**T.C.**
**SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

# FLOROKARBON/KARBON SİYAHI KAUÇUK KOMPOZİTİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE PTFE KATKISININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Atilla Osman ÖZDEMİR**

| | | |
|---|---|---|
| **Enstitü Anabilim Dalı** | **:** | **METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ** |
| **Tez Danışmanı** | **:** | **Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL** |

**Aralık 2019**

**T.C.**
**SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

# FLOROKARBON/KARBON SİYAHI KAUÇUK KOMPOZİTİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE PTFE KATKISININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Atilla Osman ÖZDEMİR**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 27/12/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliğ ile kabul edilmiştir.**

| | | |
|---|---|---|
| **Prof. Dr.** | **Prof. Dr.** | **Prof. Dr.** |
| **Hüseyin ÜNAL** | **Fehim FINDIK** | **Ahmet ÖZEL** |
| **Jüri Başkanı** | **Üye** | **Üye** |

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Atilla Osman ÖZDEMİR

11/12/2019

# TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin Ünal'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar, deney, malzeme, maddi desteği ve yardımlarını esirgemeyen SKT Yedek Parça ve Makine Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**TEŞEKKÜR** ..... **i**
**İÇİNDEKİLER** ..... **ii**
**KISALTMALAR LİSTESİ** ..... **iv**
**SİMGELER LİSTESİ** ..... **v**
**ŞEKİLLER LİSTESİ** ..... **vi**
**TABLOLAR LİSTESİ** ..... **viii**
**ÖZET** ..... **ix**
**SUMMARY** ..... **x**

**BÖLÜM 1.**
**GİRİŞ** ..... **1**
1.1. Elastomerler ..... 1
1.2. Kauçuk Kavramı ..... 2
1.2.1. Kauçuk karışımı ..... 2
1.2.2. Kauçuk çeşitleri ..... 2
1.2.2.1. Doğal kauçuklar (NR) ..... 2
1.2.2.2. Stiren – butadien kauçuklar (SBR) ..... 3
1.2.2.3. Akrilonitril – bütadien kauçuğu (NBR) ..... 3
1.2.2.4. Etilen-propilen dien monomer kauçuğu (EPDM) ..... 3
1.2.2.5. Fluoro elastomer kauçuğu (FKM) ..... 4
1.3. Dolgu Maddeleri ..... 4
1.3.1. Karbon siyahları ..... 4
1.4. Yumuşatıcılar ..... 5
1.5. Aktivatörler ..... 5
1.6. Hızlandırıcılar ..... 5
1.7. Vulkanizasyon ..... 6
1.7.1. Vulkanizasyon teknikleri ..... 7
1.7.1.1. Basınçlı vulkanizasyon yöntemi ..... 7
1.7.1.2. Enjeksiyon ile vulkanizasyon yöntemi ..... 8
1.7.1.3. Transfer kalıp ile vulkanizasyon yöntemi ..... 8
1.8. Poli-Tetra-Flor-Etilen (PTFE) ..... 9

**BÖLÜM 2.**
**KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **10**

**BÖLÜM 3.**
**MATERYAL VE METOT ..... 21**
3.1. Malzemeler ..... 21
3.1.1. Kullanılan kimyasallar ..... 21
3.1.2. Kullanılan cihazlar ..... 22
3.2. Metod ..... 28
3.2.1. Yarı mamül hazırlanması ..... 28
3.2.2. Yarı mamül aşamasında yapılan testler ..... 29
3.2.2.1. Rheometre testi ..... 29
3.2.3. Test plakalarının hazırlanması ..... 30
3.2.4. Mamül aşamasında yapılan testler ..... 33
3.2.4.1. Yoğunluk testi ..... 33
3.2.4.2. Sertlik testi ..... 34
3.2.5. Çekme-kopma deneyi ..... 35
3.2.6. Yırtılma deneyi ..... 35
3.2.7. Triboloji deneyi ..... 36

**BÖLÜM 4.**
**DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 38**
4.1. Yarı Mamül Aşamasında Yapılan Test Sonuçları ..... 38
4.1.1. Rheometre test sonuçları ..... 38
4.2. Mamul Aşamasında Yapılan Test Sonuçları ..... 42
4.2.1. Fiziksel testler ..... 42
4.2.1.1. Yoğunluk testi ..... 42
4.2.1.2. Sertlik testi ..... 43
4.2.2. Mekanik testler ..... 44
4.2.2.1. Çekme testi ..... 44
4.2.2.2. Yırtılma testi ..... 48
4.2.3. Triboloji testleri ..... 50
4.2.3.1. Deney malzemelerinin sürtünme katsayısı (CoF) değeri ile ptfe katkı miktarı ilişkisi ..... 51
4.2.3.2. Deney malzemelerinin maksimum sürtünme yüzey sıcaklık değeri ile PTFE katkı miktarı ilişkisi ..... 53
4.2.3.3. Deney malzemelerinin spesifik aşınma oranı ile PTFE katkı miktarı ilişkisi ..... 56
4.2.3.4. Deney Malzemelerinin Aşınma Sonucu Optik Yüzey Görüntüleri ..... 59

**BÖLÜM 5.**
**SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 64**

**KAYNAKLAR ..... 67**
**EKLER ..... 69**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 77**

# KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|---|---|
| FKM | : Fluoro Elastomer Kauçuk |
| EPDM | : Etilen-Propilen Dien Monomer Kauçuğu |
| NBR | : Akrilonitril – Bütadien Kauçuğu |
| SBR | : Stiren – Butadien Kauçuklar |
| NR | : Doğal Kauçuk |
| PTFE | : Politetrafloroetilen |
| COF | : Sürtünme Katsayısı |
| CB | : Karbn Siyahı |
| ENB | : Ethylidene norbornene |
| CR | : Neopren Kauçuk |

## SİMGELER LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $\sigma$ | : Gerilme |
| $\Lambda$ | : Gerinme |
| μm | : Mikrometre |
| g | : Gram |
| $\rho$ | : Yoğunluk |
| F | : Kuvvet |
| N | : Newton |
| phr | : Parts per hundred |
| Lbf | : Pound kuvvet |
| in | : Inch |

# ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Elastomerler için Gerilme- Gerinme grafiği. [Hertz] ..... 1
Şekil 1.2: Vulkanizasyonda eğrisi. [Kruželák] ..... 6
Şekil 1.3: Çapraz bağ yoğunluğu ile değişen fiziksel özellikler [Kruželák] ..... 7
Şekil 1.4: Kompresyon-Basınçlı Vulkanizasyon Presi Şematik Gösterimi ..... 8
Şekil 1.5: Enjeksiyon Presleme Sistemi [Ismail] ..... 9
Şekil 3.1: Laboratuvar tipi açık karıştırıcıda karışımın hazırlanması. ..... 22
Şekil 3.2: Disk ve plakaların basıdığı hidrolik vulkanizasyon presi. ..... 23
Şekil 3.3: Hazırlanan test plakalarının postcure işlemine alındığı Vötsch VTL marka fırın. ..... 23
Şekil 3.4: Rheometre testlerinin yapıldığı rheometre test cihazı. ..... 24
Şekil 3.5: Shore A cinsinden ölçüm yapan Zwick marka test cihazı. ..... 25
Şekil 3.6: Özgül ağırlık (yoğunluk) testlerinin yapıldığı yoğunluk ölçüm cihazı. ..... 25
Şekil 3.7: Çekme-kopma testlerinin yapıldığı çekme testi cihazı. ..... 26
Şekil 3.8: Triboloji testlerinin yapıldığı Tribometre test cihazı. ..... 27
Şekil 3.9: Zeiss SmartZoom 5 marka optik mikroskop görüntüsü. ..... 27
Şekil 3.10: Laboratuvar tipi açık karıştırıcıda pişiricilerin ilave edilmesi. ..... 28
Şekil 3.11: Rheometre testlerinin yapıldığı rheometre test cihazı. ..... 29
Şekil 3.12: Şekil 3.12: Disk ve plakaların basıdığı hidrolik vulkanizasyon presi. ..... 30
Şekil 3.13: ASTM D 2240 standardına uygun olarak hazırlanan sertlik diskleri. ..... 31
Şekil 3.14: Triboloji test numuneleri. ..... 31
Şekil 3.15: Hazırlanan test plakalarının postcure işlemine alınması. ..... 32
Şekil 3.16: ASTM D412DieC standardına uygun, çekme testi için kaşık şeklince numuneler hazırlanmıştır. ..... 32
Şekil 3.17: ASTM D624 Type B standardına uygun yırtılma test numuneleri. ..... 33
Şekil 3.18: Deneylerde kullanılan yoğunluk ölçüm cihazı. ..... 34
Şekil 3.19: Shore A cinsinden ölçüm yapan Zwick marka test cihazı. ..... 34
Şekil 3.20: Çekme-kopma testlerinin yapıldığı çekme testi cihazı. ..... 35
Şekil 3.21: Triboloji testlerinin yapıldığı Tribometre test cihazı. ..... 36
Şekil 3.22: Tribometre test cihazı şematik görünümü. ..... 37
Şekil 4.1: Deneylerde kullanılan malzemelerin reometre eğrisi a)FKM b)FKM+10phr PTFE, c)FKM+20phr PTFE d)FKM+30phr PTFE e)FKM+40phr PTFE ..... 39
Şekil 4.2: FKM kauçuk malzemesinin PTFE katkı miktarı- MLve MH değeri ilişkisi. ..... 40
Şekil 4.3: FKM kauçuk malzemeye PTFE katkısının $ts_2$, $t_{90}$ ve $t_{95}$ değerine etkisi. ..... 41
Şekil 4.4: FKM kauçuk malzemeye PTFE katkısının sertlik ve yoğunluk değerine etkisi. ..... 43
Şekil 4.5: Deneylerde kullanılan malzemelerin gerilme genleme ilişkisi a)FKM b)FKM+10phr PTFE, c)FKM+20phr PTFE d)FKM+30phr PTFE e)FKM+40phr PTFE ..... 45
Şekil 4.6: FKM kauçuk malzemeye PTFE katkının Çekme mukavemetine etkisi ..... 46

Şekil 4.7: FKM kauçuk malzemeye PTFE katkının %100 ve %5 uzamadaki elbastik modülü değerine etkisi. ..... 47
Şekil 4.8: Deneylerde kullanılan malzemelerin Yırtılma mukavemeti-genleme ilişkisi a)FKM b)FKM+10phr PTFE c)FKM+20phr PTFE d)FKM+30phr PTFE e)FKM+40phr PTFE ..... 49
Şekil 4.9: FKM-CB kauçuk kompozitlerin PTFE katkı miktarı-yırtılma mukavemeti ilişkisi ..... 50
Şekil 4.10: FKM-CB kauçuk kompozit malzemesinin PTFE katkısına bağlı olarak 15 N yük altındaki ve farklı hızlardaki sürtünme katsayısı ilişkisi. ..... 52
Şekil 4.11: FKM-CB kauçuk kompozit malzemesinin PTFE katkısına bağlı olarak 30 N yük altındaki ve farklı hızlardaki sürtünme katsayısı ilişkisi. ..... 53
Şekil 4.12: FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 15 N yük altındaki ve farklı hızlardaki maksimum yüzey sıcaklık değerleri..... 55
Şekil 4.13: FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 30 N yük altındaki ve farklı hızlardaki maksimum yüzey sıcaklık değerleri..... 56
Şekil 4.14: FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin PTFE katkısının farklı hızlardaki ve 15 N yük altındaki spesifik aşınma oranı değerlerinin değişimi. ..... 57
Şekil 4.15: FKM-CB kauçuk kompozit malzemesine PTFE ilavesine bağlı olarak 30 N yük altında ve farklı hızlardaki spesifik aşınma oranının değişimi. ..... 59
Şekil 4.16: 500 dev/dak ve 15 N yük altında yapılan triboloji testleri sonucunda deney numunelerinin aşınma yüzey mikroyapı görüntüleri (34x büyütme ile) ..... 60
Şekil 4.17: 500 dev/dak hızda ve 30N yük altında yapılan tribolojik testler sonucunda numunelerde oluşan aşınma yüzey mikroyapı görüntüleri (34x büyütme ile). ..... 61
Şekil 4.18: 1000 dev/dak hızda ve 15N yük altında yapılan triboloji testleri sonucunda alınan numune aşınma yüzeyleri mikroyapı görüntüleri (34x büyütme ile) .. 62
Şekil 4.19: 1000 dev/dak hızda ve 30N yük altında yapılan triboloji testleri sonucunda alınan numune aşınma yüzeyleri mikroyapı görüntüleri (34x büyütme ile) .. 63

# TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1: Deneylerde kullanılan FKM kauçuk malzemesi ticari ve teknik bilgileri ..... 21
Tablo 3.2: Deneylerde kullanılan PTFE malzemesi ticari ve teknik bilgileri. ..... 21
Tablo 3.3: Deneylerde kullanılan Karbon siyahını katkının ticari ve teknik bilgileri. ... 21
Tablo 3.4: Deneyler için hazırlanan kompozit malzeme karışım oranları. ..... 28
Tablo 4.1: ASTM D5289 standardına göre yapılan Rheometre deneyi sonuçları. ..... 38
Tablo 4.2: ISO 2781'e göre yapılan Yoğunluk testi sonuçları. ..... 42
Tablo 4.3: Deney numunelerinin çekme-kopma ve yırtılma deneyi sonuçları. ..... 44
Tablo 4.4: Triboloji deney koşulları. ..... 51
Tablo 4.5: Farklı test hızlarında ve 15 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri. ..... 51
Tablo 4.6: Farklı test hızlarında ve 30 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri. ..... 52
Tablo 4.7: Farklı test hızlarında ve 15 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen maksimum sürtünme sıcaklık değerleri ($^{o}$C). ..... 54
Tablo 4.8: Farklı test hızlarında ve 30 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen maksimum yüzey sürtünme sıcaklık değerleri ($^{o}$C). ..... 55
Tablo 4.9: FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 15N yük altında ve farklı kayma hızlarındaki spesifik aşınma oranı değerleri ($mm^3$/N.m ($10^5$)). ..... 57
Tablo 4.10: Farklı test hızlarında ve 30 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen aşınma miktarı değerleri ($mm^3$/N.m ($10^5$)). ..... 58

# FLOROKARBON/KARBON SİYAHI KAUÇUK KOMPOZİTİNİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE PTFE KATKISININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklıklara dayanıklı karbon siyahı katkılı florokarbon kauçuk kompoziti (FKM-CB) ve karbon siyahı ile 5, 10, 20, 30 ve 40 phr birim poli-tetra-flor-etilen (PTFE) katkılı florokarbon kauçuk karışımı kompozitin (FKM-PTFE-CB) fiziksel, mekanik, reolojik, tribolojik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Hamur karışımı laboratuvar tipi bir açık karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan hamurlardan 2 mm kalınlığında levha üretimi ve sertlik disklerini üretmek için hidrolik vulkanizasyon presi kullanılmıştır. Hazırlanan plakalar ve sertlik diskleri 15 saat süre ile post-cure işlemine tabi tutulmuştur. Plakalardan standartlara uygun kalıplar kullanılarak çekme ve yırtılma test numuneleri kesilmiştir. Fiziksel özellikler için kauçuk kompozit malzemelerin yoğunluk testleri belirlenirken mekanik özelliklerden malzemelerin çekme mukavemeti, elastiklik modülü, kopmadaki % uzama değerleri, yırtılma mukavemeti ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Reolojik özelliklerde, kauçuk malzemelerin vulkanizasyon özellikleri tespit edilmiştir. Tribolojik deneylerde ise malzemelerin sürtünme katsayısı ile aşınma hacmi değerleri tespit edilmiştir. Tribolojik deneyler, 15 ve 30N yükler altında 500 ve 1000 dev/dk. hızlarda kuru ortam şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, FKM-CB kompozitine 20 phr miktarında PTFE ilavesi ile elde edilen kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı, kauçuk sürtünme yüzey sıcaklıkları, MH ve t90 değerleri azalırken, yoğunluk, sertlik, yırtılma mukavemeti, % uzama, %5 uzamadaki Elastiklik modülü değerlerinde artış gözlenmiştir. %100 uzamadaki elastiklik modülü ve ts2 değerlerinde dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Kauçuk kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri ise optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: FKM, kauçuk, PTFE, mekanik, triboloji, reoloji

# THE EFFECT OF PTFE CONTENT ON THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF FLUOROCARBON/CARBON BLACK RUBBER COMPOSITES

## SUMMARY

In this thesis, the physical, mechanical, rheological, tribological and microstructural properties of different amount of (5, 10, 20, 30 and 40 phr unit) poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE) filled high temperature resistant fluorocarbon rubber composite with carbon black (FKM-CB-PTFE) were investigated. The dough mixture was prepared using a laboratory type open mixer. Hydraulic vulcanization press was used to produce hardness discs and 2 mm thick plates from prepared doughs. The prepared plates and hardness discs were post-cured for 15 hours in an oven. Tensile and tear test specimens were cut from plates using standard moulds. Tensile strength, elasticity modulus, % elongation values, tear strength and hardness values of test materials were determined from mechanical properties. In rheological properties, vulcanization properties of rubber materials were determined. In tribological experiments, friction coefficient and abrasion volume values of the materials were determined. Tribological experiments were performed at 500 and 1000 dev/dak under 15 and 30N loads at ambient temperatures and at room temperature.

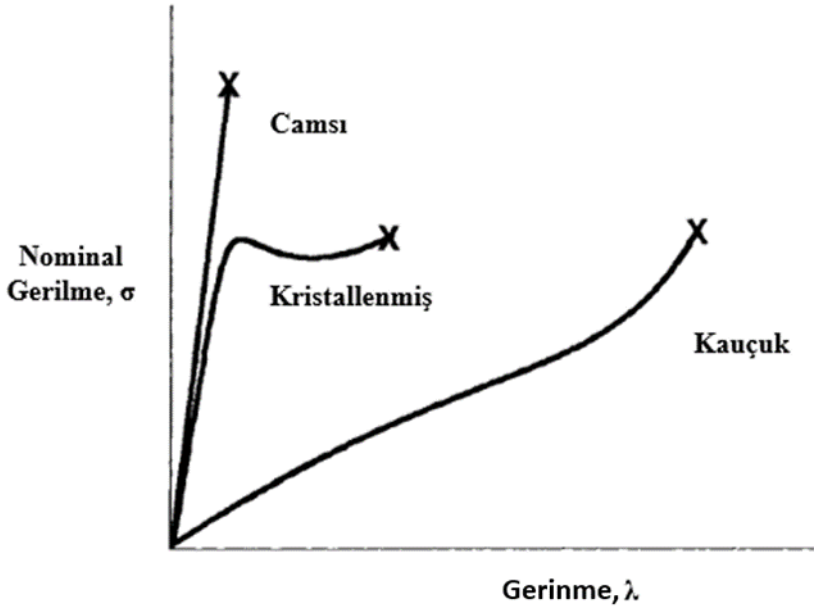
As a result of the experiments, 20 phr addition of PTFE to FKM-CB composite decreased tensile strength, friction coefficient and specific wear rate, rubber friction surface temperatures, MH and t90 values while density, hardness, tear strength, elastic modulus at 5% elongation values were observed. No significant changes were observed in the modulus of elasticity at 100% elongation and ts2 values. Microstructure investigations of rubber composite materials were examined by optical microscope and scanning electron microscope.

Key words: FKM, rubber, PTFE, mechanical, tribology, rheology

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Elastomerler

Elastomerler; polimerizasyon yoluyla uzun zincirli molekül oluştururlar. Bu moleküller şekilsiz, camsı veya kristal fazla düzenlenebilirler. Tipik olarak rastgele bir düzenlemeye sahip amorf yapıya sahip polimerlerdir. Düzgün bir şekilde bileşik haline getirilip bir mühendislik ürünü haline getirildikten sonra, bir noktadaki malzeme bir dış kuvvete maruz kalır. Bu dış kuvvet etkisi ile katı fazdaki malzeme deforme olmaktadır. Gerilme denilen bir iç reaktif kuvvet, bu deformasyona direnme eğilimindedir. Deformasyonun ölçüsü, gerinme olarak adlandırılır. Şekil 1.1.'de elastomerlerin 3 farklı fiziksel durumunu göstermektedir. (Hertz, 2001, s.3)




Şekil 1.1: Elastomerler için Gerilme- Gerinme grafiği. [Hertz]

## 1.2. Kauçuk Kavramı

Kauçuk; çapraz bağlanabilme yeteneğine sahip ve vulkanizasyon ile istenilen özelliklerde ürün haline gelebilen polimerlerdir. Genel tanımı ise; "Oda sıcaklığında orjinal boyutunun en az iki misline uzatilabilen ve bu uzamayı sağlayan kuvvet kaldırıldığında nerdeyse orjinal haline dönebilen polimerik malzemelere elastomer denir". Yüksek basınç ve sıcaklık altında viskozitesi yüksek akışkan bir faz haline geldiği için, kolayca şekillendirilebilirler.

Geniş kullanım alanı olan kauçuklar, başta otomotiv sektörü olmak üzere gıda, inşaat, tekstil gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kauçuklar elastik özellikleri ile malzeme seçiminde ön plana çıkmaktadırlar. Bu özellik sayesinde kauçuklar endüstrinin hemen hemen her alanında kullanım yeri bulmaktadırlar. Darbe, titreşim önleme, ses yalıtımı, sıvı iletimi, lastik ve sızdırmazlık gereksinimlerinde sıkça kullanılmaktadır.

