır. Uluslararası ISO 9001:2015 baş denetçi belgesine sahiptir ve Türk Standartları Enstitüsü belgelendirme komisyon üyeliği yapmıştır. Halen POLIMOT Lineer Hareket Sistemleri ve Mekatronik San.Tic.Ltd.Şti.' de genel müdür ve kurucu ortak olarak görev yapmaktadır. Fatih Gökğöz, Türkiye'de ilk olarak üretilen yerli ve milli elektrikli lineer aktüatörler ve hidrolik sistemlerin geliştirilmesinde çalışmalarına devam etmektedir.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

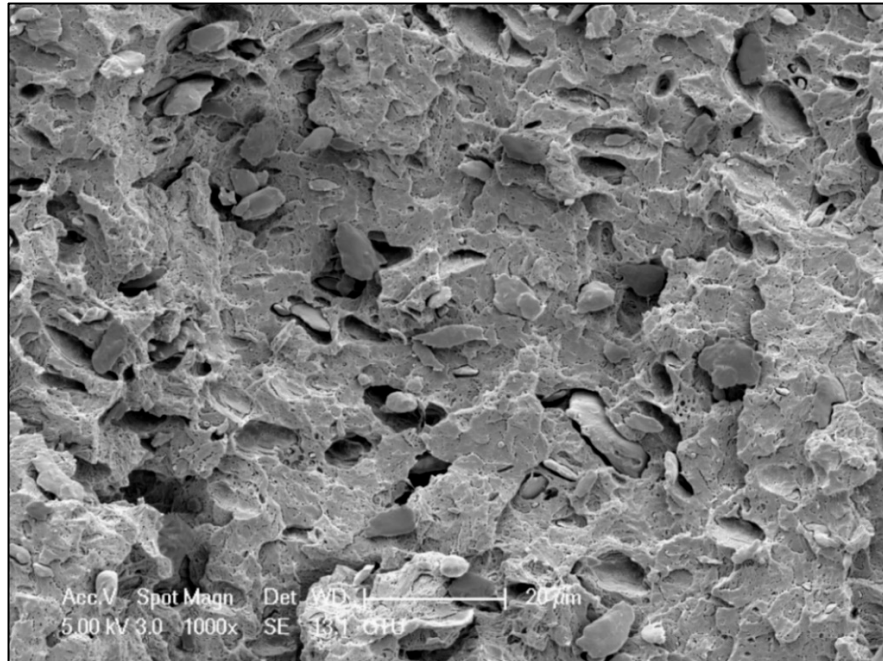
Fatih Gökgöz, Merve Mocan “Development of self-lubricating polymer blends based on POM-PTFE with nano and micro additives” Poster sunum, 14. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu 24-25 Mayıs, 2024, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye.