### 1.2.1. Kauçuk karışımı

Kauçuğu oluşturan polimer tek başına üretime uygun değildir. Nihai üründen istenilen özelliklere göre, diğer malzemelerden belirli oranlarda vulkanize edilebilen karışım yapılmaktadır. Bu karışımın tasarımı esnasında istenilen özellikleri karşılamasının yanısıra, maliyet ve üretilebilirlik de esas alınmaktadır. Bu karışımı oluşturan tüm malzemeler belirli oranlarda kullanılmaktadır. Bu oranların oluşturduğu karışım ise reçete veya formül olarak adlandırılmaktadır.

### 1.2.2. Kauçuk çeşitleri

#### 1.2.2.1. Doğal kauçuklar (NR)

Doğal kauçuklar Hevea Brasilliensis adı verilen ağacın iç kabuğunda açılan yarıklardan akıtılarak toplanır ve belirli işlemlerden geçirildikten sonra da katılaştırılarak endüstride kullanılacak polimer haline getirtilir.

Doğal kauçuk yapısındaki özellikler dolayısıyla gerilme uygulandığında veya düşük sıcaklıklarda kristalleşme eğilimi gösterir. Gerilme gevşetildiğinde ve ısıtıldığında kristalleşme kalkar.

Doğal kauçuk çok iyi çekme dayanımı, elastisite, yırtılma dayanımı ve yorulma özelliğine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, dinamik uygulamalarda çok sık kullanılmaktadır. Doğal kauçuğun 2/3'ü araç lastiğinde kullanılmaktadır.

Fakat doğal kauçuğun özellikle ısı ve ozon yaşlanma dayanımı ve yağlara ve solventlere dayanımı kötüdür.

#### 1.2.2.2. Stiren – butadien kauçuklar (SBR)

SBR stiren ve bütadienin kopolimeridir ve üretimi en fazla yapılan sentetik kauçuktur. Çoğu zaman doğal kauçuğun yerine kullanılmaktadır. Doğal kauçuk ile kıyaslandığında ise; SBR kauçuk hazırlama süresi tabii kauçuğa göre daha kısadır. Aşınma ve ısıya karşı direnci, tabii kauçuktan daha iyidir. Bununla birlikte elastik özellikleri tabii kauçuktan daha zayıftır. Ozona ve atmosferik şartlara dayanıklıdır. Bu yüzden, araç lastiklerinin yol ile temas eden yüzeylerinde kullanılmaktadır.

#### 1.2.2.3. Akrilonitril – bütadien kauçuğu (NBR)

NBR, akrilonitril ile bütadiyenin kopolimerizasyonu ile elde edilmektedir. İçeriğinde nitril oranı değişimi ile, özelliklerinde değişim görülmektedir. Akrilonitril oranı arttıkça sertlik, pişme hızı ve yoğunluk artmaktadır. Ayrıca mekanik özelliklerde de iyileşme gözlemlenmektedir. Aşınma, yorulma, yaşlanma dayanımı iyi olmasına karşın yırtılma direnci doğal kauçuktan daha kötü ve elektrik yalıtımı daha düşüktür. Yağ ve yakıtlara dayanım gerektiren yerlerde kullanılılmaktadır. Örnek olarak; yakıt ve hidrolik hortumları ile oyuncak yapımında sıkça kullanılır. Otomotiv sektöründe ise, sızdırmazlık alanında yaygın kullanım alanı bulunmaktadır.

#### 1.2.2.4. Etilen-propilen dien monomer kauçuğu (EPDM)

EPDM, EPM etilen ile propilenin kopolimerizasyonu ile elde edilmektedir. Ozona, ışığa ve kimyasallara karşı yüksek dayanımı ile düşük sıcaklıklarda iyi elastik özellikler sergilemektedir. Bu özellikleri sayesinde kapı fitillerinde, beyaz eşya contalarında ve radyatör hortumlarında sıkça kullanılmaktadır.

#### 1.2.2.5. Fluoro elastomer kauçuğu (FKM)

FKM, Flor atomu içeren monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilir. Vinilden florür, klortrifloretilen, tetrafloretilen türü monomerler kullanılır. Yüksek sıcaklıklara, yağlara ve ve kimyasallara karşı çok iyi dayanım sergilemektedirler. Bunun en büyük nedeni, yapısında bulunan karbon-flor bağlarının güçlü olmasıdır. Flor oranı arttıkça, polimerin kimyasallara karşı dayanımı da artmaktadır. FKM kauçuk birçok solvente, kimyasallara, yakıtlara ve mineral yağlara karşı mükemmel dayanım göstermektedir. Düşük sıcaklıklara dayanımı düşük olmasına karşıni bazı katkı maddeleri eklenmesi ile düşük sıcaklık dayanımı sağlanabilmektedir.

Genel olarak bu özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık ve uzay sanayinde sızdırmazlık ürünleri ile kablo sektöründe kullanılmaktadır.

### 1.3. Dolgu Maddeleri

Kauçuk formüllerinden istenilen mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerin sağlanması amacı ile belirli oranlarda genellikle kuru toz halde katılan maddelere verilen isimdir. İstenilen özellikleri sağlamanın yanısıra, formülün ekonomik hale gelmesi ve renklendirilmesi içinde önemli maddelerdir.

İstenilen bu özelliklere örnek olarak; sertlik değeri, yoğunluk, kopma mukavemeti, uzama miktarı, agresif ortamlara ve ozana dayanım ve sürtünme dayanımını artırma gibi özelliklerdir.

Bu dolgu maddelerinin seçiminde; ana polimere uyum ve optimum kullanım miktarına dikkat edilmektedir. Tane boyutu, yüzey alanı, yapısal özellikler ve spesifik gravite özelliklerine göre malzeme seçiminde değerlendirilmektedirler.

#### 1.3.1. Karbon siyahları

Karbon siyahları, kauçuk formülü içerisinde mukavemet artırmak için kullanılmaktadırlar. En çok kullanıldığı sektör kauçuktur ve bu sektör içinde de en çok lastik sektöründe kullanılmaktadırlar.

Fırın Siyahları, Kanal (Baca) Siyahları, Termal Siyahları ve Asetilen Siyahı olarak 4 gruba ayrılmaktadırlar. Tane boyutu ve yüzey alanı özellikleri bakımından da ticari olarak kendi aralarında ayılmaktadırlar.

### 1.4. Yumuşatıcılar

Kauçuk formülü içerisinde dolgu maddelerinden sonra en çok kullanılan maddelerdir. Mastikasyon işleminde sürtünmeyi azaltır. Bu sayede, sıcaklığı düşürerek, ön pişmeyi azaltır. Dolgu maddelerinin homojen olarak karışımını kolaylaştırır. Formülün maliyetini düşürür. Sertlik, uzama ve diğer fiziksel özelliklere etki eder. Kimyasal ve fiziksel yumuşacıtılar olarak 2 ana sınıfa ayrılırlar.

### 1.5. Aktivatörler

Kauçuk formüllerinin ekonomik olarak formülize edilmesinin yanısıra, vulkanizasyon prosesinin optimum sürelerde olması da ticari olarak çok önemlidir. Vulkanizasyon işlemi süresinin azaltılması için kullanılan bu maddelerin aktive olması için kullanılan maddelere aktivatörler denilmektedir. En sık kullanılan aktivatör madde, çinko oksittir. Çinko oksitin çözünürlüğünü artırmak için stearik asit kullanılmaktadır.

### 1.6. Hızlandırıcılar

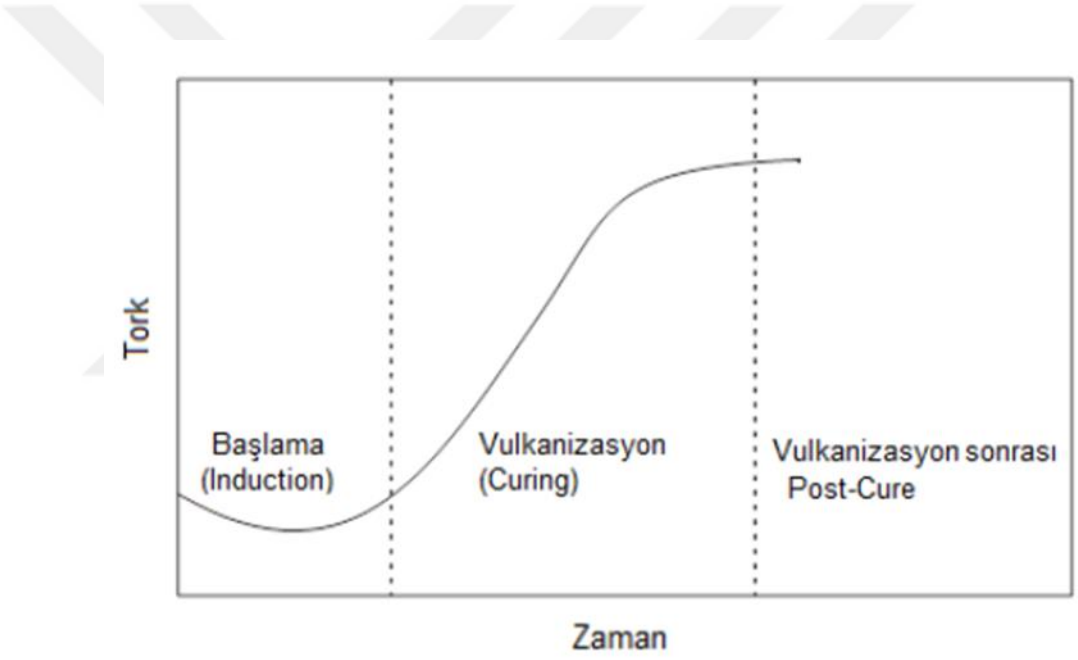
Kauçuk formülü içersinde bulunan kükürt tek başına vulkanizasyonda çağraz bağ yoğunluğuun istenilen seviyede olması için yeterli değildir. Bu yüzden formül içersinide hızlandırıcı adı verilen organik veya inorganik hızlandırıcılar kullanılmaktadır. Polimer ve istenilen özelliklere göre bir veya birden fazla hızlandırıcı kullanılabilir.

Yapılan vulkanizasyon işlemi süresi ve verimini iyileştirerek, üretimin ekonomik olmasını sağlar. Vulkanizasyonun kontrolünün sağlanmasında önemli etkileri bulunmaktadır. Bu sayede kauçuğun vulkanizasyonunun başlangıç noktası belirlenebilir. Çapraz bağ yoğunluğunun artması ile, ürünün bazı mekanik özelliklerinde olumlu etkisi olmaktadır.

Hızlandırıcılar fonksiyonel olarak birincil ve ikincil olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Vulkanizasyona olan etkilerinden dolayıda, hızlı-orta-yavaş hızlandırıcılar olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

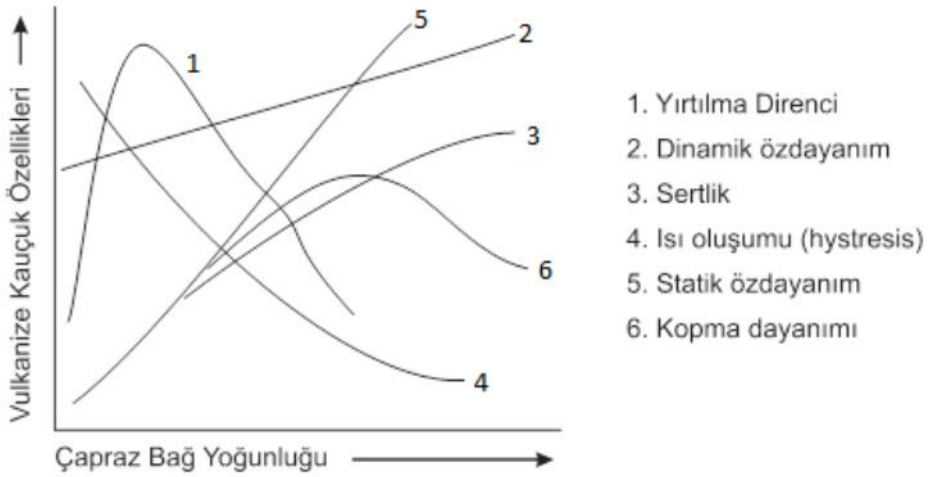
### 1.7. Vulkanizasyon

Vulkanizasyon, kauçuk veya polimerin yüksek sıcaklık altında içinde bulunan kükürt atomlarının doymamış karbon ile bağ kurmasıyla oluşan karbon-kükürt reaksiyonudur. Diğer deyiş ile; kauçuk hamurunun yüksek ısı altında reaksiyona girerek plastik halden elastik hale geçmesidir.




Şekil 1.2: Vulkanizasyonda eğrisi. [Kruželák]

Şekil 1.2'de gösterildiği üzere; Başlama kısmı vulkanizasyona hazırlık bölümüdür. Vulknizasyon kısmında ise, çapraz bağlanmanın en yoğun olduğu bölgedir. Vulkanizasyon bölümünde ise; çapraz bağ yoğunluğu nerdeyse teorik yoğunluğa ulaştığı bölümdür.




Şekil 1.3: Çapraz bağ yoğunluğu ile değişen fiziksel özellikler [Kruželák]

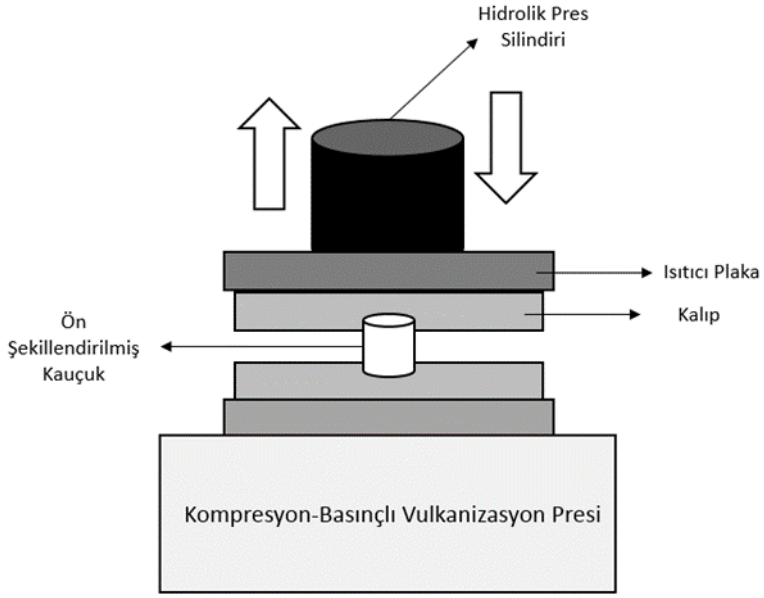
### 1.7.1. Vulkanizasyon teknikleri

Endüstriyel olarak talep edilen özelliklere göre malzeme seçimi yapılan kauçuk malzemelerin vulknizasyonunda, istenilen son ürüne göre çeşitli vulkanizasyon teknikleri geliştirilmiştir.

Üretilecek ürünün geometrik şekli, kullanım yeri veya ekonomik sebeplerden dolayı üretim yöntemi tasarımı değişmektedir. En sık kullanılan yöntemler; Kompresyon-basınçlı kalıplama, enjeksiyon ve transfer kalıp ile vulkanizasyon yöntemleridir.

#### 1.7.1.1. Basınçlı vulkanizasyon yöntemi

Kauçuk hamurunun yüksek basınç ve sıcaklık altında vulkanizasyonu ve istenilen şekli alması için uygulanmaktadır. Bu teknikte, şekli veren kalıp ve plakalar elektrikli rezistanlarla istenilen sıcaklığa getirilir. Daha önceden ön şekillendirmesi yapılan kauçuk hamurunun beslenmesinden sonra, hidrolik pres ile istenilen sıkıştırma basıncına getirilir ve vulkanizasyon süresi boyunca da basınç altında kauçuk pişirilmektedir. Bu yöntem ürün çeşidinin fazla, adetlerin düşük olduğu üretimlerde sıkça kullanılmaktadır. Üretim yatarım maliyeti diğer yöntemlere göre ucuzdur.




Şekil 1.4: Kompresyon-Basınçlı Vulkanizasyon Presi Şematik Gösterimi

### 1.7.1.2. Enjeksiyon ile vulkanizasyon yöntemi

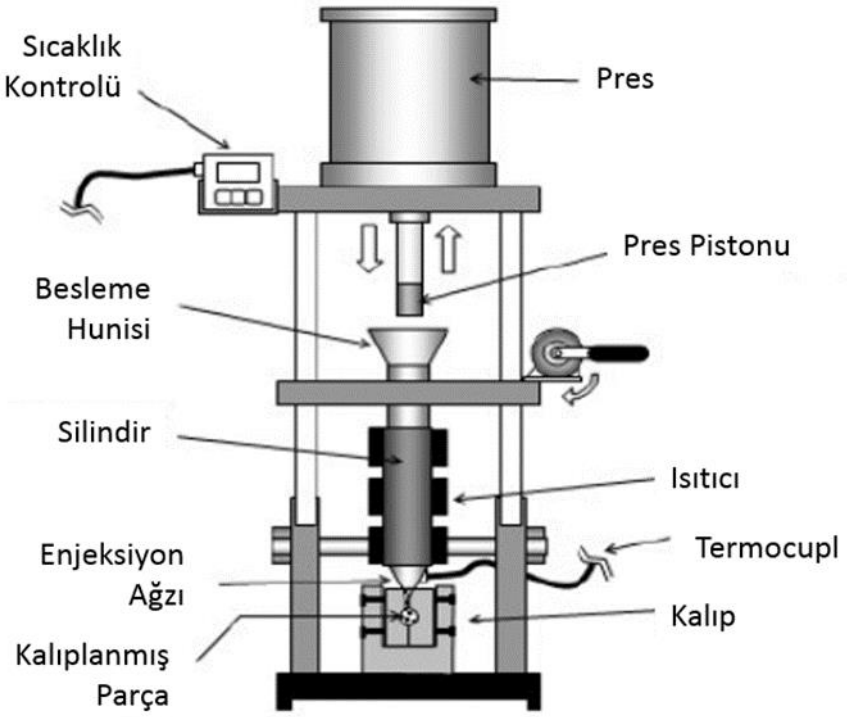
Enjeksiyonla vulkanizasyon işlemi, kapalı silindir şeklindeki kanal içerisinde basınç ve ön ısıtma ile polimerin yumuşatılıp, silindirik kovan sonunda bulunan kalıptan çıkarken şekillendirildiği ve kalıp içerisinde yüksek ısı ve basınç altında vulkanize edildiği işlemdir. Şekil 1.5'de enjeksiyon ile presleme işleminin şematik görünümü verilmektedir.

Bu işlem genellikle düşük çeşit sayısı ve yüksek üretim adetlerine sahip ürünlerde sıkça kullanılan yöntemdir. Bu yöntemin dezavantajı ise; yüksek yatırım maliyetidir.

### 1.7.1.3. Transfer kalıp ile vulkanizasyon yöntemi

Bu yöntem ile kompresyon basınçlı kalıplama yöntemi arasındaki fark; yüksek basınç altında hamurun bir delikten geçerek kalıplara dolması ve sıcaklıkla birlikte vulkanize edilmesi işlemidir.

Bu işlemin avantajı; daha kısa pişme süresi ve kauçuk ön şekillendirme işlemlerinin az olmasıdır. Buna rağmen silindir içinde ve kalıptaki hamur boşluğunda kalan artan kauçuğun atık olarak atılması dezavantajıdır.




Şekil 1.5: Enjeksiyon Presleme Sistemi [Ismail]

### 1.8. Poli-Tetra-Flor-Etilen (PTFE)

Ticari olarak Teflon olarak adlandırılan bu malzeme Etilen polimeri olan politetrafloroetilendir. Flor atomlarıyla doymuş uzun ve düz bir karbon zincirinden meydana gelmiştir. Teflonun bir diğer özelliği ise; hiçbir madde ile yapışmaması ve sürtünme katsayısı bütün katı cisimlerinkinden düşük olmasıdır. Teflon, 260°C üzerindeki sıcaklıklarda bozulmaya başlar; 350°C civarında tamamen yapısı bozulur. Yüksek ısı dayanımı istenen conta, keçe, kimyasal maddelere dayanıklı boru ve sürtünmeye dayanımı istenen yağsız yataklar ve burçlarda sıkça kullanılmaktadırlar.

# BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

[1] Khan ve arkadaşları iki farklı çeşit PTFE katkı kullanarak elde edilen EPDM-PTFE kauçuk karışımının mekanik, sertlik, tribolojik ve dinamik mekanik özelliklerini incelemişlerdir. PTFE katkılardan birincisi PTFE-1100, 4 μm tane boyutuna sahip diğeri ise PTFE-1200, 3 μm tane boyutuna sahiptir. FKM kauçuğuna PTFE katkılar 10, 20 ve 30 phr oranında ilave edilmiştir. PTFE katkı miktarının artması ile hem PTFE-1100, hem de PTFE-1200, katkılı kauçuk karışımlarının çekme mukavemeti, sertlik ve kopmadaki % uzama değerleri artmıştır. PTFE-1100 katkısı kauçuk karışımının çekme mukavemetinin artmasında daha etkili olmuştur. DMA sonuçlarına göre FKM kauçuğunun camsı geçiş sıcaklığı -35 $^{o}$C iken PTFE-1200 ilavesi ile karışımın camsı geçiş sıcaklığı -10 $^{o}$C' ye yükselmiştir. EPDM-PTFE kauçuk karışımının sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değerleri PTFE katkı miktarının artması ile azalmıştır.