EKLER

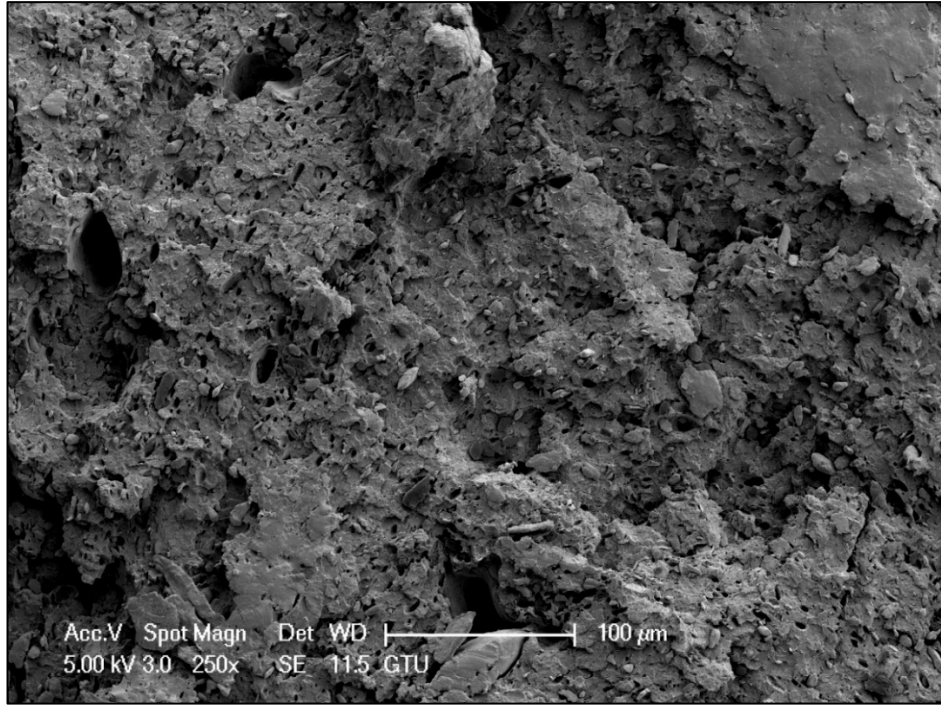
Ek-A: Mikro Yapılar



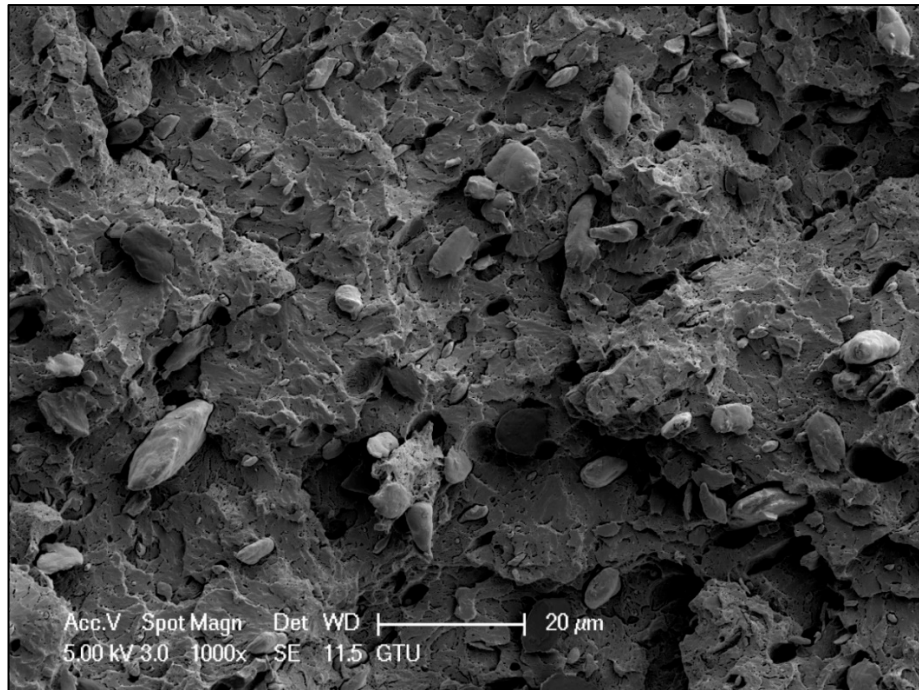
Şekil A.1: POM%90-PTFE%10 SEM 250X.



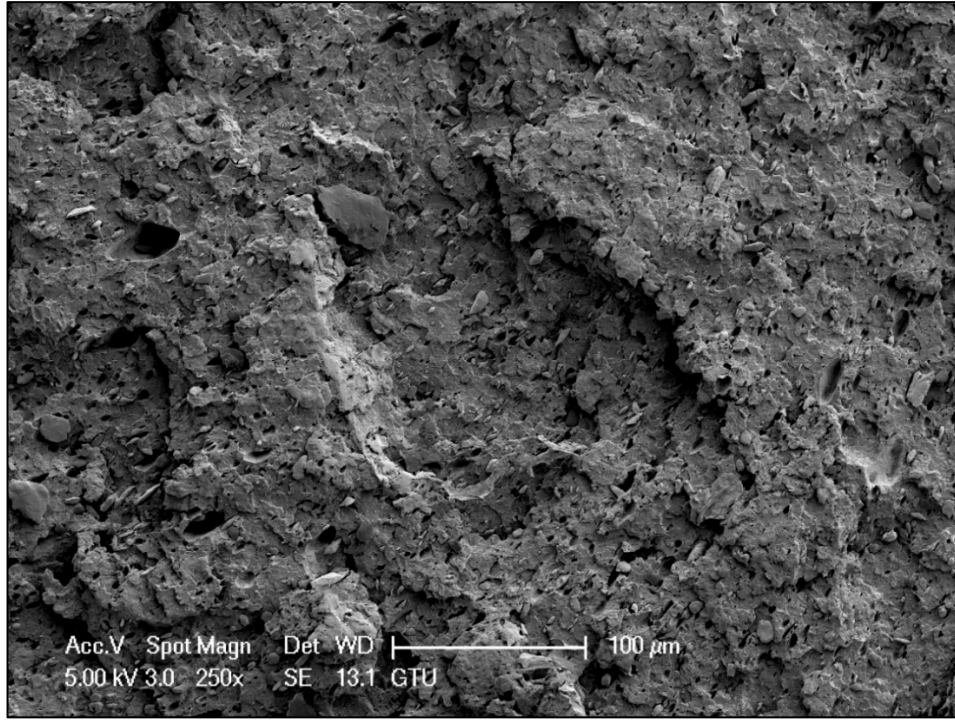
Şekil A.2: POM%90-PTFE%10 SEM 1000X.