[2] HuLin ve arkadaşları farklı yükler, farklı hızlar ve farklı yüzey pürüzlülük değerlerindeki yüzeyler altında PTFE-Bakır kompozitlerinin transfer filmlerinin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Kompozit malzemede bulunan PTFE için 40 mikrometre tane büyüklüğünde ve 2,1 g/cm$^3$ yoğunluğunda PTFE seçilmiş olup, bakır için 1-3 mikrometre tane büyüklüğünde ve 3 g/cm$^3$ yoğunluğunda %99 saflıkla bakır kullanılmıştır. Oluşturulan kompositin ağırlıkça %45'i bakırdır. Önce film tabakası hazırlanması için numuneler Ø6x30 mm$^2$ olacak şekilde preslenerek hazırlanmıştır. Daha sonra Ø50 lik mil üzerinde RTEC marka tribometre ile 2-6 MPa yük altında, 0,335– 0,837 m/s'lik hızlarda ve farklı Ra yüzey pürüzlülüğüne sahip mil üzerinde film tabakaları oluşturulmuştur. Tüm numuneler RTEC marka pin-on-disk tribometre ile Si3N4 top uç kullanarak 1 m/s hızda ve 50 N yük altında teste tabii tutulmuştur. Test sonuçlarına göre; Kayma hızının, transfer film kalınlığı ve tribolojik davranışlara önemli etkisi olduğu görülmüştür. Hız ne kadar düşük olursa, film kalınlığı o kadar ince ve aşınma direnci o kadar iyidir. Temas basıncı arttıkça, film tabakası kalınlığı düşmektedir. Bununla birlikte temas basıncı ne kadar düşük olursa yüzey kalitesi o kadar iyi ve aşınma direnci o kadar

yüksek olur. Düşük hız ve hafif yük mükemmel tribolojik özelliklere sahip bir transfer film oluşumunda oldukça etkilidir.

[3] Khan ve arkadaşları farklı derecelerde elektron demeti ışınlanmış ve farklı phr değerlerindeki PTFE tozları peroksitli kürlenmiş EPDM kauçuğu ile kompozit haline getirmiş ve bazı fiziksel ve tribolojik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Malzeme seçiminde ağırlıkça %7,7 ENB ve %51 etilen içerikli EPDM kauçuğu seçilmiştir. Kompozit malzeme yapımında; 0,25 bulk yoğunluğuna sahip, 0,44 g/cm$^3$ yüzey alanlı beyaz PTFE malzeme kullanılmıştır. Bu PTFE tozları 20 ve 500 kGY ışık demetlerinde 10-30-50 phr olacak şekilde oda sıcaklığında ışına tabii tutulmuştur. Sonrasında bu tozlar diğer kimyasallar ile birlikte açık karıştırıcıda EPDM kauçuk ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım sıcak preslerde 10 MPa ve 170ºC'de kürlenmiştir. Hazırlanan numuneler fiziksel ve tribolojik testlere tabii tutulmuşlardır. Fiziksel testler için; çekme-uzama ve sertlik testleri yapılmıştır. Tribolojik testler içinde; pin-on-disk tribometre ile 40x40x2 mm boyutlarında kauçuk test plakaları, Ra= 0,47 μm yüzey pürüzlülüğü ve 59 HRC sertlikteki çelik bilya kullanılarak test edilmiştir. Test hızı 0,05 m/s, test uygulanan yük 1 N ve test süresi 2 saat olarak belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı değeri; ortalama olarak maksimum sürtünme katsayısı–minimum sürtünme katsayısı farkının yarısının alınması ile tanımlanmıştır. Test sonucuna göre; PTFE katkılı hazırlanan tüm numunelerin sürtünme katsayısı, ana formüle göre düşüktür. Ana formülün ortalama sürtünme katsayısı 2,1 civarında iken, PTFE katkılarında bu değer 1.0 civarına kadar düşmektedir. Fiziksel özellikler incelendiğinde ise; 0 kGy ışın demetine maruz kalmayan PTFE katkılı karışımlarda 10 phr PTFE katkılı numuneler hariç, diğer 20 phr ve 30 phr numunelerin ana formüle göre kopma dayanımı, kopmadaki %uzaması ve yırtılma dayanımı değerleri azalmıştır. Bununla birlikte; 0 kGy ışın demetine maruz kalmayan PTFE katkılı karışımlarda sertlik değeri phr değeri arttıkça yükselmiş ve 54,7 Shore A'dan 63,4 Shore A'ya yükselmiştir. Spesifik aşınma oranı ise; 0 kGy ışın demetine maruz kalmayan PTFE tüm katkılı karışımlarda ana formüle göre azalmıştır.

[4] Lee ve arkadaşları keçelerin ömrünün tahmini için FKM elastomerlerinin hızlandırılmış aşınma testi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Çalışmada, mekanik özellik, ısıl direnç ve kimyasal dayanıklılık açısından diğer elastomerlerden nispeten daha iyi olan FKM ile çalışma yapmışlardır. Malzeme seçiminde; numuneler 20 mm uzunluğunda olacak şekilde o-ringlerden profil kesilerek hazırlanmıştır. Kesit kalınlığı 10 mm olup,

temas yüzeyi R2,5 ölçüsündedir. Seçilen FKM malzemenin poisson oranı 0,46 olup, 71 Shore A sertliğinde ve 16,5 MPa elastik modül değerine sahiptir. Karşıt malzeme seçiminde ise; 0,31 poisson oranı, 207 MPa elastiklik modülü ve 0,139 μm yüzey pürüzlülük değerine sahip çelik malzeme kullanılmıştır. Test için; pin-on-disk tribometre tasarımı seçilmiştir. Test 1 Hz frekansında ve toplam 80 mm'lik mesafede tek yönde 40 mm'lik ileri ve geri hareket edecek şekilde yapılmıştır. 450 g kuvvet yük uygulanmıştır. Normal test 1000 saatlik periyotta ve 0,4 g kayganlaştırıcı malzeme ile yapılmıştır. Ortalama 100'er saatlik periyotlarda test durdurulmuş ve aşınma yüzeyleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Hızlandırılmış aşınma testinde ise; 2 farklı malzeme kullanılmıştır. İlk malzeme her 10 mg lık kayganlaştırıcı başına 1 mg lık 1-300 μm tane boyutunda demir tozları kullanılmış ve test 2 saat sürmüştür. İnceleme sonucunda demir tozlarıyla yapılan hızlandırılmış aşınma testi ile normal aşınma arasında benzerlik tespit edilmemiştir. Diğer malzeme her 10 mg kayganlaştırıcı başında 3 mg ve 1 μm tane boyutunda alümüna parçacıklardır. 10 saat sonunda elde edilen veriler ile normal aşınma testi verilerinin birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Hızlandırılmış test boyunca sürtünme katsayısı değerinin kararlı olduğu ve 0,093 μ dan 0,068 lere kadar düştüğü görülmüştür. Normal testte bu değer 0,028 μ civarındadır ve test boyunca çok kararlı bir görünüm sergilemiştir. Buda kayma arayüzünde önemli bir değişiklik olmadığını ve FKM'nin son derece düşük aşınma özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Normal test ile hızlandırılmış test arasındaki sürtünme katsayısı değeri farkı, alümüna parçacıklarının sürtünme katsayısı değerini yükseltmesinden kaynaklanmaktadır. Test sonucuna göre; Normal aşınma testleri sırasında temas bölgesinde aşınma izlerinin düzensiz olarak oluştuğu ve artan çevrim ile birlikte yeni aşınma izleri oluştuğu gözlemlenmiştir. Hızlandırılmış aşınma testinde ise; normal teste göre en iyi sonucu 10 mg kayganlaştırıcı başına 3 mg ve 1 mm tane boyutundaki alümüna parçacıkları eklenmesi ile elde edilmiştir.

[5] E. Feyzullahoğlu ve arkadaşları, çevresel faktörlerin FKM, NBR ve CR'nin abrasiv aşınmaya etkisini incelemiştir. Bunun için; FKM, NBR ve CR seçilmiştir. FKM, NBR ve CR kauçuklarının yoğunluk değerleri sırasıyla 2.1, 1.2-1.4 ve 1.1 g/cm$^3$'tür. Numuneler 170°C, 15 MPa basınç altına 10 dakika boyunca vulkanize edilmiştir. Aşınma için numuneler Ø16 mm yüksekliğinde ve 10 mm kalınlığında hazırlanmıştır. Ozon testi: 50 pphm ozon ortamında 40°C ve 48 saatte yapılmıştır. Korozyon testi: %5 NaCl

çözeltisinde 35°C'de 400 saat koşullar altında yapılmıştır. Termal çevrim testi: 100°C'lik kaynar su ve 0°C'lik buzlu su ortamında 1'er dakika bu ortamda bekletilen numuneler 25°C'de kurutma fırınında kurutulmaktadır. Bu işlem 1 çevrim olarak tanımlanmakta ve toplamda 100 çevrim boyunca bu test yapılmıştır. Sertlik Testi: ISO 868 standardına göre 22°C'de ve 12,5 N yük uygulanarak Shore A durametresi ile sertlik ölçülmüştür. Abrasiv aşınma testi ASTM D5963'e göre yapılmıştır. 60 numara taşlama kağıdında 20 N'luk yük altında test edilmiştir. Aşınma sonrasında yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Optik mikroskop ile ozon testi önce ve sonrası görüntüler çekilmiştir ve yüzeyler incelenmiştir. Çevresel gerilme çatlak testi 50°C'de yapılmıştır.

Test sonucunda tüm çevresel test koşulları sonrasında, sertlik düşüşü tüm kauçuklarda gözlemlenmiştir. Ozon, kauçuklarda daha fazla aşınmaya neden olmaktadır. Tüm kauçukların korozyon testi sonrasında yüksek aşınma dayanımına sahip oldukları görülmüştür. Termal çevrim testi sonrasında NBR kauçuğun aşınma oranı artarken, diğer kauçuklarda azalmaktadır. Tüm çevresel test koşulları sonrasında, NBR kauçukta yüzey pürüzlülük değerinde artış görülmüştür. Ozon testi sonrası FKM'de pürüzlülük değeri düşmüş olup, diğer kauçuklarda artmıştır. Korozyon testi sonrasında ise pürüzlülük değeri FKM ve CR kauçuklarında düşmüştür. Ozon testi sonrasında numuneler üzerinde yoğun ve kılcal çatlaklar oluşmuştur. CR kauçuğunda küçük ve süreksiz çatlak oluşumu görünürken, NBR'de bu çatlakların derin ve sürekli olduğu görülmektedir. FKM ise; en iyi gerilme-çatlama dayanımı sonucunu vermiştir. Bunun nedeni ise FKM kauçuğunun yüksek sıcaklarda kullanılabilir olması ile açıklanmıştır.

[6] Xu ve arkadaşları HNBR/FKM/MWCNT karışımlarının çeliğe karşı kuru kaymaşartlarındaki aşınmasını incelemişlerdir. Malzeme olarak; HNBR için akrilinitril ağırlıça %21 oranında ve Mooney Viskositesi ML(1+4) 100 °C = 74 olan HNBR için 175 °C 10 dakikada vulkanize edilmiştir. FKM için; ağırlıkça %10 fluorin ve Mooney viskositesi ML (1+4) 121°C = 65 olan FKM seçilmiştir. Bu FKM karışımı, kürlenmeye hazır HNBR karışımının içine HNBR/FKM oranı 100/0, 75/25 ve 50/50 oranında katılmıştır. Bu karışımlara ek olarak 10 phr oranında çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katılmıştır. HNBR (saf), HNBR-10 MWCNT, HNBR/FKM 75-75, HNBR/FKM 75-75 MWCNT, HNBR/FKM 50-50 ve HNBR/FKM 50-50 MWCNT olacak şekilde 6 farklı karışım hazırlanmıştır. 2 mm kalınlığında 100x100 boyutlarında plakalar 175°C'de 15 dakikada laboratuvar tipi presde vulkanize edilerek, test numunesi

haline getirilmiştir. Testler; DMTA, TEM, AFM, yüzey gerilimi ve martens sertlik deneyleri yapılmıştır. Sürtünme ve aşınma için; Ø 14mm ve Ra=1µm değerlerine sahip çelik bilya ile testler gerçekleştirilmiştir. 33 mm'lik çember çevresinde, 90 N yük altında, 280 dev/dak hızda ve 3 saat boyunca test yapılmıştır. Sonuç olarak FKM katkılı tüm bileşikler, HNBR ve HNBR+10 MWCNT karışımlarına göre daha düşük aşınma oranına sahip oldukları görülmektedir. Buna rağmen; daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. FKM oranı arttıkça, sürtünme katsayısı oranı da artmaktadır. En iyi aşınma oranı HNBR-FKM 75-25 karışımında elde edilmiştir. MWCNT eklentisi, HNBR-FKM karışımlarında sürtünme katsayısını artırmakta fakat aşınma oranını düşürmektedir.

[7] Shen ve arkadaşları aşındırıcı partikül boyutunun iki gövdeli aşınmada NBR'nin sürtünme ve aşınma özelliklerine etkisini incelemişlerdir. %kopma uzaması 398 olan, kopma dayanımı <30 MPa, yoğunluğu 1,3 g/cm$^3$ ve 70,2 shore A sertliğinde NBR kauçuğu kullanılmıştır. NBR içeriğinde akrilonitril içeriği ağırlıkça %28 oranındadır. Numuneler 8 mm çapında ve 20 mm uzunluğunda olacak şekilde hazırlanmıştır. Test için P80 den P5000'e kadar farklı boyutlarda SiC taşlama kağıtları kullanılmıştır. Testler pin-on-plane tipinde tribometre ile yapılmıştır. Testlerde 5, 10, 20 ve 40 N olmak üzere dört farklı yük seçilmiştir. Test ileri ve geri olacak şekilde tek yönde 20 mm mesafe, 2 Hz frekansta ve lineer olarak 0,08 m/s hızda oda sıcaklığında 2500 adet çevrimde gerçekleşmiştir. Test öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Tartım öncesinde suda ultrasonik temizleme yapılmış ve 24 saat boyunca 40°C'de kurutulmuştur. Tartımı doğrulamak için her bir numune üst üste 3 kez tartılmıştır. Numunelere test sonrası SEM analizi yapılmıştır. Sonuç olarak; farklı aşındırıcı kağıt boyutlarının sürtünme katsayısı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Küçük aşındırıcı boyutlarında sürtünme eğrisi stabil olarak görülmektedir. Buna rağmen, orta boy aşındırıcılarda sürtünme mekanizması iki aşamada gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca; P80 ve P180 kağıtlarındaki yapılan testlerin başlangıç noktası, diğer testlerinkine göre farklı ve pik yaptığı görülmektedir. Bunun nedeni ise; kullanılan aşındırıcı kağıdının aşındırıcı taneleri arasındaki boşluğun 100 µ ve üzerinde olmasıdır. 5N ve 20 N yük altında, P5000 kağıdı ile yapılan testlerde en yüksek sürtünme katsayısı değeri tespit edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı değeri P800 numaralı zımpara kağıdında ölçülmüştür. Aşınma hacmi olarak incelendiğinde; yük arttıkça P800'e kadarki tüm

testlerde aşınma oranı yük artışı ile birlikte artmıştır. Fakat P800 ve daha büyük kağıtlarda aşınma oranı hemen hemen tüm yüklerde aynıdır.

[8] Frölich ve arkadaşları; radyal mil keçelerinde sürtünme, aşınma ve temas sıcaklığı için kapsamlı bir model üzerinde çalışmışlardır. Bunun için 80 mm iç çapında ve 100 mm dış çapında FKM elastomerli bir keçe seçilmiştir. Test için 1.7131 kalite malzemeden üretilmiş test mili ve polialfaolefin, ISO VG 1000 yağı kullanılmıştır. Yapılan deneyde; 80$^{o}$C yağ sıcaklığında dönme hızını 500 dev/dak. 'dan 3000 dev/dak. 'a çıkarıldığında, temas yüzey sıcaklığının 93$^{o}$C'den 164oC'ye çıktığı görülmektedir. Dönme hızı arttıkça, temas yüzey sıcaklığı artmaktadır. Diğer bir deneyde ise; dönme hızı sabit tutulmuş olup, yağ sıcaklığı artırılmış ve temas yüzey sıcaklığının arttığı görülmüştür. 2000 dev/dak dönme hızı sabit olacak şekilde, yağ sıcaklığı 40$^{o}$C'den 100$^{o}$C'ye artırılmış olup temas yüzey sıcaklığının 110$^{o}$C'den 150$^{o}$C'ye arttığı görülmektedir.

[9] Yuan ve arkadaşlar; vakum şartları altında PTFE kaplamaların sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. PVD yöntemi ile 20 μm kalınlığında ve 24 HV sertliğinde PTFE kaplama yapılmıştır. Test, disk üzerinde bilye yöntemi ile 10-4 Pa vakum altında yapılmış olup 10mm çapında GCr15 çelik bilye kullanılarak yapılmıştır. Testler; 4N yükten 12N yüke kadar ve 0,2 m/s çizgisel hızdan 2,4 m/s hıza kadar farklı parametrelerde yapılmıştır. Deneyde; PTFE kaplamanın sürtünme katsayısının 1,2 m/s çizgisel hıza kadar arttığını, hızın artması ile daha sonradan düştüğünü göstermiştir. PTFE kaplamanın aşınması ise; ilk başta kayma hızının artması ile azalırken, daha sonradan arttığı gözlemlenmiştir. Aşınma ise uygulanan yük ile birlikte önce azalırken, 6N yükten sonra artmaya başladığı görülmüştür. Sürtünme katsayısı ise, yükün artması ile azalmıştır. Uygulanan çevresel basıncın sürtünme katsayısına önemli bir etkisi bulunmamıştır. Fakat, aşınmanın çevresel basıncın 10-4 Pa'a kadar azaldığı ve sonrasında artmaya başladığı tespit edilmiştir.

[10] Desale ve arkadaşı; krank mili olarak PTFE'nin performans analizi çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada; karbon, MoS2, cam elyafı ve PEEK ile güçlendirilmiş PTFE'nin sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Testler AISI 304 kalite paslanmaz çelik kullanılarak pin-on-disk cihazında yapılmıştır. Saf PTFE ile diğer kompozit PTFE malzemeler 159,16 N ve 184,02 N yükler altında test edilmiş olup, yükün artması ile tüm malzemelerde aşınmaların arttığı görülmüştür. Buna rağmen; tüm

malzemelerde yükün artması ile sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. En düşük aşınma miktarı %15 cam elyaf+%5 MoS2 katkılı PTFE kompozitinde elde edilmiş iken, en yüksek aşınma ise saf PTFE polimerinde elde edilmiştir.

[11] Zhao ve arkadaşlar; PTFE katkılı EPDM kompozitinin mekanik ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada ağırlıkça %55,5 etilen ve %40,7 propilen içeriğine sahip EPDM kullanılmıştır. Bu malzemeye 5 µm, 1 µm ve 0,1 µm çaplarında üç farklı PTFE tozları 0, 6, 12, 18 ve 24 phr aralığındaki miktarlarda karıştırılarak, kompozit malzeme oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada, 0,1 µm ve 1 µm partikül boyutlu PTFE+EPDM katkılı kompozit malzemenin kopma ve yırtılma dayanımları artan PTFE içeriği ile artarken, 5 µm PTFE+EPDM katkılı kompozitin çekme dayanımı azalmıştır. PTFE içeriği arttıkça 0,1 µm ve 1 µm PTFE+EPDM katkılı kompozitin kopmadaki %uzama değerleri artarken, 5 µm ise 12 phr PTFE katkısına kadar artarken, bu orandan daha fazla ilave edildiğinde ise azaldığı görülmüştür. Sertlik değerleri ise tüm kompozitler için PTFE miktarı arttıkça artmaktadır. Benzer şekilde çalışmada bu kompozitlerin ön pişme ve vulkanizasyon zamanları da incelenmiştir. Çalışma sonucunda 5 µm PTFE partikül boyutlu EPDM malzemenin ön pişme süreleri genel olarak azalma göstermiştir. 0-12 phr PTFE ilavesinde hafif azalma 12-24 phr PTFE ilavesinde ise ani düşme gözlenmiştir. 1 µm PTFE partikül boyutlu EPDM malzemenin ön pişme süreleri önce artmiş sonrasında ise belirgin azalma göstermiştir. 0-6 phr PTFE ilavesinde önemli bir artış gözlenirken 6-24 phr PTFE ilavesinde ise ani azalma tespit edilmiştir. 0,1 µm PTFE partikül boyutlu EPDM malzemenin ön pişme sürelerinde 0-18 phr PTFE ilavesi aralığında pek bir değişim gözlenmezken 18-24 phr PTFE ilavesinde ise ani azalma gözlenmiştir. Yine yapılan çalışmada 5 µm PTFE partikül boyutlu EPDM malzemenin vulkanizasyon süreleri de 0-18 phr PTFE ilavesinde ani azalma 18-24 phr PTFE ilavesinde ise hemen hemen değişmediği gözlenmiştir. 1 µm PTFE partikül boyutlu EPDM malzemenin vulkanizasyon süreleri 0-6 phr PTFE ilavesinde önce artış göstermiş 6-18 phr PTFE ilavesinde ani azalma ve 18-24 phr PTFE ilavesinde ise tekrar arttığı tespit edilmiştir. 0,1 µm PTFE partikül boyutlu EPDM malzemenin vulkanizasyon süreleri de 0-6 phr PTFE ilavesi aralığında artarken 6-24 phr PTFE ilavesinde ise ani bir düşme eğilimi tespit edilmiştir.

[12] Park, mikronize edilmiş PTFE ile güçlendirilmiş silikon kauçuk kompozitinin işlenebilirliliği ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Farklı tane büyüklüğü ve renge

sahip PTFE malzemeler ile oluşturulan 5 farklı kompozit malzeme ile yapılan bu çalışmada; farklı özelliklerde PTFE kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerde PTFE miktarı arttıkça, kopma dayanımı ve kopmadaki %uzama değeri azalırken, yırtılma dayanımı ve sertlik değerinde artış görülmektedir.

[13] Lv ve arkadaşları; tek eksende gerilmiş PTFE film ile lamine edilmiş kompozit malzemelerin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Test numunesi, PTFE tek eksende gerilmiş filmden ve epoksi reçinesi ile bağlanmış epoksi reçineli lastik plakadan yapılır. Üst katman, bir PTFE tek eksende gerilmiş filmdir ve alt katman bir lastik plakadır. PTFE tek eksende gerilmiş film soğuk presleme ve sinterleme ile PTFE tozundan yapılmıştır. Sürtünme davranışlarının incelenmesi için ASTM D3702-94 standardına göre aşınma testi yapılmıştır. Test 20-60 dev/dak hızlarında, 75-150 N yük altında kuru ortam koşullarında yapılmıştır. Testler sonucunda hız arttıkça sürtünme katsayısı değeri artmış olup, uygulanan yük arttıkça yani 20 dev/dak ve 40 dev/dak hız aralığında sürtünme katsayısı artarken, 60 dev/dak hız değerinde ise düşmektedir. Aşınma oranı; 40 ve 60 dev/dak. hız değerlerinde yük arttıkça yükselmekte iken, 20 dev/dak. hız değerinde azalmaktadır.

[14] Ran ve arkadaşları; transfer ünitelerindeki keçelerde kullanılan PTFE kompozitlerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Hacimce %65 PTFE, %10 grafit ve %6 MoS2 ile hazırlanan test numuneleri, 1000-5000 dev/dak. hızlarında ve 0,5-2,5 MPa basınç altında özel bir test düzeneğinde test edilmişlerdir. Test 46 numara hidrolik transmisyon yağı ile yapılmıştır. 50, 100 ve 130 ºC yağ sıcaklığında yapılan farklı testlerde; uygulanan basıncın artmasıyla tüm sıcaklıklarda sürtünme katsayısı değerleri azalmıştır. Aynı şekilde farklı sıcaklıklarda yapılan testlerde de 3000 dev/dak. hız değerine kadar artan hızlarda sürtünme katsayısı azalırken, 3000 dev/dak. hızından sonra ise sürtünme katsayısında artış görülmüştür.

[15] Khan ve Heinrich tribolojik uygulamalar için PTFE bazlı kauçuk kompozitlerini incelemişlerdir. PTFE tozlarını 20, 100, 200, 300, 400 ve 500 kGy ışın demeti ile modifiye etmiş ve farklı phr oranlarında EPDM kauçuğu ile kompozit hazırlamışlardır. Daha sonra 150 ºC'de 5 MPa basınç altında 3 dakika vulkanize etmişlerdir. Bu karışımda PTFE phr oranı sırasıyla 0, 10, 20, 30, 40, 50 ve 60 phr dır. PTFE katkısız karışımda t90 değeri 14,8 dakika iken, bu değer ışın demetine maruz kalmayan 10 phr katkılı PTFE'de

15,2 dakikaya çıkıyor. PTFE miktarı 20 phr da bu değer tekrar 14,8 dakika değerine düşerken 40 phr PTFE katkılı karışıma kadar artarak 15,8 dakika değerine ulaşmaktadır. 60 phr PTFE katkısına kadar bir miktar azalma görülmüş ve 14,9 dakika olarak tespit edilmiştir. Çekme dayanımı değerlerine bakıldığında ise; 10 phr PTFE katkısına kadar çekme dayanımı artmakta olup 3,48 MPa'dan 3,53 MPa değerine azalmıştır. 50 phr PTFE katkısına kadar azalmakta ve 2, 67 MPa değerine aniden düşmekte ve 60 phr katkısında bir miktar artan bir eğilim görülmektedir. Benzer değişim, % uzama değerlerinde de görülmüştür. 10 phr PTFE katkısına kadar uzama %304'den %315 değerine artmış ve daha sonra hızla azalma görülmüş, 50 phr PTFE katkısında ise % 267 uzama değerine ulaşmıştır. %100 uzamadaki elastiklik modülü değeri, ışın demetine maruz kalmayan PTFE karışımları içinde yine 30 phr PTFE katkılı karışıma kadar aniden artarken, 40 phr PTFE katkılı karışımda düşme, 60 phr katkısına kadar ise tekrar artmaktadır. PTFE miktarı arttıkça, aynı karışımdaki sürtünme katkayısı değerleri incelenmiş olup, PTFE katkı oranı arttıkça sürtünme katsayısı değerinin düştüğü görülmektedir. Aşınma oranı değerlerine bakıldığında, 30 phr PTFE karışıma kadar azalma eğilimi gözlenirken, 30 phr ile 60 phr arasında ani bir artış gözlenmiştir. Bu çalışmada, aynı zamanda sertlik değerinin artması ile sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığı yönünde bir sonuca da varılmıştır. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde; PTFE katkısız karışımdaki aşınmanın, ışın demetine maruz kalmayan PTFE katkılı karışıma göre yüzeylerde daha fazla deformasyon ve aşınma izleri görülmüştür.

[16] Hopmann ve arkadaşları, PTFE tozlarının kullanıldığı EPDM kauçuk karışımlarının modifikasyonunun özelliklerini incelemişlerdir. Bunun için 1,8 ile 4 µm aglomera büyüklüğü ve 200 nm birincil tane boyutuna sahip PTFE ile EPDM kauçuğunu kompozit haline getirmişlerdir. Karışımları hazırlarken karbon siyahı ve yağ katkılı ve katkısız farklı 2 karışım üzerinden deneyler tamamlanmıştır. PTFE katkısız karbon siyahı ve yağ içerikli karışımda öekme dayanımı 2,6 MPa iken, 20 phr PTFE katkısında bu değer 2,8 MPa ve 40 phr PTFE katkısında 3,5 MPa değerine ulaşmaktadır. % uzama değeri için ise 80 phr PTFE katkısına kadar % uzama değerinde azalma gözlemlenmezken, 80 phr PTFE katkısından sonra azalmaya başlamaktadır. Sürtünme katsayısı değeri karbon siyahı ve yağ içerikli EPDM karışımında, PTFE katkı oranı arttıkça hızla düşmekte olup, yaklaşık 1,65 µ değerinden, 60 phr PTFE katkı oranında yaklaşık olarak 1,1 µ değerine kadar

düşmüştür. 60 phr PTFE katkı oranından sonra tekrar artmaya başlamış ve 80 phr PTFE katkı oranında yaklaşık olarak 1,28 μ değerine çıkmıştır.

Literatür incelemeleri sonucunda, FKM ile ilgili sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Hatta PTFE katkısının FKM kauçuk üzerindeki mekanik, fiziksel ve tribolojik özellikleri üzerine herhangi bir uluslararası yayına rastlanmamıştır. FKM kauçuğu aslında yüksek sıcaklık ve hızlara dayanıklı uygulamalarda endüstrinin değişik alanlarında kullanılmakta olup oldukça pahalıdır. Ancak, yüksek sıcaklıklar ve yüksek çalışma hızlarının kaçınılmaz olduğu endüstrilerden birisi olan otomotiv sektöründe pahalı olmasına rağmen motor döner aksamlarının sızdırmazlık elemanlarında (keçe vb gibi) kullanmak ve geliştirmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Buna ilaveten keçelerdeki sürtünme katsayısının düşmesi ile motorun torku azalır ve daha az enerji ve daha az yakıt tüketimi avantajı sağlar. Bu avantajlar sonucunda aşınma azalarak motor keçelerinin ömrünün artmasına katkı sağlayacaktır.

Yukarıda sayılan avantajlardan dolayı bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklıklara dayanıklı karbon siyahı katkılı florokarbon kauçuk kompoziti (FKM-CB) ve karbon siyahı ana matris olarak kullanılmıştır. Bu ana matris malzemeye 10, 20, 30 ve 40 phr oranlarında poli-tetra-flor-etilen katkısı ilave edilmiştir. Elde edilen florokarbon kauçuk karışımı kompozitin (FKM-PTFE-CB) fiziksel, mekanik, reolojik, tribolojik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Hamur karışımları laboratuvar tipi bir açık karıştırıcıda hazırlanmış ve numuneleri üretmek için vulkanizasyon presi kullanılmıştır. Fiziksel özellikler için kauçuk kompozit malzemelerin yoğunluk testleri belirlenirken mekanik özelliklerden çekme mukavemeti, %5 uzamada ve %100 uzamadaki elastiklik modülü, kopmadaki % uzama, yırtılma mukavemeti ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Reolojik özelliklerde, kauçuk malzemelerin vulkanizasyon özellikleri tespit edilmiştir. Tribolojik deneylerde ise malzemelerin sürtünme katsayısı ile spesifik aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. Tribolojik deneyler 15N ve 30N yüklerde ve 500 ve 1000 dev/dk. gibi iki farklı hızda gerçekleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında ve kuru ortam şartlarında yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, FKM-CB kompozitine 20 phr miktarında PTFE ilavesi ile elde edilen kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı, kauçuk sürtünme yüzey sıcaklıkları, MH ve t90 değerleri azalırken, yoğunluk, sertlik, yırtılma mukavemeti, % uzama, %5 uzamadaki

Elastiklik modülü değerlerinde artış gözlenmiştir. %100 uzamadaki elastiklik modülü ve ts2 değerlerinde dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir.

# BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOT

## 3.1. Malzemeler

### 3.1.1. Kullanılan kimyasallar

Deneylerde hazır FKM karışımı, karbon siyahı ve PTFE olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmıştır. Kullanılan FKM kauçuk, PTFE ve karbon siyahı katkı malzemelerinin teknik özellikleri sırasıyla Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Deneylerde kullanılan FKM kauçuk malzemesi ticari ve teknik bilgileri

| Malzeme | Kısa Gösterim | Ticari Adı | Üretici Firma | Yoğunluk ($g/cm^3$) | Flor İçeriği (%) | Mooney Viskozitesi (MU) ML (1+10) 121 $^oC$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T636 | FKM | VITON | SOLVAY | 1,81 | 65,5 | 34 |

Tablo 3.2: Deneylerde kullanılan PTFE malzemesi ticari ve teknik bilgileri.

| Malzeme | Kısa Gösterim | Ticari Adı | Üretici Firma | Yüzey Alanı ($m^2/g$) | Erime Noktası ($^oC$) |
|---|---|---|---|---|---|
| FLON 9013 FT-905 | PTFE | TEFLON | FLONTECH | 1,81 | 333 |

Tablo 3.3: Deneylerde kullanılan Karbon siyahını katkının ticari ve teknik bilgileri.

| Malzeme | Ticari Adı | Üretici Firma | Tane Boyutu (nm) | Ortalama Yüzey Alanı ($m^2/g$) | Karbon Siyahı Tipi |
|---|---|---|---|---|---|
| Thermax N990 | Karbon Siyahı | CANCARB | 280 | 9 | MT |

Karbon siyahı katkısı olarak N990, kullanılan en yaygın orta termal karbon siyahıdır ve fiziksel özellikleri ile maliyet arasında en optimum sonucu vermektedir (Drobny, 2007, 101)

### 3.1.2. Kullanılan cihazlar

Kauçuk karışımlar, Farrel marka laboratuvar tipi bir açık karıştırıcı (bakınız Şekil 3.1) kullanılarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.1: Laboratuvar tipi açık karıştırıcıda karışımın hazırlanması.

Hazırlanan hamurlardan sertlik disklerini, çekme ve yırtılma test plakalarını, ilgili standartlara uygun üretmek için SKT A.Ş.'nin kendi ürettiği hidrolik vulkanizasyon presi kullanılmıştır (Şekil 3.2).




Şekil 3.2: Disk ve plakaların basıdığı hidrolik vulkanizasyon presi.

Hazırlanan plakalar ve sertlik diskleri kademeli olarak ısıtılan VötschVTL 60/60 marka post-cure fırınında post-cure işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.3).




Şekil 3.3: Hazırlanan test plakalarının postcure işlemine alındığı Vötsch VTL marka fırın.

Her kauçuk formülü ile üretilen numunelerin reometre testleri, SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan Alpha MDR 2000 marka rheometre cihazında (Şekil 3.4) gerçekleştirilmiştir.




Şekil 3.4: Rheometre testlerinin yapıldığı rheometre test cihazı.

Farklı PTFE katkılı üretilen FKM kauçuk disklerin sertlik değerleri, SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan Shore A tipi Zwick marka sertlik ölçüm cihazında belirlenmiştir. Şekil 3.9'da testlerde kullanılan sertlik ölçüm cihazının fotoğrafı verilmiştir.




Şekil 3.5: Shore A cinsinden ölçüm yapan Zwick marka test cihazı.

Yoğunluk testleri ise, SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan MD-300S marka yoğunluk ölçüm test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6.'da deneylerde kullanılan yoğunluk ölçüm test cihazı görülmektedir.



Şekil 3.6: Özgül ağırlık (yoğunluk) testlerinin yapıldığı yoğunluk ölçüm cihazı.

Çekme-Kopma ve yırtılma testlerinde çekme mukavemeti, elastiklik modülü, kopmadaki % uzama değerleri ile yırtılma mukavemeti değerlerinin belirlenmesi için SKT Yedek

Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan Zwick Z010 marka test cihazı (bakınız Şekil 3.7) kullanılmıştır.




Şekil 3.7: Çekme-kopma testlerinin yapıldığı çekme testi cihazı.

Farklı PTFE katkılı üretilen FKM kauçuk malzemelerin tribolojik deneyleri ise Şekil 3.8'de verilen ve SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan CETR marka silindir üzerinde blok olan (block-on-ring) triboloji cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8: Triboloji testlerinin yapıldığı Tribometre test cihazı.

Aşınma sonrası yüzeyler SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan Zeiss SmartZoom 5 marka optik mikroskop ile görüntüsü çekilmiştir.




Şekil 3.9: Zeiss SmartZoom 5 marka optik mikroskop görüntüsü.

## 3.2. Metod

### 3.2.1. Yarı mamül hazırlanması

Karbon siyahı katkılı florokarbon kauçuk kompoziti (FKM) ile 10, 20, 30 ve 40 phr birim poli-tetra-flor-etilen (PTFE) katkılı florokarbon kauçuk karışımı kompozit malzemeler ile diğer kimyasallar önce Farrel marka laboratuvar tipi bir açık karıştırıcı kullanılarak 920 saniye boyunca karıştırılmıştır.

Tablo 3.4: Deneyler için hazırlanan kompozit malzeme karışım oranları.

| Malzeme | FKM-PTFE-0 (phr) | FKM-PTFE-10 (phr) | FKM-PTFE-20 (phr) | FKM-PTFE-30 (phr) | FKM-PTFE-40 (phr) |
|---|---|---|---|---|---|
| Tecnoflon T 636 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Thermax Floform N990 | 30 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Elastomag 170 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Kezadol CH | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Tecnoflon FOR M1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Tecnoflon FOR M2 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| PTFE FLON 9013 FT-905 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| Toplam | 144,5 | 149,5 | 159,5 | 169,5 | 179,5 |

Sonra pişirici (Tecnoflon FOR M1 ve Tecnoflon FOR M2) ilave edilerek 370 saniye süresince karıştırma işlemine devam edilmiştir (bakınız Şekil 3.10). Hazırlanan hamurlar daha sonra 6 saat boyunca oda sıcaklığında şartlandırmaya tabii tutulmuştur.



Şekil 3.10: Laboratuvar tipi açık karıştırıcıda pişiricilerin ilave edilmesi.

### 3.2.2. Yarı mamül aşamasında yapılan testler

#### 3.2.2.1. Rheometre testi

Üretilen PTFE katkılı FKM kauçuk numunelerinin reometre testleri, SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan Alpha MDR 2000 marka rheometre cihazında (bakınız Şekil 3.11) ASTM D 5289 standardına uygun olarak yapılmıştır. Test 195 $^{o}$C ve 6 dakikada yapılmıştır.




Şekil 3.11: Rheometre testlerinin yapıldığı rheometre test cihazı.

Rheometre testinde genellikle aşağıdaki veriler elde edilir;

ML: Vulkanizasyon sırasında çapraz bağlanmanın başladığı noktadır. Aynı zamanda minimum tork değerini ifade eder. Nm. olarak gösterilir.

MH: Tork değeridir ve %100 pişmenin meydana geldiği noktadaki viskozitedir. Nm.olarak gösterilir.

$ts_2$: Pişmenin başladığı süreyi ifade eder.

$t_{50}$: %50 pişmenin meydana geldiği süreyi ifade eder.

$t_{90}$: %90 pişmenin meydana geldiği süreyi ifade eder.

### 3.2.3. Test plakalarının hazırlanması

Hazırlanan hamurlardan sertlik disklerini, çekme ve yırtılma test plakalarının ilgili standartlara uygun üretmek için SKT A.Ş.'nin kendi ürettiği hidrolik vulkanizasyon presi kullanılmıştır (Şekil 3.12). Preste 180ºC 'de 10 dakika boyunca diskler ve plakalar üretilmiş ve vulkanize edilmiştir.




Şekil 3.12: Disk ve plakaların basıldığı hidrolik vulkanizasyon presi.

ASTM D 2240 standardına uygun 6 mm kalınlığında ve 30 mm çapında sertlik diskleri, standart sertlik diski kalıbında 180 ºC 10 dakika vulkanize edilerek üretilmiştir (Şekil 3.13).

Benzer şekilde, 130mm x 135mm x 2 mm ölçüsündeki kauçuk levha halindeki test numuneleri de 180 ºC ve 10 dakikada vulkanize edilerek elde edilmiştir.



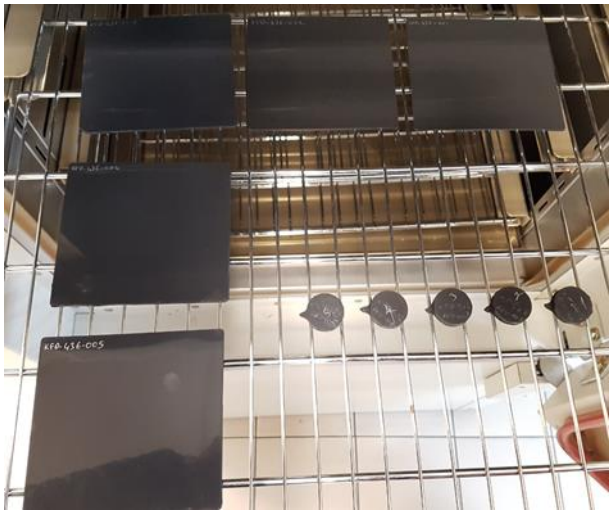
Şekil 3.13: ASTM D 2240 standardına uygun olarak hazırlanan sertlik diskleri.

Triboloji test numuneleri, 19,40x39,00x12,40 mm ölçülerinde özel vulkanizasyon kalıbında 180 $^{o}$C 10 dakika vulkanize edilerek üretilmişlerdir (bakınız Şekil 3.14).



Şekil 3.14: Triboloji test numuneleri.

Hazırlanan plakalar ve sertlik diskleri kademeli olarak ısıtılan VötschVTL 60/60 marka post-cure fırınında maksimum 230$^{o}$C sıcaklıkta 15 saat süre ile post-cure işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.15).



Şekil 3.15: Hazırlanan test plakalarının postcure işlemine alınması.

Daha sonra standartlara uygun kalıplar kullanılarak ASTM D412DieC standardına uygun çekme test numuneleri kauçuk levha üzerinden kesilerek hazırlanmıştır (bakınız Şekil 3.16).




Şekil 3.16: ASTM D412DieC standardına uygun, çekme testi için kaşık şeklince numuneler hazırlanmıştır.

Yırtılma test numuneleri ise plakalardan ASTM D624 Type B standardına uygun olacak şekilde hazırlanmış kalıp kullanılarak hazırlanmıştır (bakınız Şekil 3.17).



Şekil 3.17: ASTM D624 Type B standardına uygun yırtılma test numuneleri.

### 3.2.4. Mamül aşamasında yapılan testler

#### 3.2.4.1. Yoğunluk testi

Yoğunluk deneyi, malzemelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılan başlıca deney yöntemlerinden biridir. Bu tez çalışmasında yoğunluk deneyleri, ISO 2781'e uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri önce havada kuru halde ağırlığı alınmaktadır. Daha sonra saf su içerisindeki ağırlığı alındıktan sonra aralarındaki ağırlık farkından hacim hesaplanır. Havadaki kuru ağırlığın hacme bölünmesi ile yoğunluk değeri elde edilir. Bu deneyler SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan MD-300S marka yoğunluk testi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18.'de deneylerde kullanılan yoğunluk test cihazı gösterilmiştir.




Şekil 3.18: Deneylerde kullanılan yoğunluk ölçüm cihazı.

### 3.2.4.2. Sertlik testi

Üretilen kauçuk karışımı kompozit disklerin sertlik değerleri, SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan Zwick marka sertlik ölçüm cihazında belirlenmiştir. Sertlik değerleri Shore A cinsinden ölçülmüştür. Her bir numune üzerinden en az 5 farklı noktadan sertlik ölçümü alınmış olup, aritmetik ortalaması alınarak sertlik değeri belirlenmiştir. Sertlik ölçümü için ASTM D2240 standardı referans alınmıştır. Şekil 3.19'da testlerde kullanılan sertlik ölçüm cihazı gösterilmektedir. 6 mm kalınlığında ve 30 mm çapındaki sertlik diskleri üzerinden sertlik değeri alınmıştır.