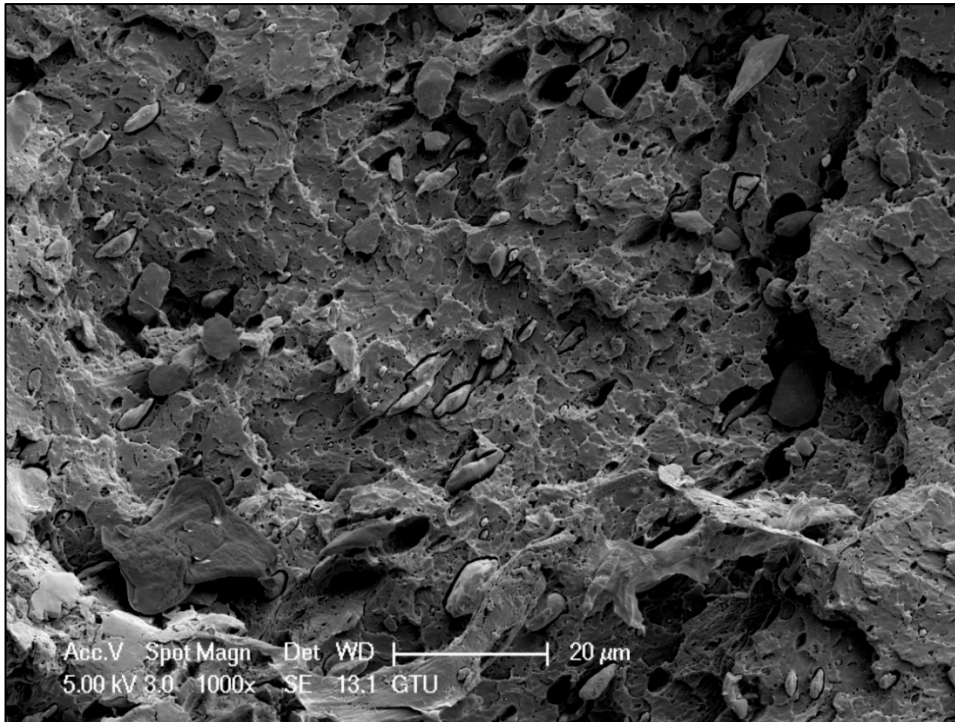
Şekil A.3: POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5 SEM 250X.



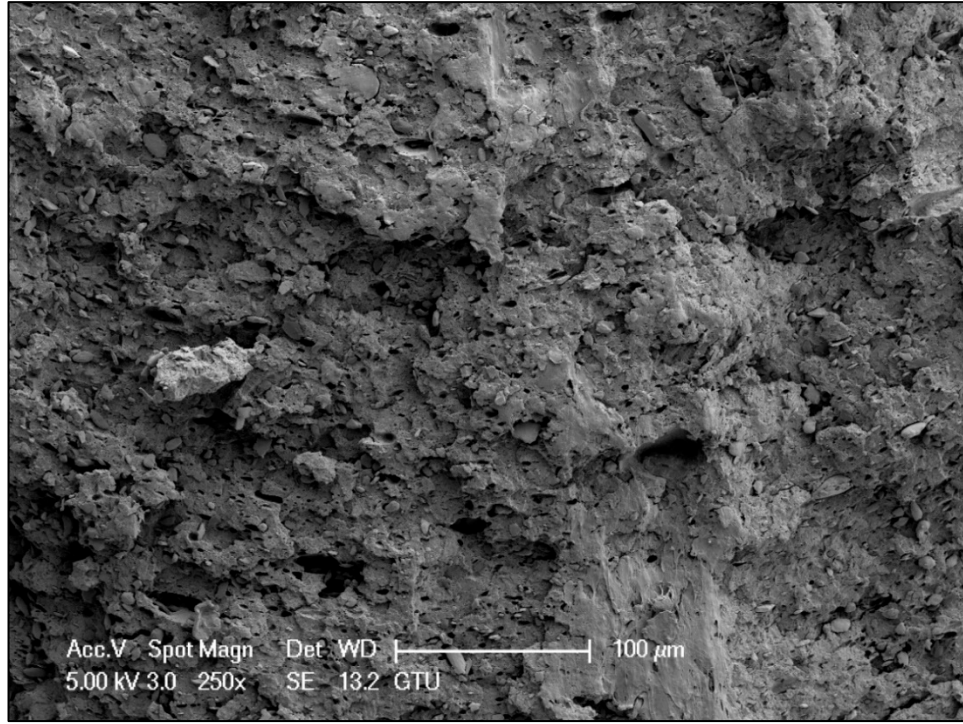
Şekil A.4: POM %89,5-PTFE%10-CNT%0,5 SEM 000X.



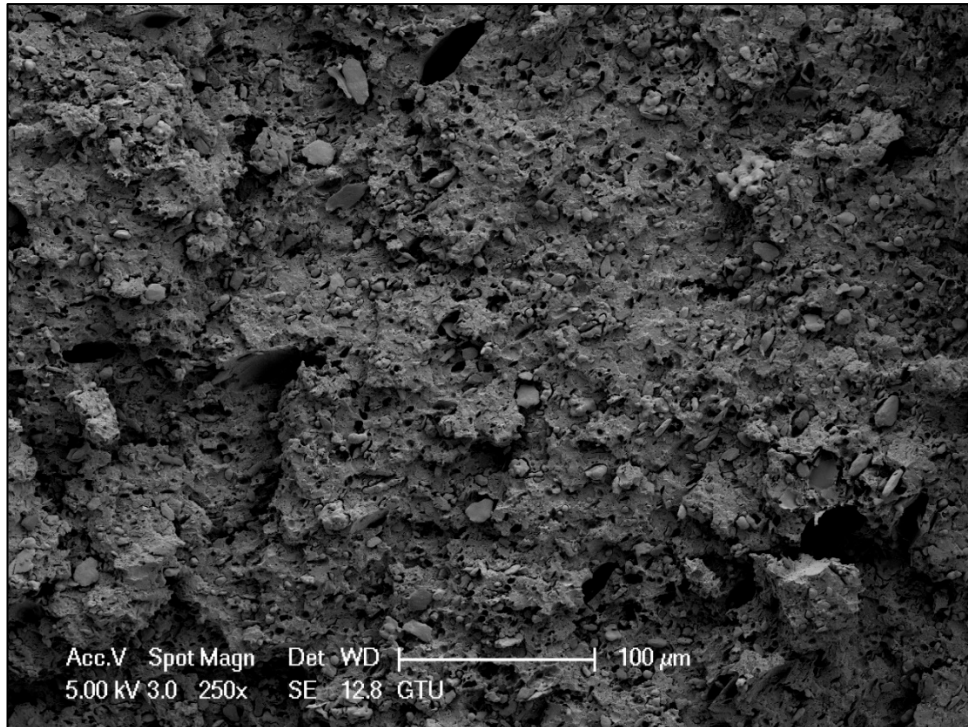
Şekil A.5: POM%89-PTFE%10-CNT%1 SEM 250X.



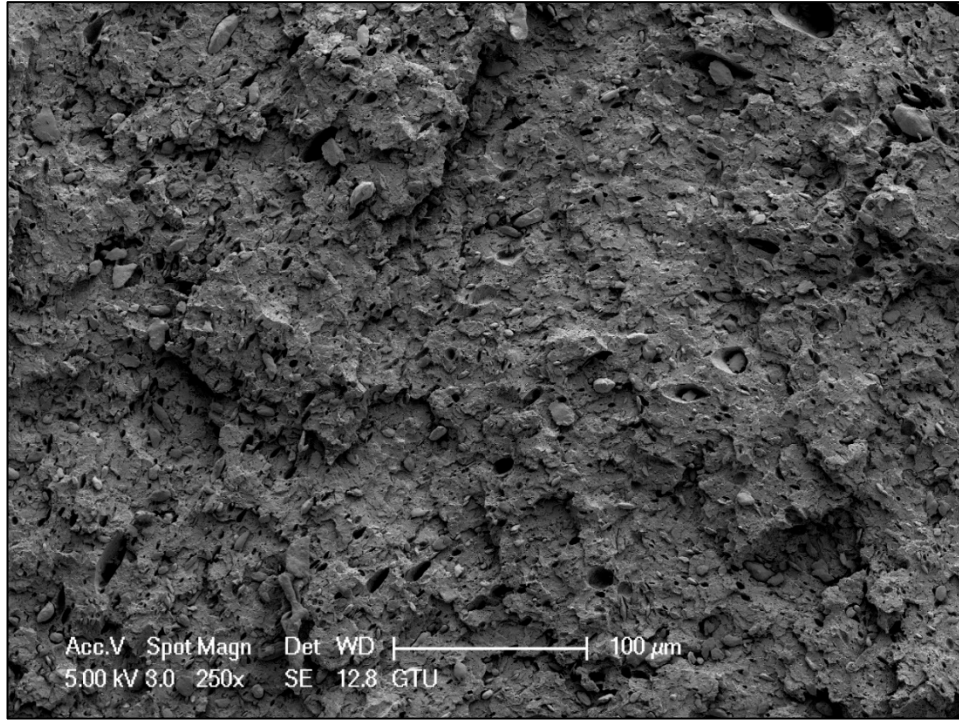
Şekil A.6: POM%89-PTFE%10-CNT%1 SEM 1000X.



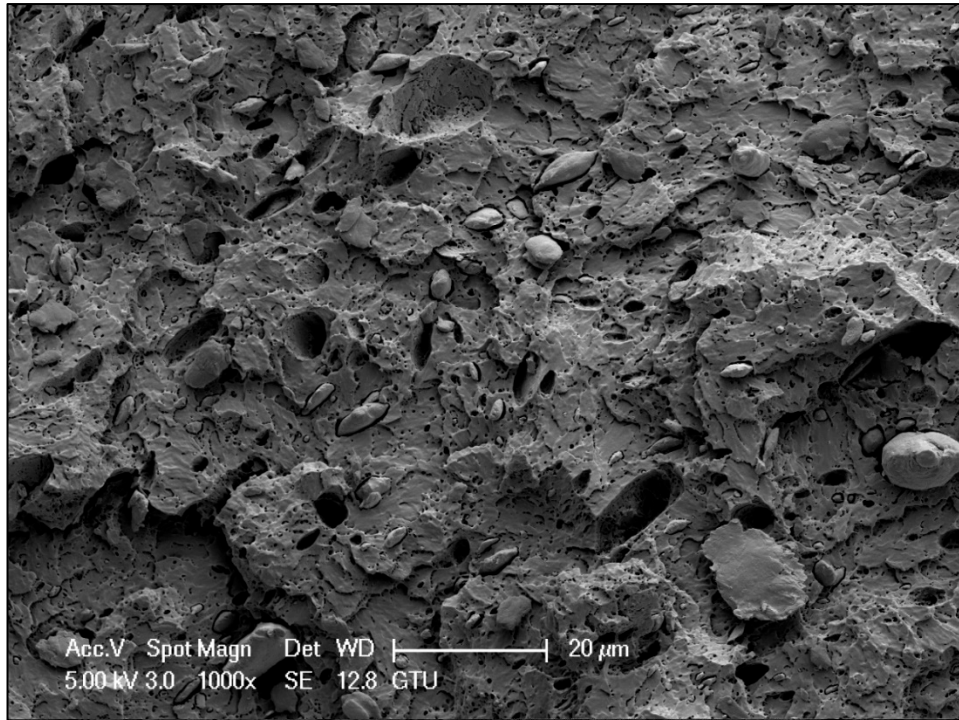
Şekil A.7: POM%88-PTFE%10-MoS₂%2 SEM 250X.