Şekil 3.19: Shore A cinsinden ölçüm yapan Zwick marka test cihazı.

### 3.2.5. Çekme-kopma deneyi

Kauçuk kompozit malzemeler ASTM D412 DieC standardına uygun olarak kaşık numuneler üzerinden çekme mukavemeti, elastiklik modülü ve kopmadaki % uzama değerleri SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan Zwick Z010 marka (Şekil 3.20) test cihazında belirlenmiştir. Çekme testleri 0,1 MPa ön yükte, 500 mm/ dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için en az 3 faklı test yapılmış olup ve ortalama değerleri alınmıştır.




Şekil 3.20: Çekme-kopma testlerinin yapıldığı çekme testi cihazı.

### 3.2.6. Yırtılma deneyi

PTFE katkılı FKM esaslı kauçuk kompozit malzemeler ASTM D624 Type B standardına uygun olarak çentikli kaşık numuneler üzerinden yırtılma mukavemet değerleri SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan Zwick Z010 marka test cihazında (Şekil 3.20) belirlenmiştir. Deneyler, 0,1 Mpa ön yükte, 500 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için en az 3 faklı test yapılmış olup, elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

### 3.2.7. Triboloji deneyi

Tribolojik deneyler, SKT Yedek Parça ve Makine Tic. San. A.Ş. firmasında bulunan CETR marka (Şekil 3.21) çap Ø35 silindir üzerinde plaka aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan silindir malzeme DIN 1.2842 soğuk iş takım çeliği olup sertliği 45 HRC'dir. Uygulanan yük Z yönünde sabit tutulup, belirlenen sabit devirde mil dönmekte ve kauçuk kompozit numunesini aşındırmaktadır. Denklem 3.1'e göre hesaplanan sürtünme katsayısı değeri elde edilmektedir. Triboloji testi sırasında Optris marka termel kamera ile sürtünme yüzey sıcaklığı ölçülmektedir.

$$\text{Sürtünme katsayısı } (\mu) = \frac{Fs}{Fx} \tag{3.1}$$

Burada μ sürtünme katsayısını, Fs değeri sürtünme kuvvetini ve Fx değeri ise Z yönünde uygulanan normal kuvveti ifade etmektedir.

Triboloji testinde gidilen Yol mesafesini bulmak için denklem 3.2 kullanılmıştır.

$$\text{Yol} = (t)x(2\pi r)x\left(\frac{Dönme\ Sayısı}{1\ saniye}\right) \tag{3.2}$$

Burada t: test süresi (saniye), 2πr (mm): test milinin çevre ölçüsünü göstermektedir.

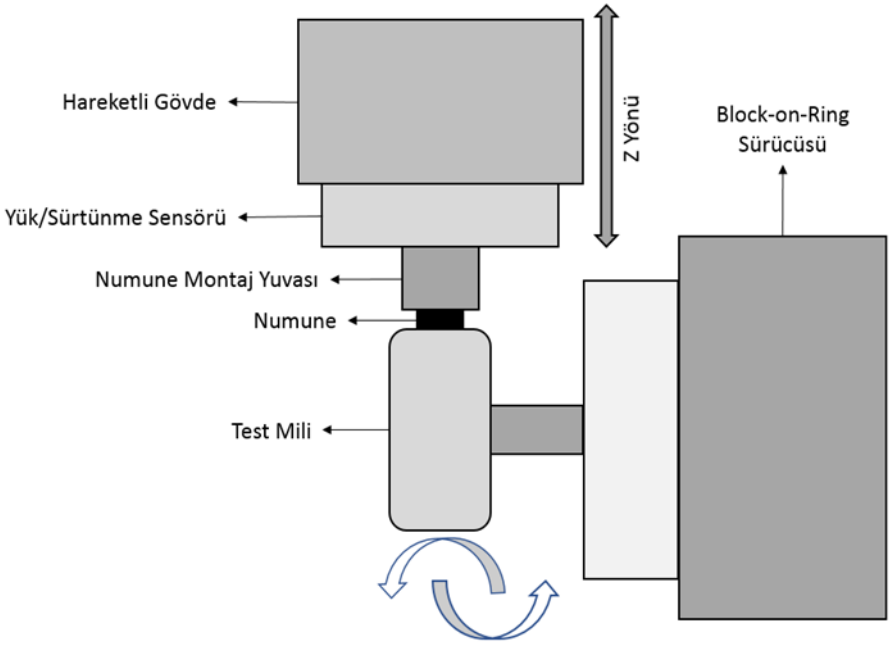


Şekil 3.21: Triboloji testlerinin yapıldığı Tribometre test cihazı.

Triboloji deneyleri 500 dev/dk ve 1000 dev/dk dönme hızlarında 15N ve 30N yükler altında 23ºC oda sıcaklığında ve kuru ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma öncesi (m1) ve sonrası (m2) numuneler Radwag AS 220 marka hassas tartıda tartılarak ağırlık farkları (Δm) tespit edilmiştir. Denklem 3.3'e göre aşınma miktarının hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma Miktarı} = \frac{(\Delta m)}{(\rho)x(F)x(Yol)} \tag{3.3}$$

Burada Δm: aşınma miktarı (g), ρ: numune yoğunluğu (g/cm$^3$), F: ise uygulanan yükü göstermektedir.




Şekil 3.22: Tribometre test cihazı şematik görünümü.

# BÖLÜM 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

## 4.1. Yarı Mamül Aşamasında Yapılan Test Sonuçları

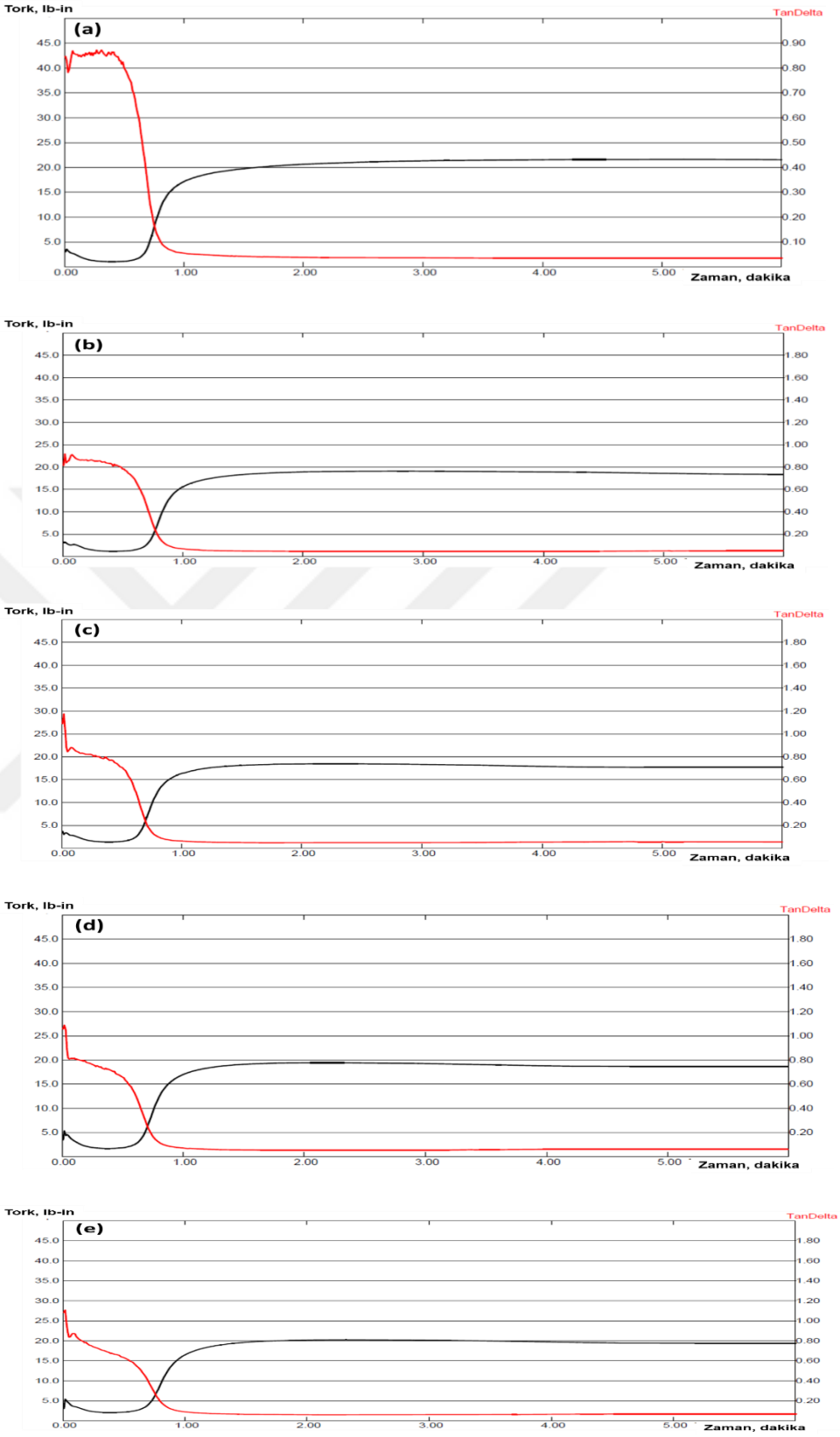
### 4.1.1. Rheometre test sonuçları

Tablo 4.1'de ASTM D5289 standardına uygun olarak yapılan rheometre deneyinde elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Deney MDR 2000 rheometre test cihazında 195ºC'de 6 dakika da yapılmıştır.

Tablo 4.1: ASTM D5289 standardına göre yapılan Rheometre deneyi sonuçları.

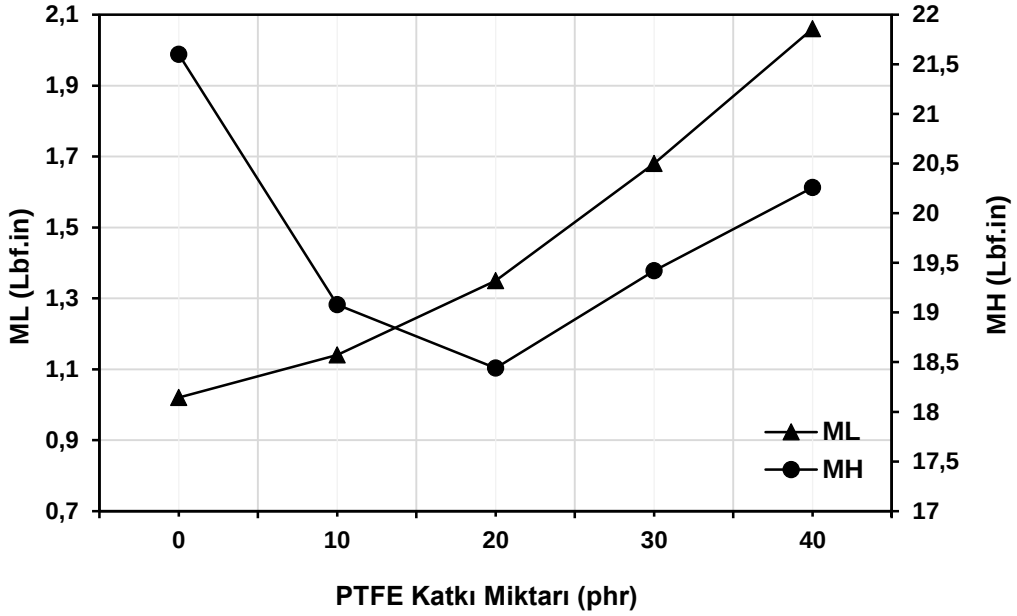
| Numune No | PTFE Katkı Miktarı (phr) | ML (Lbf.in) | MH (Lbf.in) | ts2 (dakika) | t90 (dakika) | t95 (dakika) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FKM-PTFE-0 | 0 | 1,02 | 21,60 | 0,68 | 1,43 | 1,96 |
| FKM-PTFE-10 | 10 | 1,14 | 19,08 | 0,72 | 1,2 | 1,44 |
| FKM-PTFE-20 | 20 | 1,35 | 18,44 | 0,65 | 1,05 | 1,23 |
| FKM-PTFE-30 | 30 | 1,68 | 19,42 | 0,65 | 1,07 | 1,25 |
| FKM-PTFE-40 | 40 | 2,06 | 20,26 | 0,7 | 1,19 | 1,4 |

Şekil 4.1.'de PTFE katkı miktarına göre, rheometre deneyi sonrası elde edilen reometre eğirisi grafikleri verilmektedir.




Şekil 4.1: Deneylerde kullanılan malzemelerin reometre eğrisi a)FKM b)FKM+10phr PTFE, c)FKM+20phr PTFE d)FKM+30phr PTFE e)FKM+40phr PTFE

Şekil 4.2.'de ASTM D5289 standardına uygun olarak yapılan rheometre deneyi sonrası FKM kauçuk malzemesinin ön pişme süresi ve %100 vulkanizasyon süresine PTFE katkısının etkisini göstermektedir.

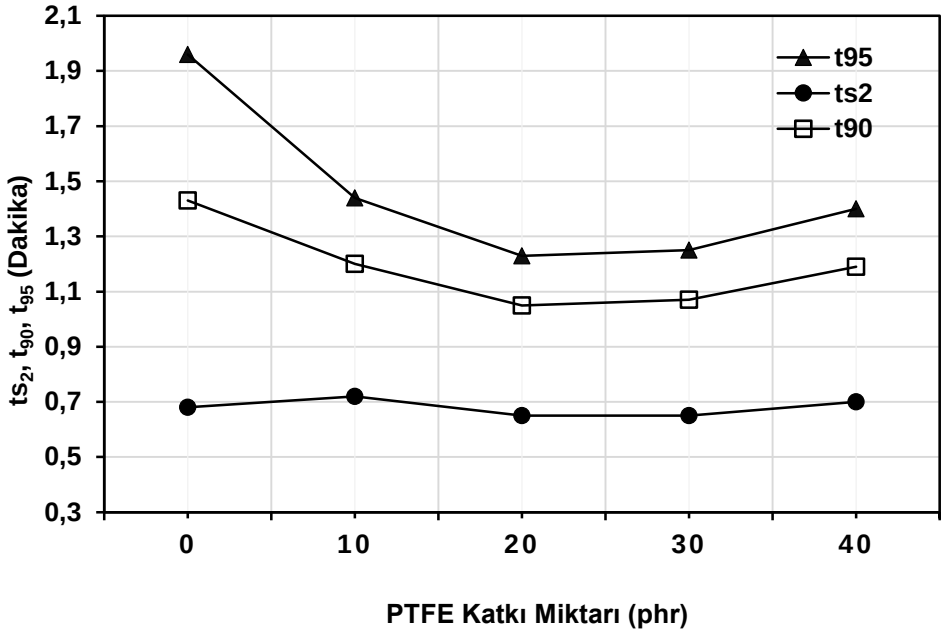



Şekil 4.2: FKM kauçuk malzemesinin PTFE katkı miktarı- MLve MH değeri ilişkisi.

Şekil 4.2 dikkatli bir şekilde incelendiğinde PTFE ilave arttıkça, ön pişmeye başladığı tork değerinin arttığı gözlenmiştir. PTFE katkısız FKM kauçuğunun ön pişmeye başladığı tork değeri 1,02 Lbf.in iken 40phr PTFE ilavesi ile 2,06 Lbf.in olmuştur.

Yine Şekil 4.2 incelendiğinde PTFE katkısız FKM kauçuğundan 20 phr PTFE ilavesine kadar MH değerinde belirgin bir azalma tespit edilmiştir. Bu değer 21,6 Lbf.in'den 18,44 Lbf.in seviyesine azalmıştır. Ancak 20 phr ve 40 phr oranındaki PTFE katkılı kauçuk MH değerinde artış gözlenmektedir.

Şekil 4.3. ASTM D5289 standardına uygun olarak yapılan rheometre deneyi sonucunda elde edilen $ts_2$, $t_{90}$ ve $t_{95}$ değerlerinin PTFE katkı miktarı ile ilişkisini göstermektedir.




Şekil 4.3: FKM kauçuk malzemeye PTFE katkısının $ts_2$, $t_{90}$ ve $t_{95}$ değerine etkisi.

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere; $ts_2$ değerinin PTFE katkı miktarı arttıkça, fazla değişim göstermediği görülmektedir. 10 phr PTFE miktarı eklenmesine kadar $ts_2$ değerinin bir miktar artıp, 0,72 dakika değerine yükselmesine karşın 40 phr PTFE katkı miktarına kadar bu değerin 0,70 dakika olduğu görülmektedir. Bu değerlerin süre olarak anlamlı bir veri farkı yaratmamaktadır.

Şekil 4.3'de aynı zamanda $t_{90}$ değerinin de 20 phr PTFE katkı miktarına kadar azaldığı ve 1,05 dakika değerine kadar düştüğü tespit edilmiştir. Fakat PTFE miktarı 20 phr oranından sonra arttıkça bu değer yükselme eğilimine girmiş olup, 40 phr PTFE katkı miktarında $t_{90}$ değerinin yükselerek 1,19 dakikaya ulaşmıştır. Aynı şekilde $t_{95}$ değeri de tıpkı $t_{90}$ değeri gibi davranış sergilemiş olup, 20 phr PTFE katkı miktarına kadar azalma eğilimindeyken, 40 phr PTFE miktarına doğru tekrardan artış eğilimine girmiş ve 1,4 dakika değerine ulaşmıştır. Elde edilen $t_{95}$ ve $t_{90}$ süre değerleri literatürde yapılan araştırmalarla [11,15] benzerlik göstermiştir. Literatür çalışmalarında PTFE katkılı EPDM kauçuğunun $t_{90}$ ve $t_{95}$ değerinde görülmektedir.

## 4.2. Mamul Aşamasında Yapılan Test Sonuçları

### 4.2.1. Fiziksel testler

#### 4.2.1.1. Yoğunluk testi

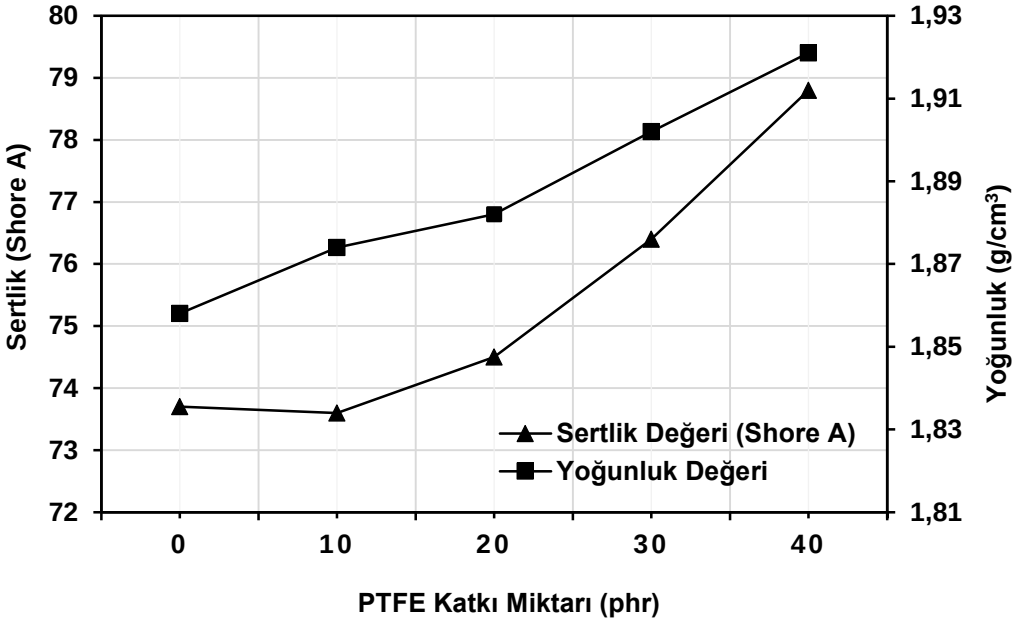
Deneylerde kullanılan FKM esaslı kauçuk kompozit numunelerin ISO 2781 standardına uygun olarak yapılan yoğunluk testlerinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: ISO 2781'e göre yapılan Yoğunluk testi sonuçları.

| Özellikler / Numune Adı | PTFE Katkı(phr) | Sertlik (Shore A) | Yoğunluk (g/cm$^3$) |
|---|---|---|---|
| FKM-PTFE-0 | 0 | 73,7 | 1,858 |
| FKM-PTFE-10 | 10 | 73,6 | 1,874 |
| FKM-PTFE-20 | 20 | 74,5 | 1,882 |
| FKM-PTFE-30 | 30 | 76,4 | 1,902 |
| FKM-PTFE-40 | 40 | 78,8 | 1,921 |

- Deney malzemelerinin yoğunluk değeri ile PTFE katkı miktarı ilişkisi

Şekil 4.4.'de ISO 2781 standardına uygun olarak yapılan yoğunluk test sonuçlarının PTFE katkı miktarı ile ilişkisini gösteren grafik verilmektedir.




Şekil 4.4: FKM kauçuk malzemeye PTFE katkısının sertlik ve yoğunluk değerine etkisi.