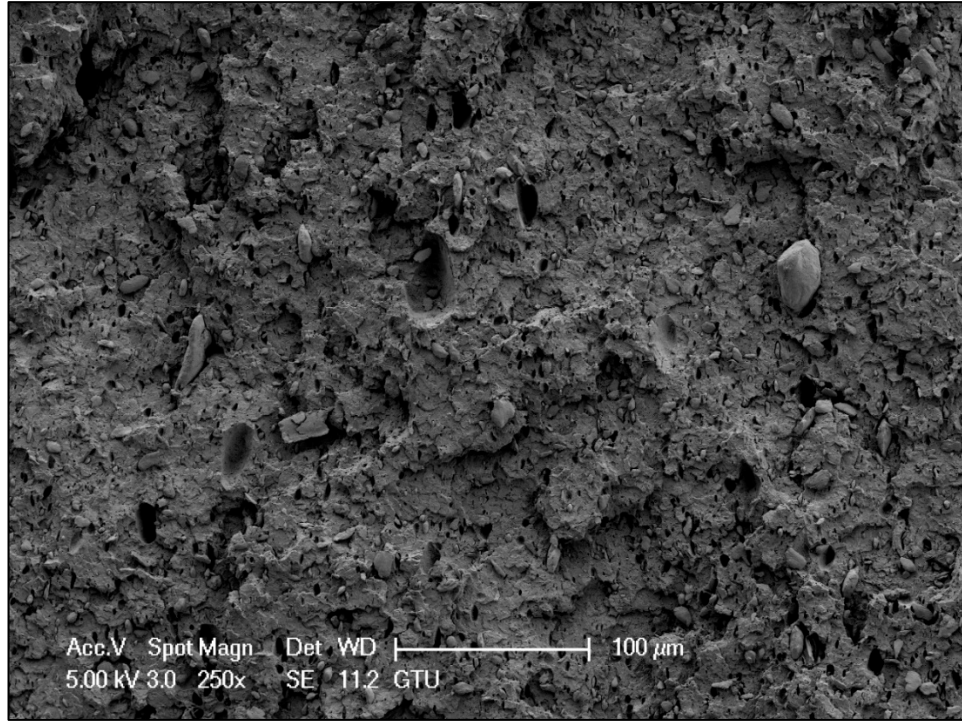
Şekil A.8: POM%89-PTFE%10-MoS₂%1 SEM 250X.



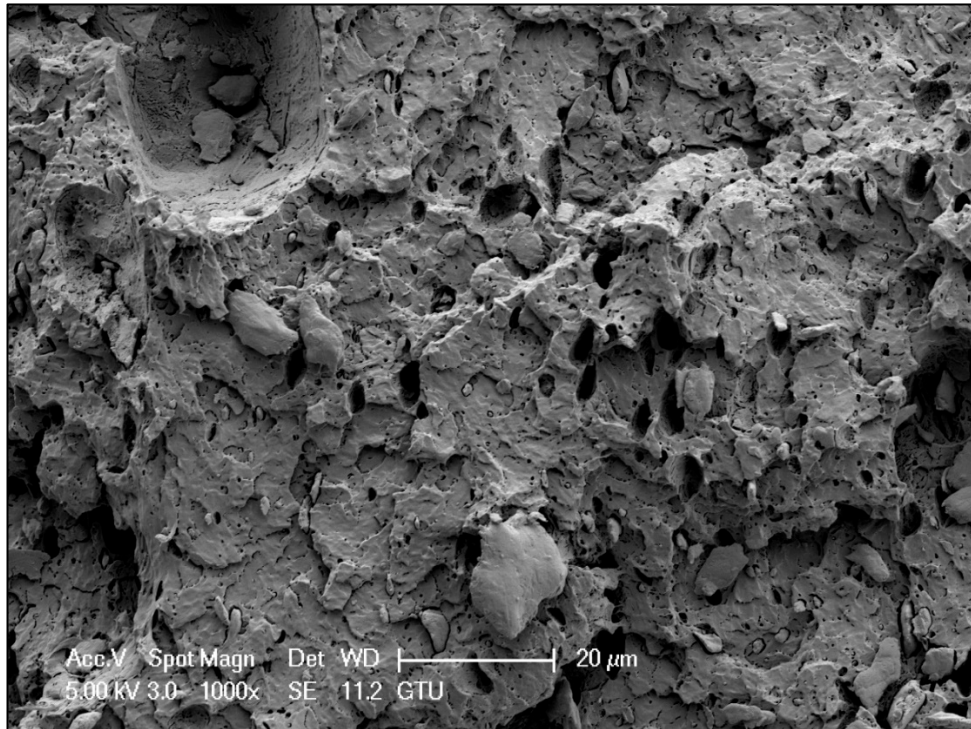
Şekil A.9: POM %89,5-PTFE%10-TiO₂%0,5 SEM 250X.