Şekil 4.4'de FKM kauçuk malzemesine PTFE eklenmesi ile yoğunluk değerindeki değişim görülmektedir. PTFE katkısı ilave edilmesi ile yoğunluk değerinde artış görülmekte olup, PTFE katkısız FKM kauçuğunun yoğunluk değeri 1,858 g/cm$^3$ iken, 40 phr PTFE eklenmesi ile yoğunluk değeri 1,921 g/cm$^3$ değerine yükselmiştir. Bu yoğunluk artışın sebebi ise olan PTFE katkının yoğunluğunun 2,2 g/cm$^3$ olması yani yüksek olmasından dolayıdır.

#### 4.2.1.2. Sertlik testi

Tablo 4.1.'de ASTM D2240 standardına uygun olarak yapılan sertlik deneyinde elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Sertlik deneyleri Zwick marka Shore A sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde her malzeme için en az beş sertlik ölçümü yapılmış olup, elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır.

- Deney malzemelerinin sertlik değeri ile PTFE katkı miktarı ilişkisi

Şekil 4.4.'de ASTM D2240 standardına uygun olarak yapılan sertlik deneyi sonuçlarının FKM-CB kompoziti bünyesindeki PTFE katkı miktarı ile ilişkisini gösteren grafik verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi PTFE katkı miktarı arttıkça numunelerin sertlik

değeri artmakta ve 40 phr PTFE katkısında sertlik değerinin 78,8 Shore A olduğu tespit edilmiştir. Benzer bulgular, EPDM gibi diğer ana polimer kauçuk kompozitlerinde [1], [11,15] olduğu gibi PTFE eklenmesi ile sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

### 4.2.2. Mekanik testler

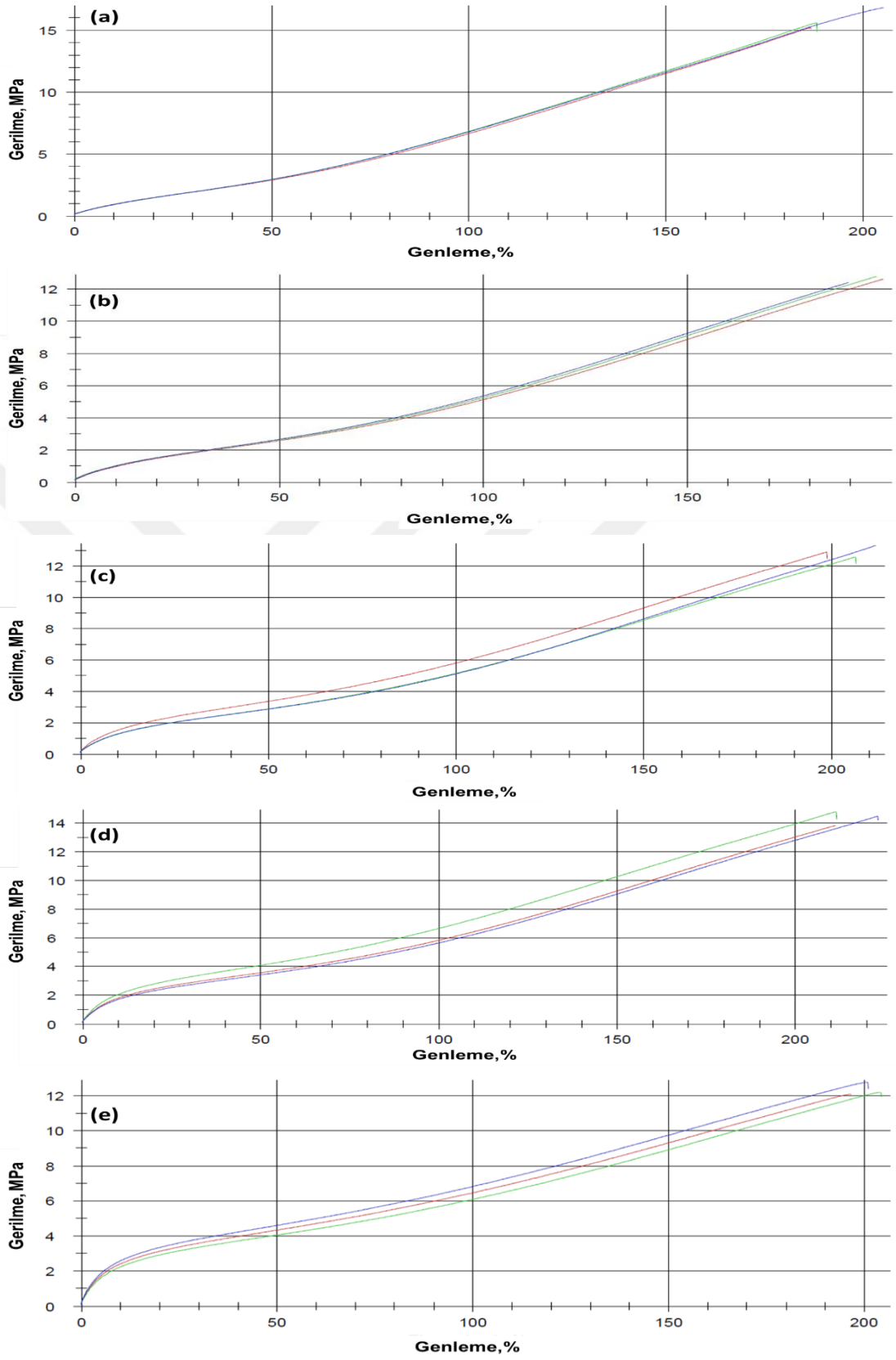
#### 4.2.2.1. Çekme testi

FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit numunelerin çekme deneyleri ASTM D412 DieC standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çekme deneylerinin sonucunda, deney malzemelerinin kopma mukavemeti, kopmadaki % uzama miktarı, %5 uzamadaki elastiklik modülü değerleri ve %100 uzamadaki elastiklik modülü değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra, bu değerlerin PTFE katkı miktarı ile ilişkileri incelenmiştir. Çekme deneyleri 0,1 MPa ön yükte, 500 mm/dk çekme hızında ve Zwick Z010 çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3: Deney numunelerinin çekme-kopma ve yırtılma deneyi sonuçları.

| Numune No | PTFE Katkı Miktarı (phr) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Kopmadaki uzama Miktarı (%) | %5 Uzamada Elastik Modülü (MPa) | % 100 Uzamada Elastik Modulü (MPa) | Yırtılma Mukavemeti (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FKM-PTFE-0 | 0 | 15,9 | 193 | 11,9 | 6,8 | 27,39 |
| FKM-PTFE-10 | 10 | 12,6 | 194 | 13,29 | 5,2 | 27,86 |
| FKM-PTFE-20 | 20 | 12,9 | 206 | 18,46 | 5,4 | 29,54 |
| FKM-PTFE-30 | 30 | 14,4 | 215 | 25,67 | 6 | 38,08 |
| FKM-PTFE-40 | 40 | 12,3 | 200 | 34,67 | 6,4 | 39,03 |

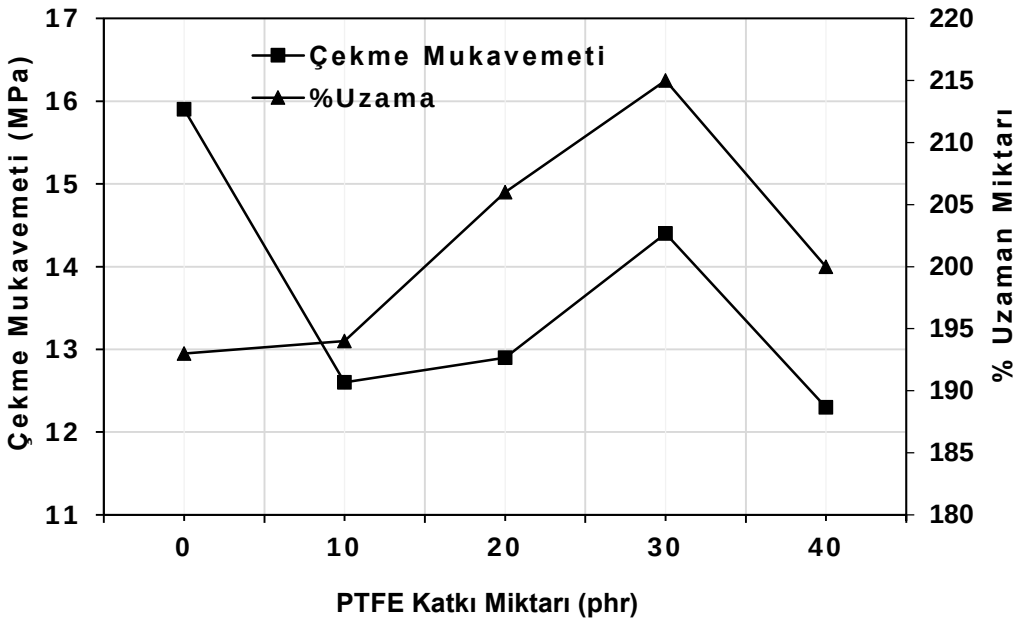
Deneylerde üretilen her bir kauçuk malzeme için en az üç çekme test numunesi kullanılmış olup elde edilen sonuçların aritmatik ortalaması alınmıştır. Tablo 4.3'de sonuçlar gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 4.5'de farklı PTFE katkı miktarlarına göre hazırlanan FKM-CB kompozit malzemelerin gerilme-genleme grafikleri verilmektedir.




Şekil 4.5: Deneylerde kullanılan malzemelerin gerilme genleme ilişkisi a)FKM b)FKM+10phr PTFE, c)FKM+20phr PTFE d)FKM+30phr PTFE e)FKM+40phr PTFE

– Deney malzemelerinin çekme mukavemeti ile PTFE katkı miktarı ilişkisi

Tablo 4.3.'de ASTM D412 DieC standardına uygun olarak hazırlanan çekme numunelerinin çekme deneyi sonucunda elde edilen çekme mukavemeti sonuçları verilmiştir. Şekil 4.6'da PTFE katkı miktarı ile Çekme mukavemeti ve % uzama değerlerini gösteren grafik verilmektedir.



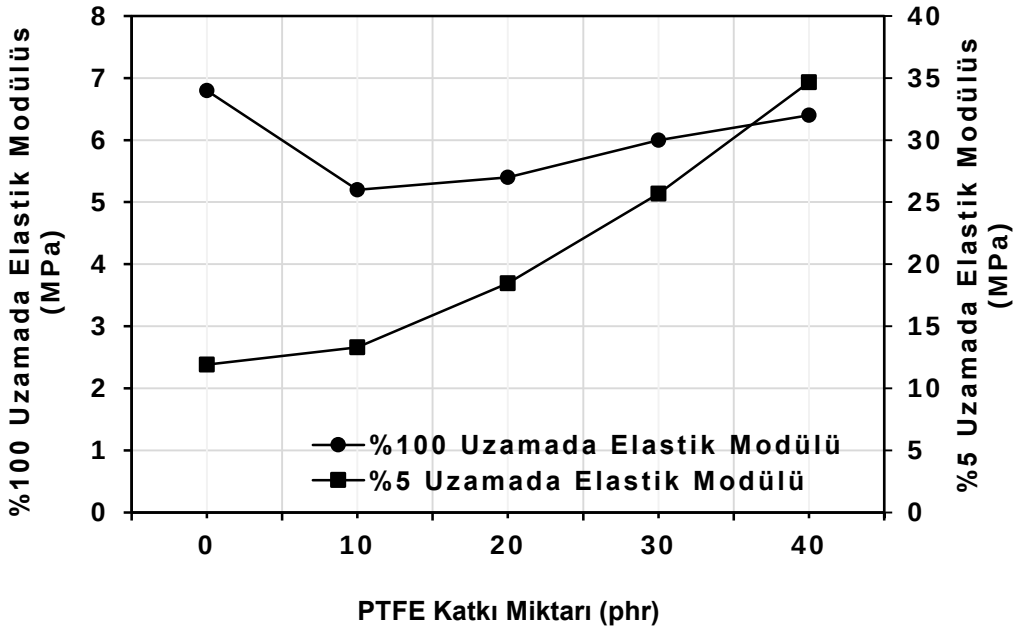

Şekil 4.6: FKM kauçuk malzemeye PTFE katkının Çekme mukavemetine etkisi

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi PTFE katkı miktarı 10 phr oluncaya kadar çekme dayanımı azalmakta ve 15,9 MPa'dan 12,6 MPa'a düşmektedir. Sonrasında 30 phr PTFE miktarına kadar çekme dayanımı yükselmiş olup, 14,4 MPa olmuştur. 40 phr PTFE'de bu değer aniden düşmüş ve 12,3 MPa olarak ölçülmüştür. Literatür incelemeleri sonucunda çekme dayanımı ile ilgili bu sonuçlara benzer olarak, EPDM kauçuğu bünyesine 1 mikrometre partükül boyutunda PTFE ilave edildiğinde 18 phr'a kadar hafif artış olurken, 18 phr'dan sonra çekme dayanımında ani artış gözlenmiş ve 24 phr PTFE katkısına kadar yükselmeye devam etttiği tespit edilmiştir [11].

% uzama miktarı için Şekil 4.6 incelendiğinde ise; 10 phr PTFE'ye kadar pek bir artış gözlenmezken, 10 phr'dan 30 phr'a kadar ani bir yükselme görülmüş ve 30 phr'da bu

değer %215 olmuştur. 40 phr'da %uzama değeri azalma eğilimi göstermiş ve uzama değeri, %200'e düşmüştür. Benzer bir şekilde literatür çalışmalarında ise; EPDM kauçuk bünyesine 5 mikrometre partikül boyutlu PTFE katkısında % uzama miktarı 12 phr PTFE katkısına kadar artmış ve sonrasında düştüğü ifade edilmiştir. Literatürde benzer sonuçlar [15] tespit edilmiş olup ışın demetine maruz kalmayan PTFE katkılı EPDM kauçuk karışımında da 10 phr PTFE katkısına kadar % uzama değerinde artış gözlenmiş, 50 phr PTFE katkılı EPDM karışımına kadar bu değerin azaldığı görülmüştür.

Deney malzemelerinin %100 uzamadaki elastik modülü değeri ve %5 uzamadaki elastik modülü değerleri ile PTFE katkı miktarı ilişkisi Şekil 4.7'de verilmektedir.



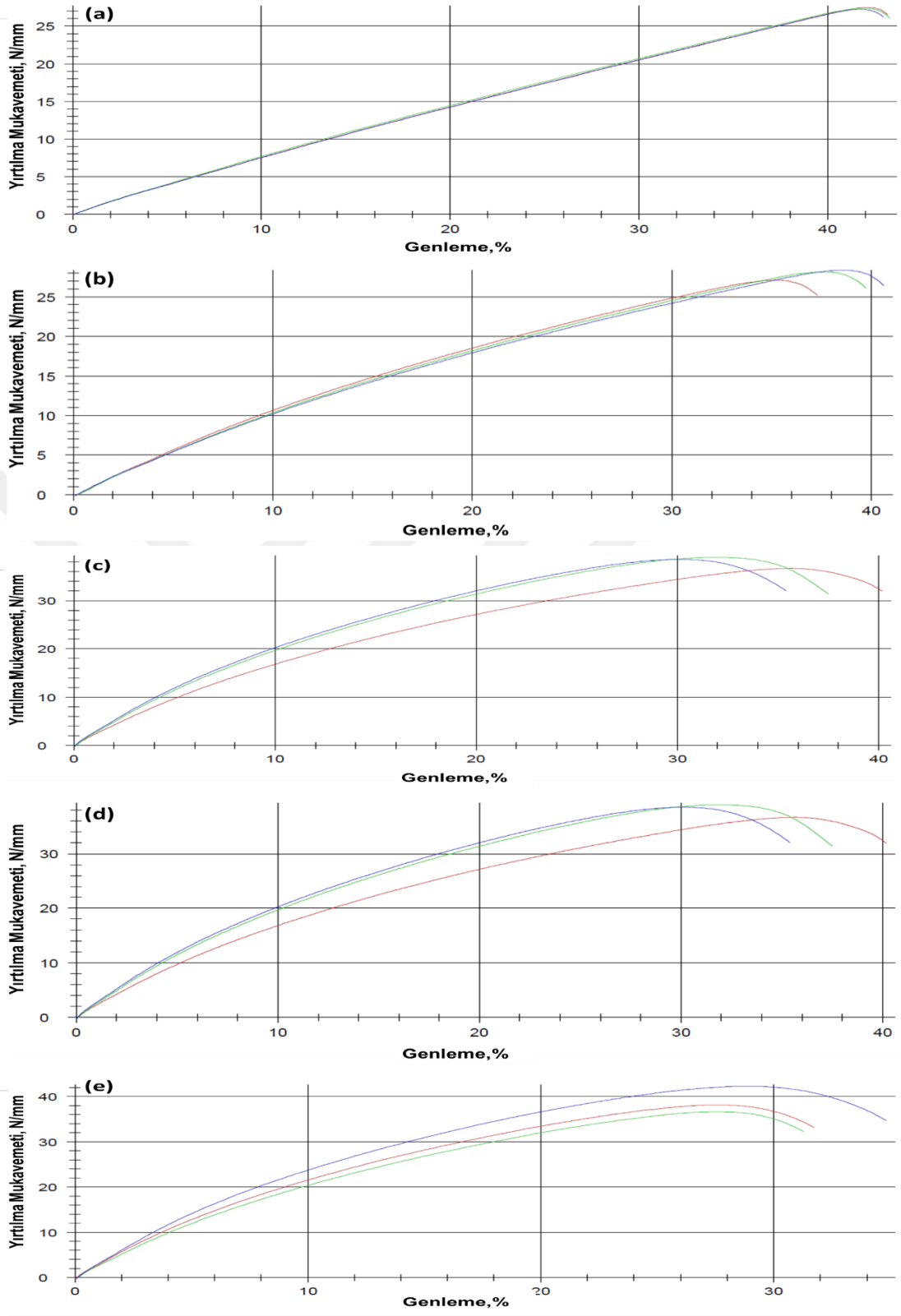

Şekil 4.7: FKM kauçuk malzemeye PTFE katkının %100 ve %5 uzamadaki elbastik modülü değerine etkisi.

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi FKM-CB kauçuk kompoziti bünyesindeki PTFE katkı miktarı arttıkça %5 uzamadaki elastik modülü değeri artmış olup, 40 phr'da bu değer 11,9 MPa'dan 34,67 MPa değerine aniden yükselmiştir. Rijitlikteki bu artışın sebebi ise FKM kauçuk malzeme sertliğine göre PTFE sertliğinin daha fazla olması ile açıklanabilir. Aynı şekilde %100 uzamadaki elastik modülü değerinin 10 phr'a kadar düştüğü ve 5,2 MPa değerine inmesine rağmen, PTFE miktarı artmaya devam ettikçe bu %100 uzamadaki

elastik modülüs değerinin arttığı ve 40 phr'da 6,4 MPa olduğu tespit edilmiştir. Literatür incelendiğinde ise [15]; %100 uzamadaki modülü değeri, ışın demetine maruz kalmayan PTFE karışımları içinde 30 phr PTFE katkılı karışıma kadar artmakta ve 40 phr PTFE katkılı karışımda düşüp, 60 phr katkısına kadar tekrar artmaktadır.

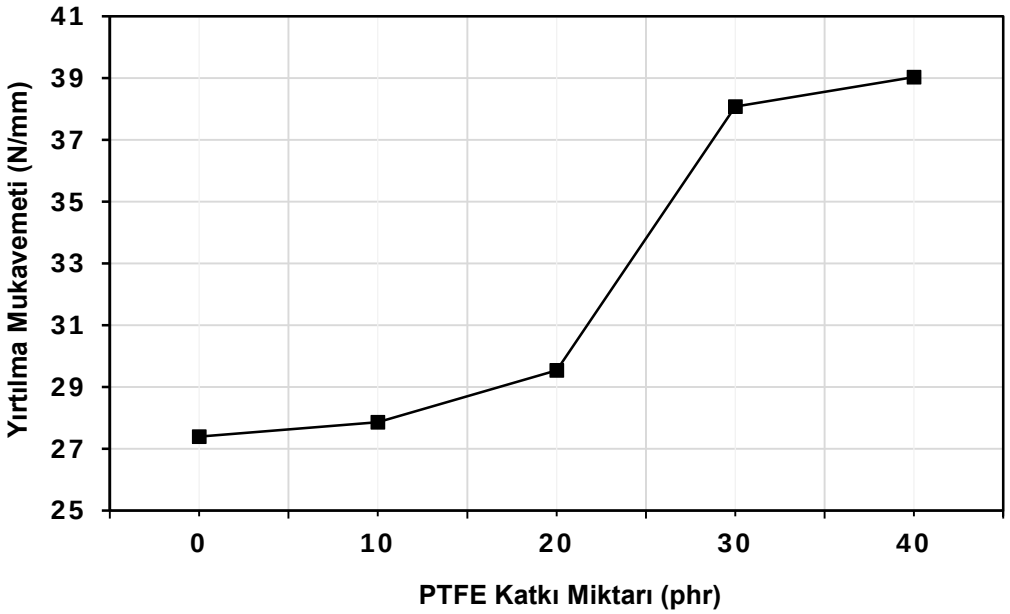
#### 4.2.2.2. Yırtılma testi

ASTM D624 Type B standardına uygun olarak hazırlanan FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit numunelerin yırtılma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen yırtılma deneylerinin sonucunda, deney malzemelerinin yırtılma mukavemeti değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra, bu değerlerin PTFE katkı miktarı ile ilişkileri incelenmiştir. Yırtılma deneyleri 0,1 MPa ön yükte, 500 mm/dk çekme hızında Zwick Z010 çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde her bir kompozisyon için en az üç çekme test numunesi kullanılmış olup elde edilen deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Tablo 4.3'de elde edilen yırtılma test sonuçları verilmiştir. Şekil 4.8'de ise PTFE miktarına göre FKM-CB kauçuk kompozit malzemelerin yırtılma mukavemeti-%genleme grafikleri verilmektedir.