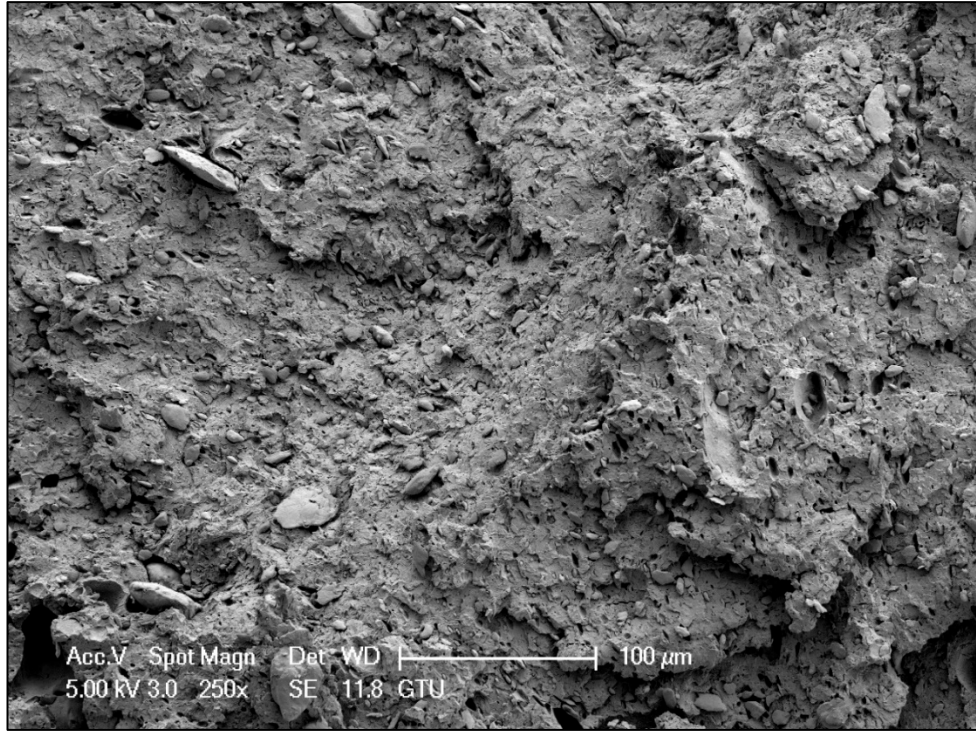
Şekil A.10: POM %89,5-PTFE%10-TiO₂%0,5 SEM 1000X.



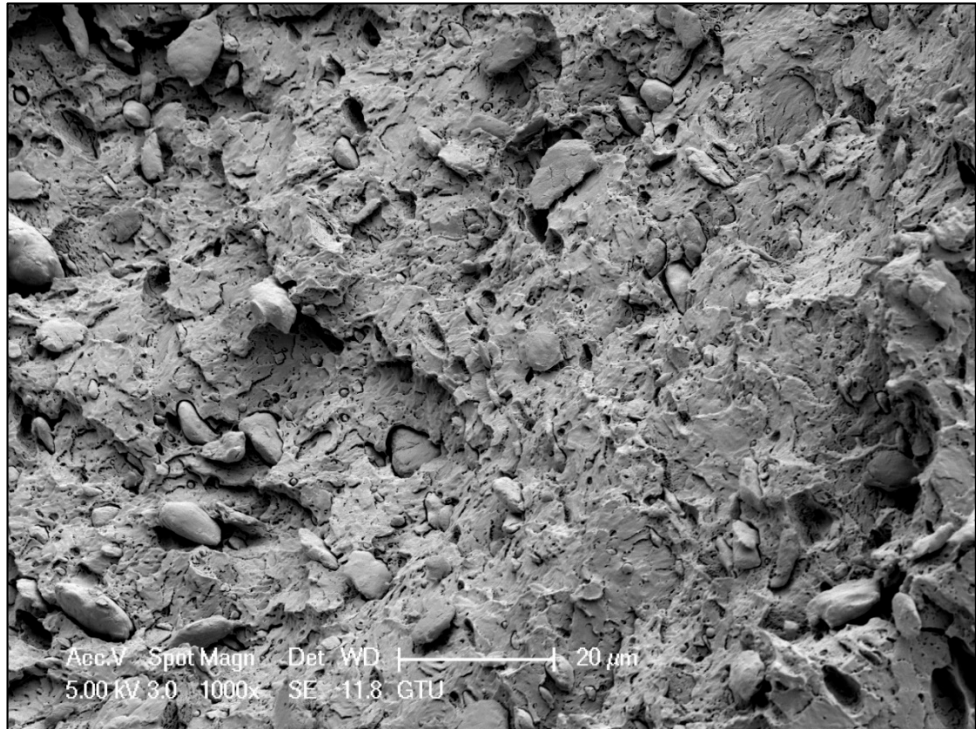
Şekil A.11: POM%89-PTFE%10-TiO₂%1 SEM 250X.



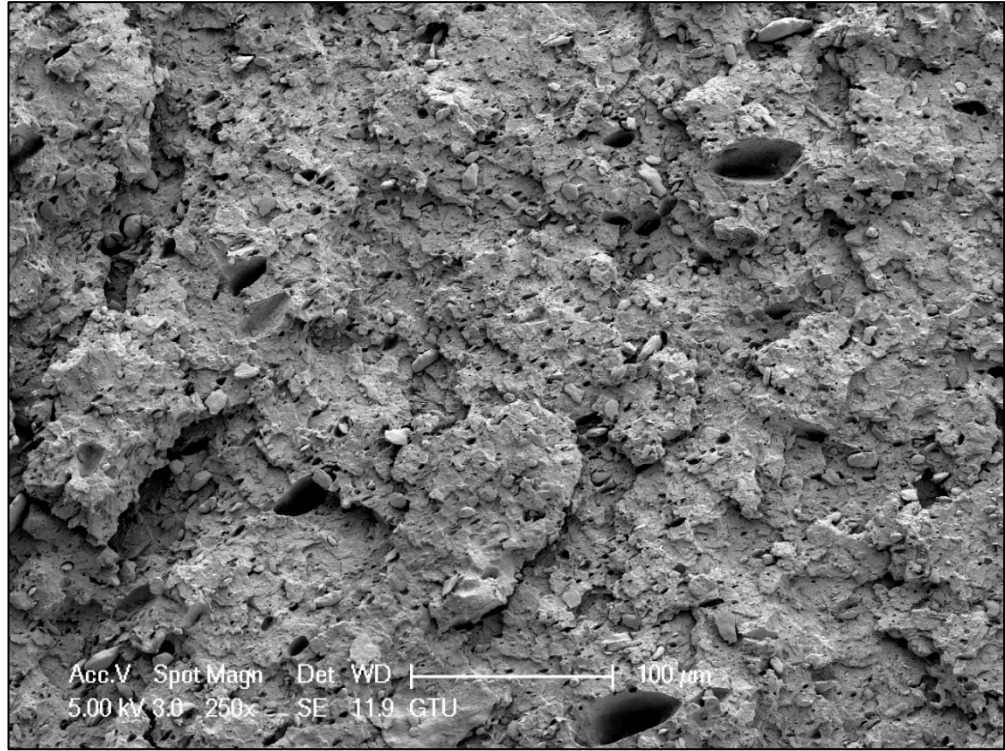
Şekil A.12: POM%89-PTFE%10-TiO₂%1 SEM 1000X



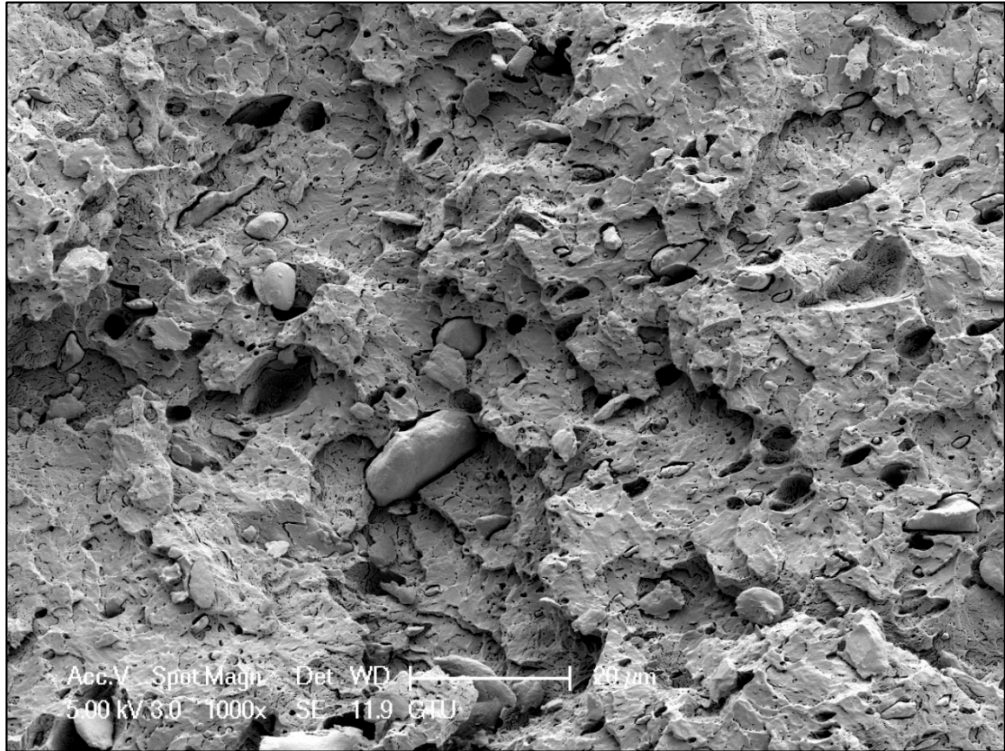
Şekil A.13: POM %89,5-PTFE%10-ZrO₂%0,5 SEM 250X.