Şekil 4.8: Deneylerde kullanılan malzemelerin Yırtılma mukavemeti-genleme ilişkisi a)FKM b)FKM+10phr PTFE c)FKM+20phr PTFE d)FKM+30phr PTFE e)FKM+40phr PTFE

Deney malzemelerinin yırtılma mukavemeti ile PTFE katkı miktarına olan ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmektedir.




Şekil 4.9: FKM-CB kauçuk kompozitlerin PTFE katkı miktarı-yırtılma mukavemeti ilişkisi

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, FKM-CB kauçuk kompozitindeki PTFE katkı miktarı arttıkça yırtılma mukavemeti değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. PTFE katkı miktarı 20 phr'a kadar yırtılma mukavemeti artmış olup 29,54 N/mm olarak ölçülmüştür. 20 phr PTFE katkısından sonra bu değeri ani olarak yükselip 40 phr PTFE katkısında 39,03 N/mm değerine ulaştığı görülmüştür. Literatürde benzer sonuçlara [12] rastlanmıştır. Benzer sonuçlar silikon kauçuk içerisine 5 mikrometre partikül boyutunda PTFE katkısı ilave edildiğinde, PTFE katkı miktarının artmasıyla Silikon-PTFE kauçuk karışımının yırtılma mukavemetinin de arttığı ifade edilmiştir.

### 4.2.3. Triboloji testleri

Gerçekleştirilen triboloji testleri sonucunda, FKM-CB-PTFE kauçuk kompozitlerinin sürtünme katsayısı (CoF), sürtünme yüzey sıcaklığı ve aşınma miktarı değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra, bu değerlerin PTFE katkı miktarı ile ilişkileri incelenmiştir.

Triboloji deneyleri, Tablo 4.4. verilen koşullar altında kuru kayma şartlarında Cetr marka tribometre ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.4: Triboloji deney koşulları.

| Sıra No | Dönme Hızı (dev/dak) | Uygulanan Yük (N) | Süre (dakika) | Yol (m) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 500 | 15 | 20 | 1100 |
| 2 | 500 | 30 | 20 | 1100 |
| 3 | 1000 | 15 | 10 | 1100 |
| 4 | 1000 | 30 | 10 | 1100 |

#### 4.2.3.1. Deney malzemelerinin sürtünme katsayısı (CoF) değeri ile ptfe katkı miktarı ilişkisi

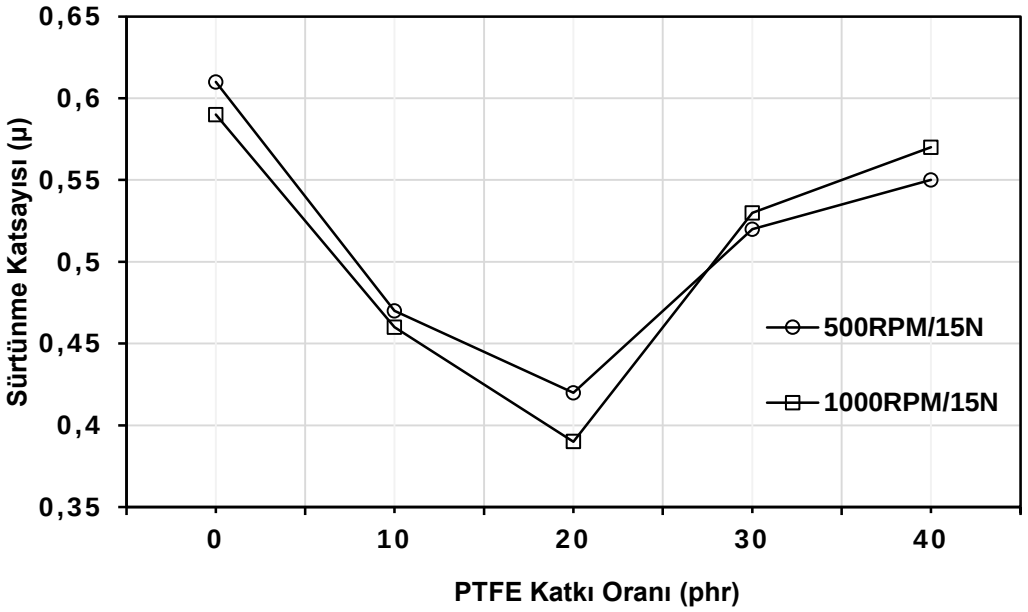
Tablo 4.5.'de 15 N yük altında ve farklı hızlarda çalışan FKM-CB kauçuk kompozitindeki PTFE katkı miktarına bağlı değişen numunelerin triboloji deneyinde elde edilen sürtünme katsayısı deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.5: Farklı test hızlarında ve 15 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

| Malzemeler<br>Test Koşulları | FKM-PTFE-0 | FKM-PTFE-10 | FKM-PTFE-20 | FKM-PTFE-30 | FKM-PTFE-40 |
|---|---|---|---|---|---|
| 500 dev/dak | 0,61 | 0,47 | 0,42 | 0,52 | 0,69 |
| 1000 dev/dak | 0,59 | 0,46 | 0,39 | 0,53 | 0,57 |

Şekil 4.10'da 500 dev/dak ve 1000 dev/dak test hızlarında, 15 N sabit yük altında 1100 m kayma yolunda yapılan triboloji deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin PTFE katkı miktarına etkisi gösterilmektedir. 15 N sabit yük altında iki farklı hızda sürtünme katsayısı değeri 20 phr PTFE katkısına kadar ani düşme eğilimi gözlenirken, 20 phr PTFE katkısından sonra ise ani olarak arttığı tespit edilmiştir. 20 phr PTFE katkılı kompozit malzemede 15N yük altında 500 dev/dak hızda sürtünme katsayısı 0,61 değerinden 0,42 değerine düşerken, 1000 dev/dak hızda 0,59 değerinden 0,39 değerine düşme göstermiştir. 20 phr PTFE katkı miktarı arttıkça 500 ve 1000 dev/dak hız koşullarında sürtünme katsayısı değeri ani olarak artmaya başlamıştır. 40 phr PTFE

katkısında bu değer 500 dev/dak hız için 0,55 iken, 1000 dev/dak hız için ise 0,57 olarak tespit edilmiştir.



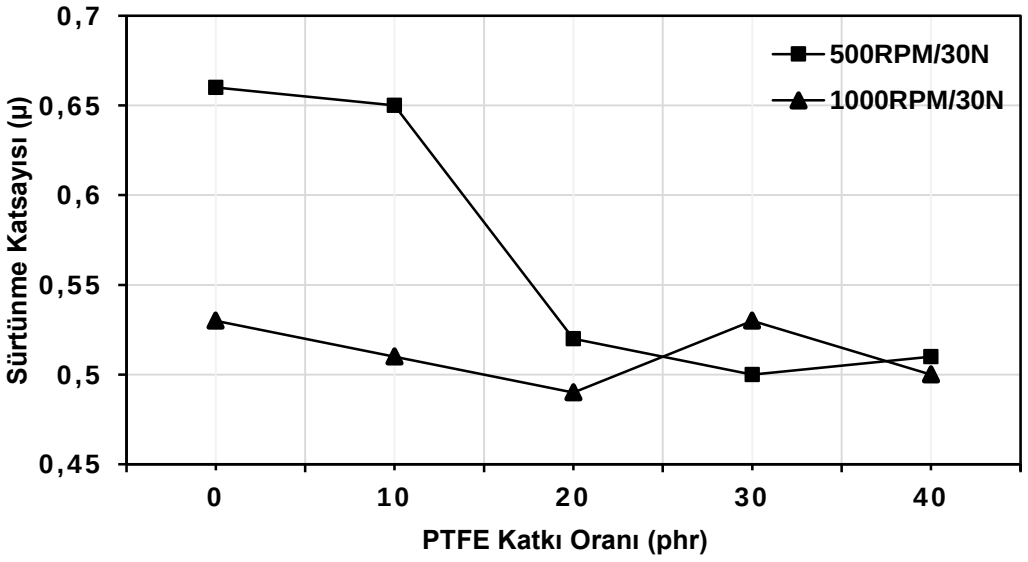

Şekil 4.10: FKM-CB kauçuk kompozit malzemesinin PTFE katkısına bağlı olarak 15 N yük altındaki ve farklı hızlardaki sürtünme katsayısı ilişkisi.

Tablo 4.6.'da 500 dev/dak ve 1000 dev/dak test hızlarında, 30 N sabit yük altında 10 dakika ve 20 dakikada yapılan triboloji deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin PTFE katkı miktarına etkisi gösterilmektedir. Literatür incelemesinde ise; PTFE'nin hızın artması ile sürtünme katsayısının belirli bir hız değerine kadar azaldığı ve daha sonra tekrar arttığı [14] görülmektedir. Aynı şekilde PTFE miktarının artması ile belirli bir içerik miktarına kadar sürtünme katsayısının düştüğü ve tekrar artmaya başladığı karbon siyahı katkılı yağsız EPDM-PTFE kompozit malzemesinde [16] görülmektedir. Benzer sonuçlar diğer çalışmalarda [15] da görülmektedir.

Tablo 4.6: Farklı test hızlarında ve 30 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

| Malzemeler / Test Koşulları | FKM-PTFE-0 | FKM-PTFE-10 | FKM-PTFE-20 | FKM-PTFE-30 | FKM-PTFE-40 |
|---|---|---|---|---|---|
| 500 dev/dak | 0,66 | 0,65 | 0,52 | 0,50 | 0,51 |
| 1000 dev/dak | 0,53 | 0,51 | 0,49 | 0,53 | 0,50 |

Şekil 4.11'da 500 ve 1000 dev/dak. test hızlarında, 30 N sabit yük altında 1100 metre kayma yolu boyunca yapılan triboloji deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin PTFE katkı miktarına etkisi gösterilmektedir. Yükün 30N'a artırılması ile 500 dev/dak hızda 30 phr PTFE katkısına kadar sürtünme katsayısı değerinde azalma görülmekte ve 0,66'dan 0,50 değerine düşme gözlenmiştir. 30 phr PTFE katkısından sonra sürtünme katsayısına pek bir artış görülmemiş olup, 40 phr PTFE katkısında bu değer 0,51 olarak ölçülmüştür. 30 N yük altında ve 1000 dev/dak hızda sürtünme katsayısı değeri 20 phr PTFE'ye kadar azalmakta ve 0,53 'den 0,49 değerine düşerken, 30 phr'da 0,53 ve 40 phr'da 0,50 değeri elde edilmiştir.




Şekil 4.11: FKM-CB kauçuk kompozit malzemesinin PTFE katkısına bağlı olarak 30 N yük altındaki ve farklı hızlardaki sürtünme katsayısı ilişkisi.

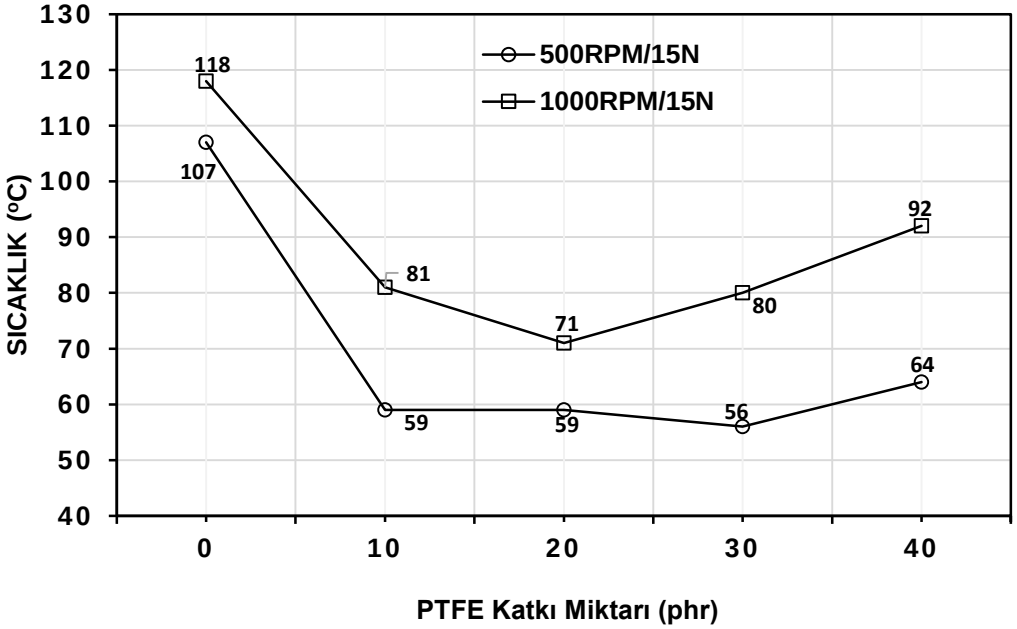
### 4.2.3.2. Deney malzemelerinin maksimum sürtünme yüzey sıcaklık değeri ile PTFE katkı miktarı ilişkisi

Tablo 4.7.'de deneylerde kullanılan FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 15N sabit yük altındaki triboloji deneylerinde elde edilen maksimum sürtünme yüzey sıcaklığı sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 4.7: Farklı test hızlarında ve 15 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen maksimum sürtünme sıcaklık değerleri (ºC).

| Malzemeler<br>Test Koşulları | FKM-PTFE-0 | FKM-PTFE-10 | FKM-PTFE-20 | FKM-PTFE-30 | FKM-PTFE-40 |
|---|---|---|---|---|---|
| 500 dev/dak | 107 | 59 | 59 | 56 | 64 |
| 1000 dev/dak | 118 | 81 | 71 | 80 | 92 |

Şekil 4.12'de 500 dev/dak ve 1000 dev/dak test hızlarında 15 N yük altında 10 dakika ve 20 dakika süre ile yapılan triboloji deneylerinde elde edilen maksimum sürtünme sıcaklık değerlerinin PTFE katkı miktarına bağlı olarak etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.12 dikkatli bir şekild incelendiğinde 15N yük altında 20 phr PTFE katkısına kadar kauçuk kompozitlerin sürtünme sıcaklığı maksimum değerinin azaldığı görülmekte olup 500 dev/dak ve 1000 dev/dak hızlarında sırasıyla 59 ºC ve 71 ºC olarak tespit edilmiştir. 20 phr ile 40 phr değerleri arasında maksimum sürtünme sıcaklık değerlerinin de yükseldiği gözlenmiştir ve 40 phr PTFE katkısında ve 500 dev/dak ve 1000 dev/dak hızlarında sırasıyla 64 ºC ve 92 ºC sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak, FKM esaslı kompozit malzemelerin 1000 dev/dak hızdaki yüzey sıcaklık değerleri, 500 dev/dak hızdaki yüzey sıcaklık değerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatür araştırmaları sonucunda daha önce yapılan bir çalışmada [8], kayma hızının artması ile kauçuk malzeme temas yüzeyi sıcaklığının arttığı ifade edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar, literatürde gerçekleştirilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.




Şekil 4.12: FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 15 N yük altındaki ve farklı hızlardaki maksimum yüzey sıcaklık değerleri.

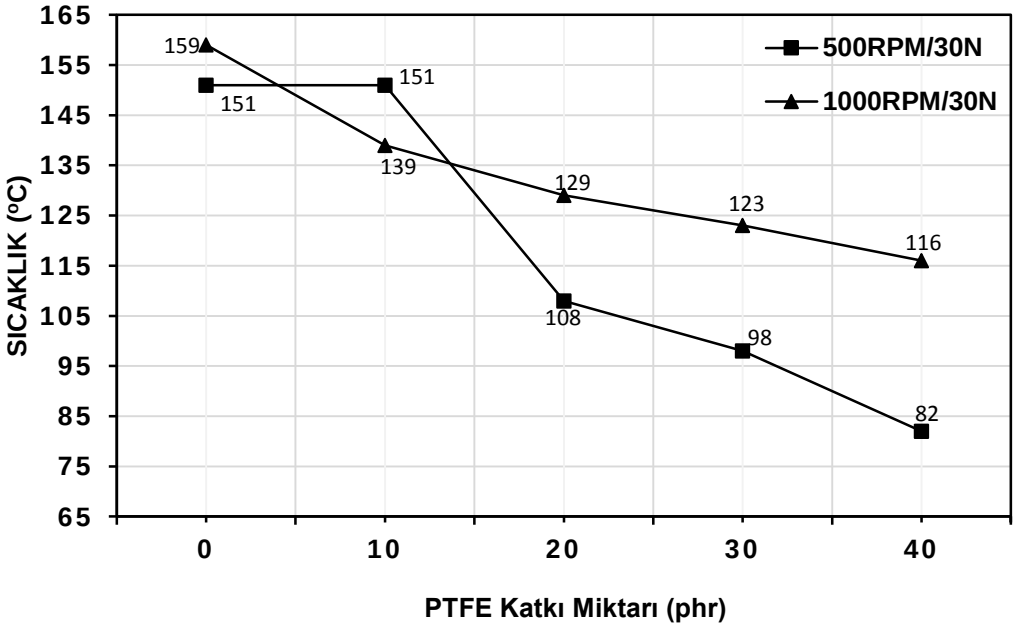
Tablo 4.8.'de FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 30N yük altındaki triboloji deneylerinde elde edilen maksimum yüzey sürtünme sıcaklık değerleri verilmektedir.

Tablo 4.8: Farklı test hızlarında ve 30 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen maksimum yüzey sürtünme sıcaklık değerleri (°C).

| Malzemeler | FKM-PTFE- | FKM-PTFE- | FKM-PTFE- | FKM-PTFE- | FKM-PTFE- |
|---|---|---|---|---|---|
| Test Koşulları | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 500 dev/dak | 151 | 151 | 108 | 98 | 82 |
| 1000 dev/dak | 159 | 139 | 129 | 123 | 116 |

Şekil 4.13'de 500 dev/dak ve 1000 dev/dak test hızlarında, 30 N sabit yük altında 10 dakika ve 20 dakikada yapılan triboloji deneylerinde elde edilen maksimum sürtünme yüzeyi sıcaklık değerlerinin PTFE katkı miktarına bağlı etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.13 incelendiğinde ise; 30N yük altında 40 phr PTFE katkısına kadar sürtünme yüzey sıcaklık maksimum değerinin sürekli azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. 500 dev/dak. hız değerinde katkısız FKM karışımı ile 10 phr PTFE karışımında yüzey sıcaklık değeri 151 °C iken, 40 phr PTFE katkısına kadar ani olarak düşmekte olup, 40 phr PTFE katkılı kauçuk karışımında maksimum sürtünme yüzey sıcaklık değeri 82 °C olmuştur. Benzer

olarak 1000 dev/dak. kayma hızında ise 159 ºC'den 116 ºC'ye kadar sıcaklığın düştüğü görülmektedir.




Şekil 4.13: FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 30 N yük altındaki ve farklı hızlardaki maksimum yüzey sıcaklık değerleri.

### 4.2.3.3. Deney malzemelerinin spesifik aşınma oranı ile PTFE katkı miktarı ilişkisi

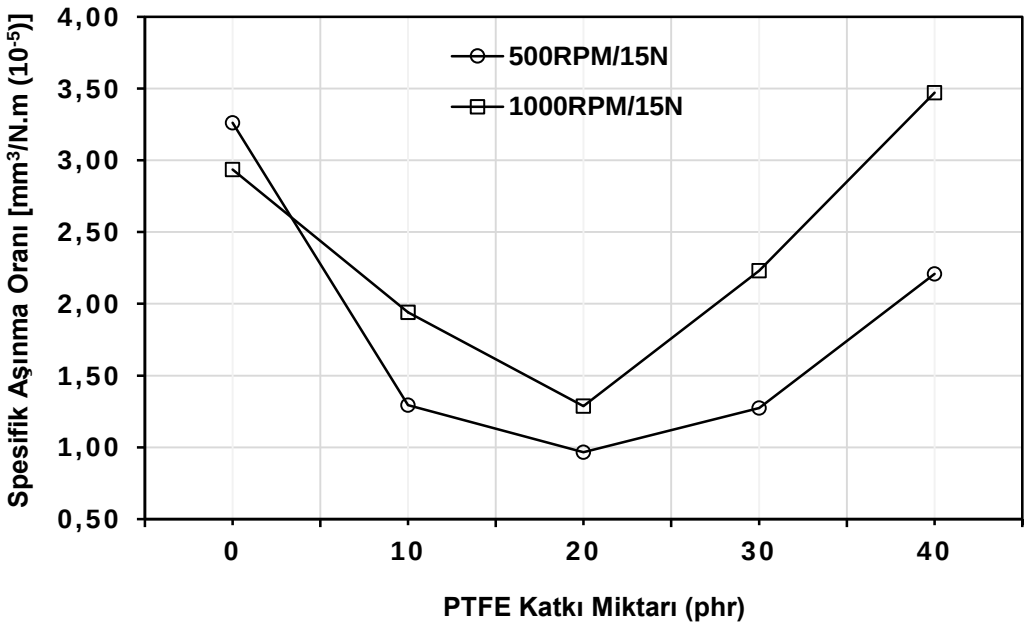
Tablo 4.9.'da FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 15N yük altındaki ve farklı hızlardaki triboloji deneyleri sonucunda elde edilen maksimum sürtünme yüzey sıcaklık sonuçları gösterilmektedir.