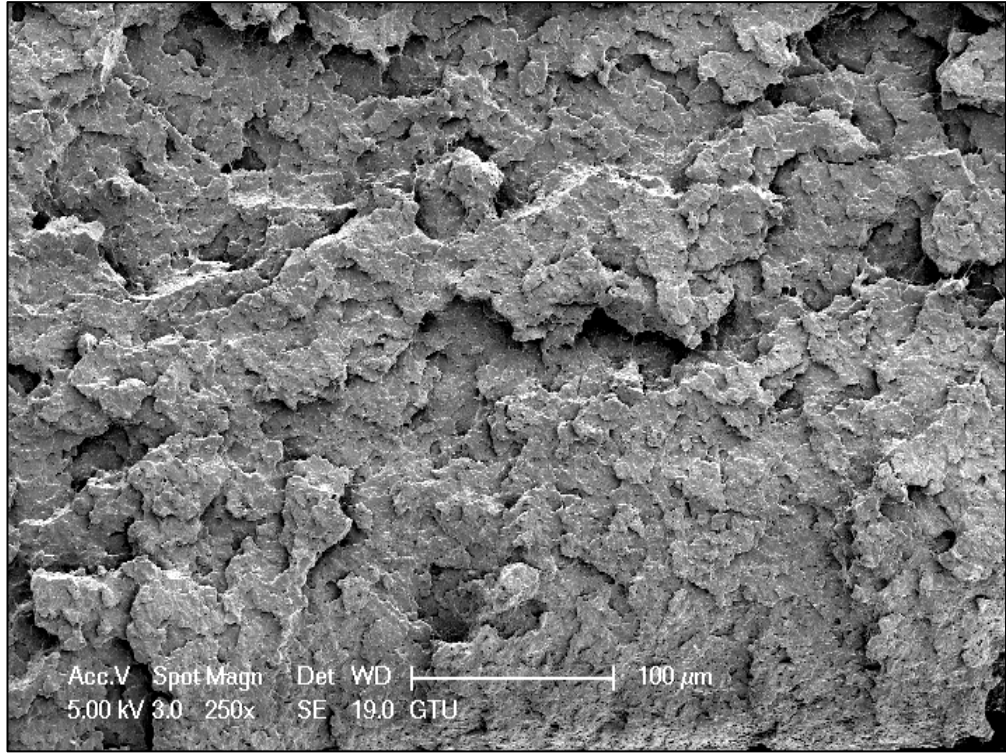
Şekil A.14: POM %89,5-PTFE%10-ZrO₂%0,5 SEM 1000X.



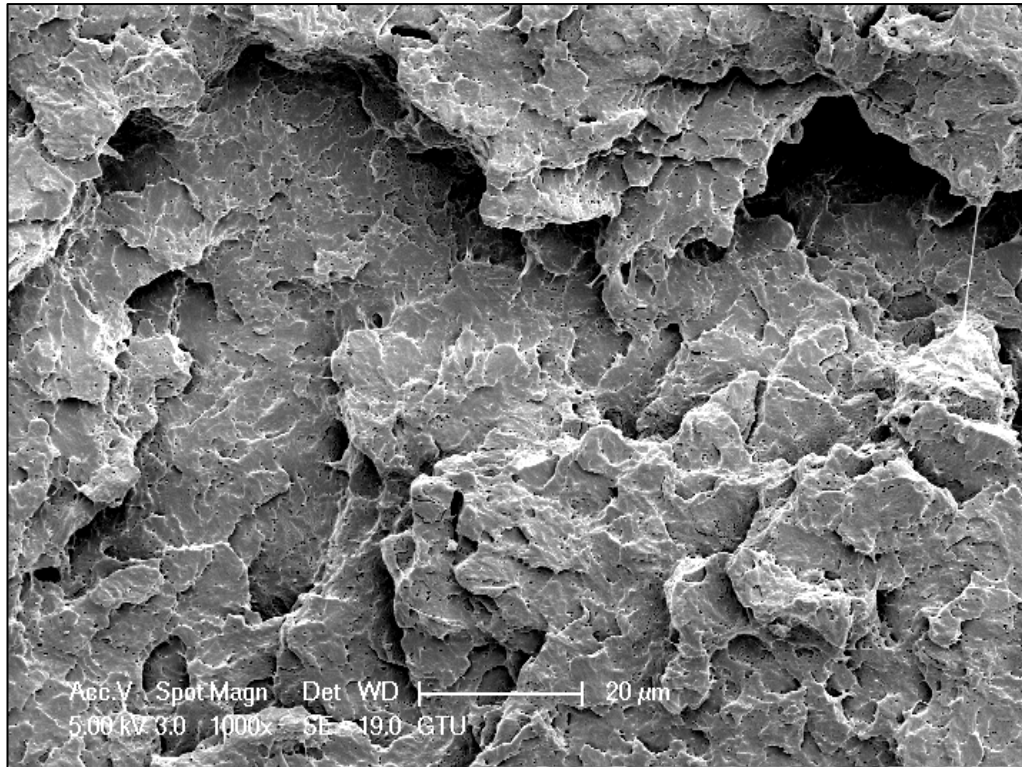
Şekil A.15: POM%89-PTFE%10-ZrO₂%1 SEM 250X.



Şekil A.16: POM%89-PTFE%10-ZrO₂%1 SEM 1000X.



Şekil A.17: POM %100 SEM 250X.



Şekil A.18: POM %100 SEM 1000X