Şekil 4.14'de FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 15 N sabit yük altında ve 500 dev/dak. ile 1000 dev/dak test hızlarındaki spesifik aşınma oranı değerlerinin PTFE katkı miktarına etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.14'de aşınma oranının 15N yük altında 500 dev/dak ile1000 dev/dak hızlarda benzer karakteristlik gösterdiği ve 20 phr PTFE katkısına kadar azaldığı, 20 phr ile 40 phr arasında yeniden yükseldiği görülmektedir.

Tablo 4.9: FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 15N yük altında ve farklı kayma hızlarındaki spesifik aşınma oranı değerleri ($mm^3/N.m$ ($10^5$)).

| Malzemeler<br>Test Koşulları | FKM-PTFE-0 | FKM-PTFE-10 | FKM-PTFE-20 | FKM-PTFE-30 | FKM-PTFE-40 |
|---|---|---|---|---|---|
| 500 dev/dak | 3,26 | 1,29 | 0,97 | 1,27 | 2,21 |
| 1000 dev/dak | 2,94 | 1,94 | 1,29 | 2,23 | 3,47 |

500 dev/dak. ve 1000 dev/dak. hızlarında PTFE katkısız FKM karışımının spesifik aşınma oranı değerleri sırasıyla $3,26x10^{-5}$ ile $2,94x10^{-5}$ $mm^3/N.m$'dir. 20 phr PTFE katkılı FKM kauçuk karışımında ise bu değerler yine sırasıyla $0,97x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ değerinden $1,29 x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ değerine düşmüştür. 40 phr da PTFE katkısında ise spesifik aşınma oranı değerleri ise sırasıyla 500 dev/dak. ve 1000 dev/dak. hızlarda $2,21x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ ile $3,47x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ değerlerine yükselmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda [9]; benzer sonuçlar elde edilmiş olup aşınma oranının PTFE katkı oranı 10 phr PTFE katkılı kauçuk karışımı seviyesine kadar azaldığı ve bu seviyeden sonra tekrar arttığı ifade edilmiştir.



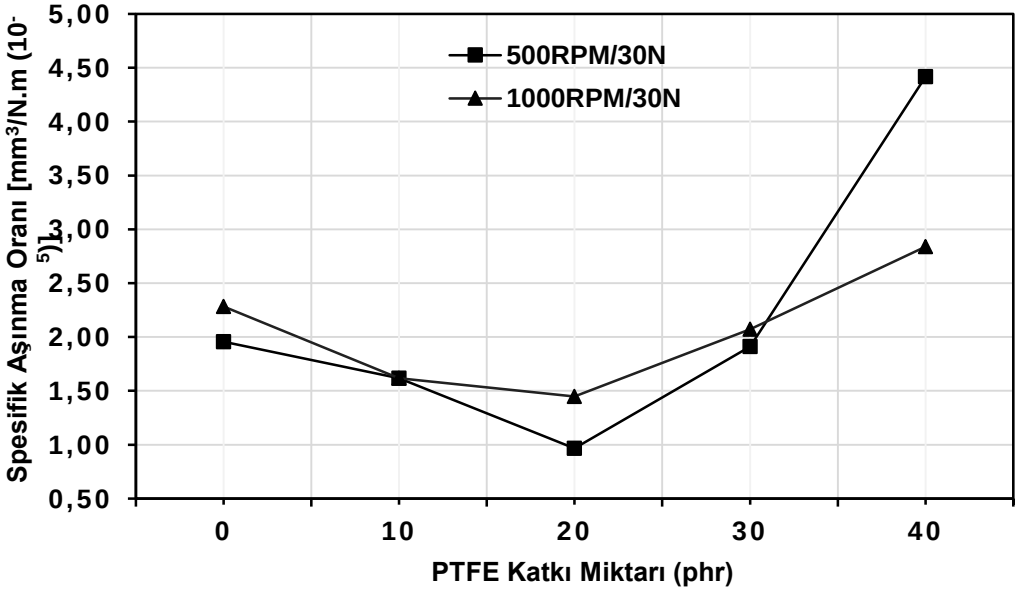

Şekil 4.14: FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin PTFE katkısının farklı hızlardaki ve 15 N yük altındaki spesifik aşınma oranı değerlerinin değişimi.

Tablo 4.10.'da 30 N sabit yük altındaki triboloji deneyinde elde edilen maksimum sürtünme sıcaklık sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 4.10: Farklı test hızlarında ve 30 N sabit yük altında yapılan triboloji deneyinde elde edilen aşınma miktarı değerleri ($mm^3/N.m$ ($10^5$)).

| Malzemeler<br>Test Koşulları | FKM-PTFE-0 | FKM-PTFE-10 | FKM-PTFE-20 | FKM-PTFE-30 | FKM-PTFE-40 |
|---|---|---|---|---|---|
| 500 dev/dak | 1,96 | 1,62 | 0,97 | 1,91 | 4,42 |
| 1000 dev/dak | 2,28 | 1,62 | 1,45 | 2,07 | 2,84 |

Şekil 4.15'de FKM-CB-PTFE kauçuk kompozit malzemelerin 30 N yük altında ve 500 dev/dak. ile 1000 dev/dak hızlardaki spesifik aşınma oranı değerlerinin PTFE katkı miktarına etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.15'de aşınma oranı davranışı Şekil 4.14'e elde edilen sonuçlara göre benzer olup, 30N yük altında 500 dev/dak. ile 1000 dev/dak hızlardaki ve 20 phr PTFE katkısına kadar spesifik aşınma oranının azaldığı, 20 phr ile 40 phr arasında aniden yükseldiği görülmektedir. 500 dev/dak. ile 1000 dev/dak hızlardaki PTFE katkısız FKM kompozit malzemenin 500 dev/dak. ile 1000 dev/dak hızlardaki spesifik aşınma oranı değerleri sırasıyla $1,96x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ ile $2,28x10^{-5}$ $mm^3/N.m$'dir. 20 phr PTFE katkılı FKM kauçuk kompozitinde spesifik aşınma oranı değerleri ise 500 ile 1000 dev/dak hızlarda sırasıyla $0,97x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ ve $1,45x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ değerlerine düşmüştür. 40 phr PTFE oranında ise 500 dev/dak. ile 1000 dev/dak hızlardaki spesifik aşınma oranı dğerleri sırasıyla 4,42 $x10^{-5}$ ile 2,84 $x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ değerlerine artmıştır. Spesifik aşınma oranı değerleri uygulanan yük arttıkça 10 phr değerine kadar azalma eğilimi gösterirken, 10 phr sonrasında ise artış göstermektedir.



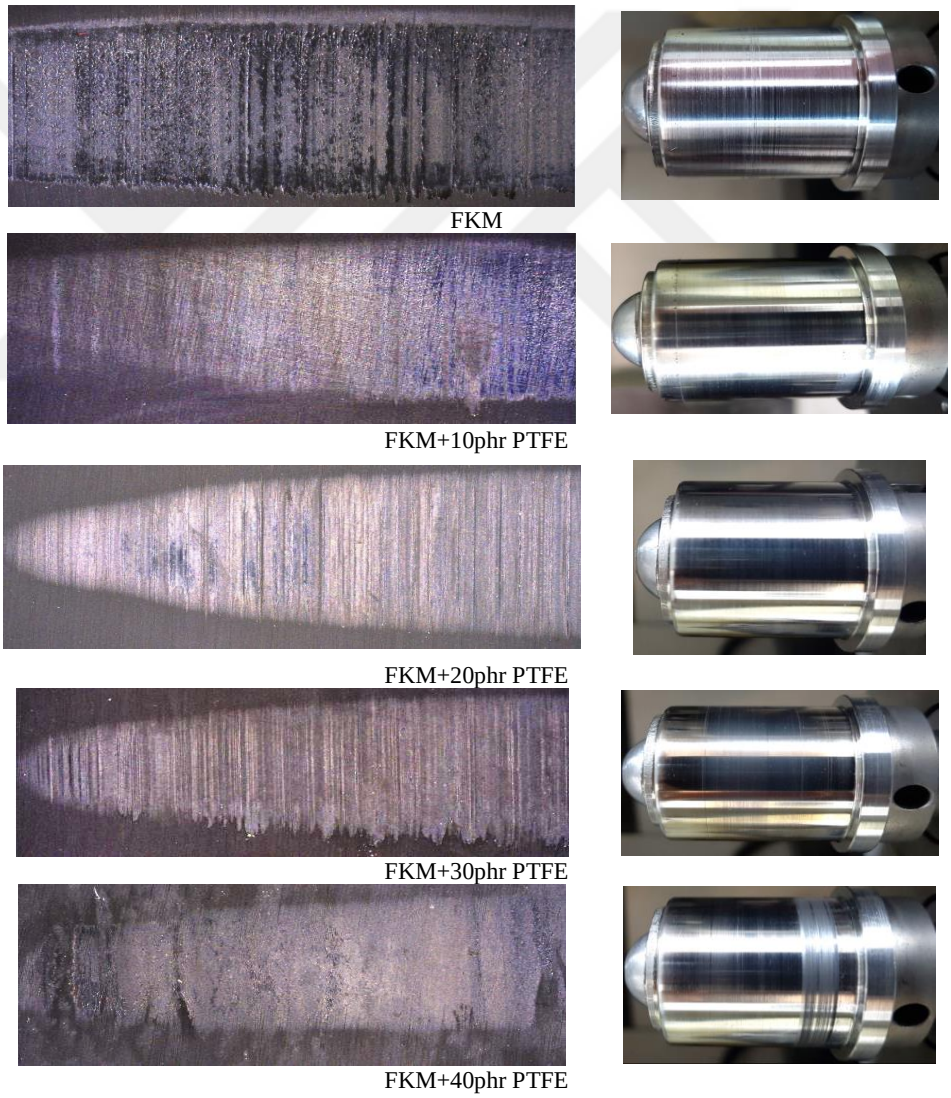

Şekil 4.15: FKM-CB kauçuk kompozit malzemesine PTFE ilavesine bağlı olarak 30 N yük altında ve farklı hızlardaki spesifik aşınma oranının değişimi.

### 4.2.3.4. Deney Malzemelerinin Aşınma Sonucu Optik Yüzey Görüntüleri

500 dev/dak. dönme hızında ve 15N yük altında yapılan triboloji deneyleri sonrasında deney numunelerinin aşınma yüzey görüntüleri Şekil 4.16'de verilmiştir. Şekild verilen optik mikroyapıları dikkatli bir şekilde incelendiğinde, PTFE katkısız FKM-CB kompozit malzemesinin aşınma yüzey mikroyapısında derin aşınma izleri gözlenirken (bakınız Şekil 4.16a) FKM-CB kompozitindeki PTFE katkısı 20 phr miktarında artırılması ile yüzeylerdeki aşınma izlerinde derin olmayan aşınma izleri görülmektedir (bakınız Şekil 4.16b,c). Ancak FKM-CB kompozitindeki PTFE katkısı 20 phr'den 40 phr miktarına artırıldığında ise kauçuk kompozit malzeme yüzeylerinde tekrardan derin aşınma izleri gözlenmektedir (bakınız Şekil 4.16d,e). Literatür incelendiğinde benzer görüntüler [15] ve benzer sonuçlar tespit edilmiştir.

Şekil 4.17'de 30N yük altında ve 500 dev/dak. hızda yapılan triboloji deneyleri sonrasında deney numunelerinin aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.18'de 15N yük altında ve 1000 dev/dak. hızda yapılan triboloji deneyleri sonrasında deney numunelerinin aşınma yüzey görüntüleri verilirken Şekil 4.19'da ise 30N yük ve 1000 dev/dak. kayma hızında gerçekleştirilen aşınma deney sonucunda FKM-CB-PTFE

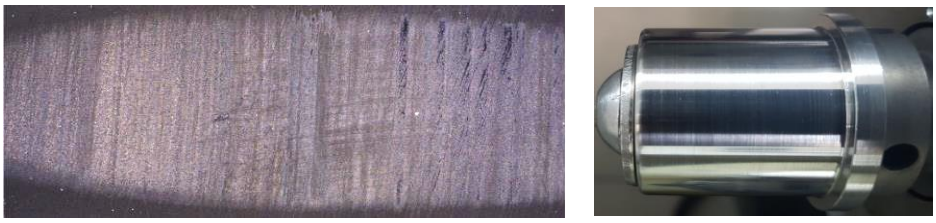
kauçuk kompozit deney numunelerinin aşınma yüzeyi mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.17, 4.18.ve 4.19'da verilen optik mikroyapı görüntüleri dikkatli bir şekilde incelendiğinde, Şekil 4.16'da verilen optik mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir. Yani PTFE katkısız FKM-CB kompozit malzemesinin aşınma yüzey mikroyapısında derin aşınma izleri gözlenirken (bakınız Şekil 4.17a, Şekil 4.18a ve Şekil 4.19a), FKM-CB kompozitindeki PTFE katkısı 20 phr'den 40 phr miktarına kadar artırıldığında kauçuk kompozit malzeme yüzeylerinde derin aşınma izleri oluştuğu görülmektedir (bakınız Şekil 4.17d,e, Şekil 4.18d,e ve Şekil 4.19d,e). Literatür incelendiğinde benzer görüntüler [15] ve benzer sonuçlar tespit edilmiştir.



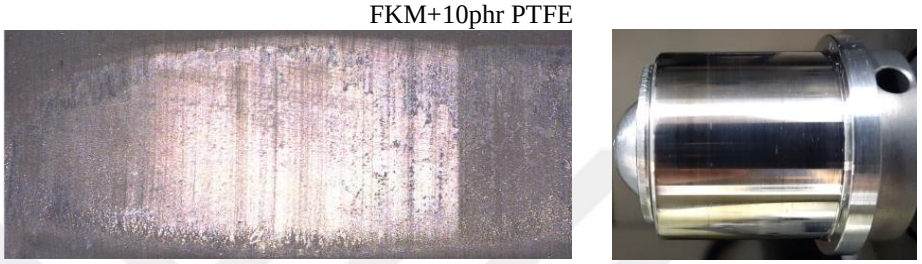

Şekil 4.16: 500 dev/dak ve 15 N yük altında yapılan triboloji testleri sonucunda deney numunelerinin aşınma yüzey mikroyapı görüntüleri (34x büyütme ile)



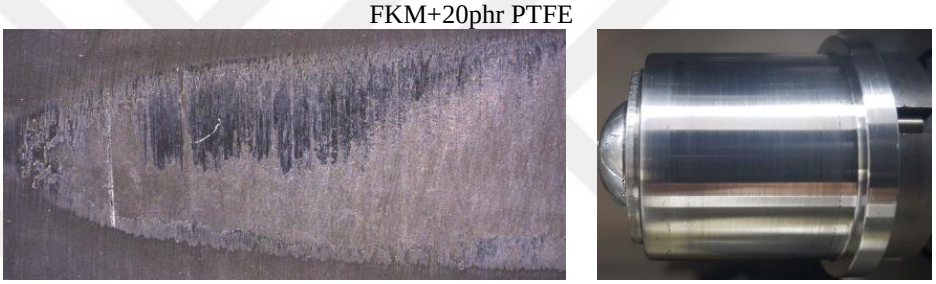
FKM



FKM+10phr PTFE



FKM+20phr PTFE

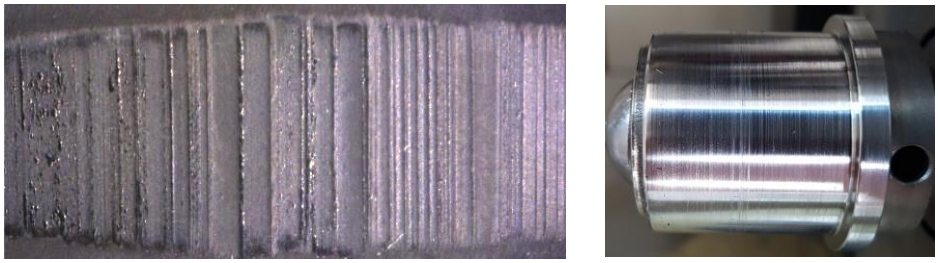


FKM+30phr PTFE

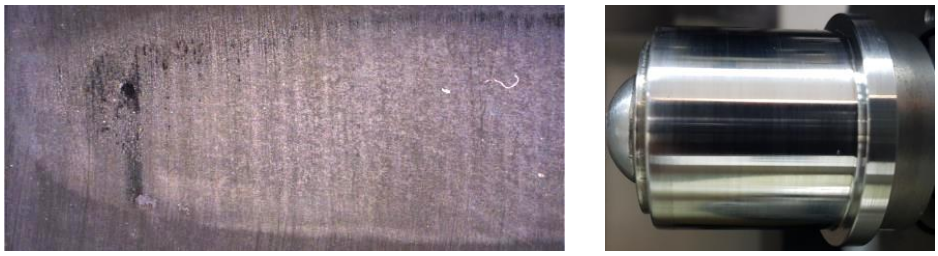


FKM+40phr PTFE

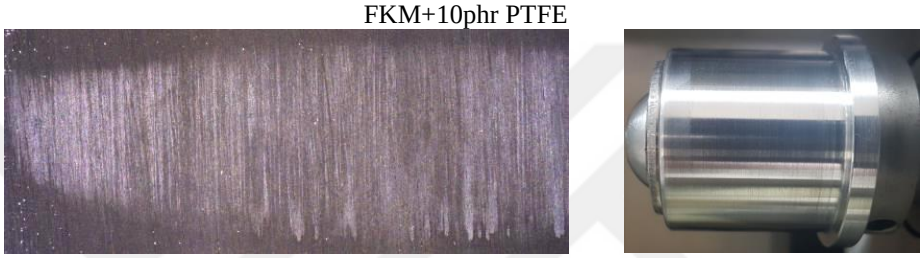
Şekil 4.17: 500 dev/dak hızda ve 30N yük altında yapılan tribolojik testler sonucunda numunelerde oluşan aşınma yüzey mikroyapı görüntüleri (34x büyütme ile).



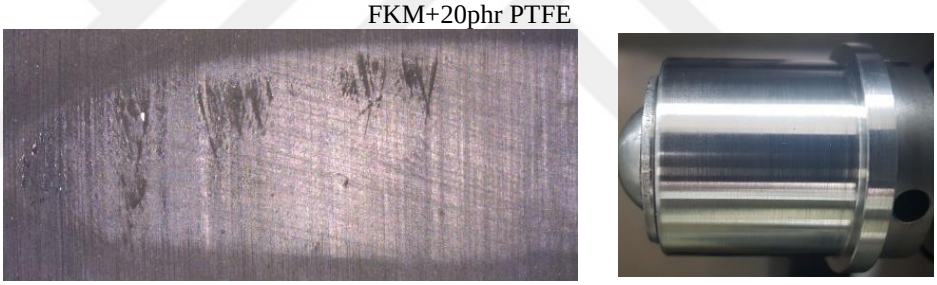
FKM



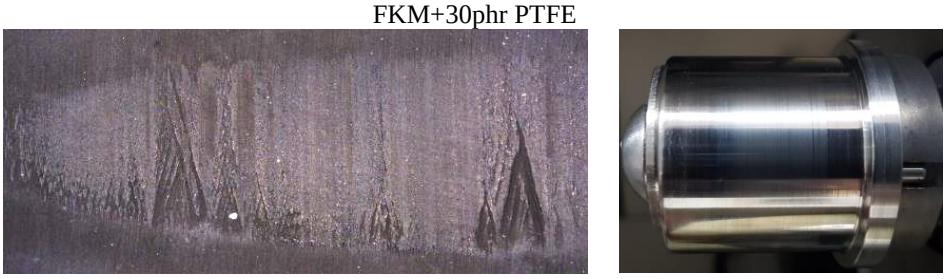
FKM+10phr PTFE



FKM+20phr PTFE



FKM+30phr PTFE

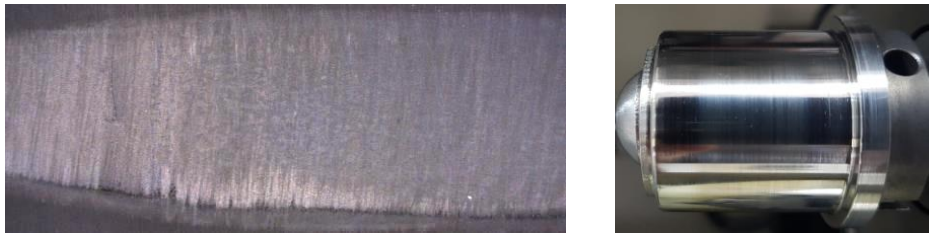


FKM+40phr PTFE

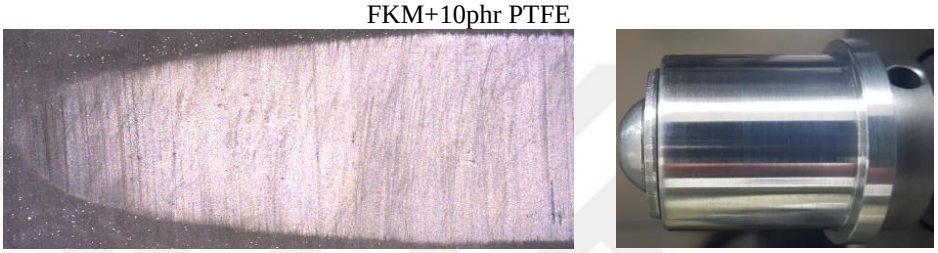
Şekil 4.18: 1000 dev/dak hızda ve 15N yük altında yapılan triboloji testleri sonucunda alınan numune aşınma yüzeyleri mikroyapı görüntüleri (34x büyütme ile)



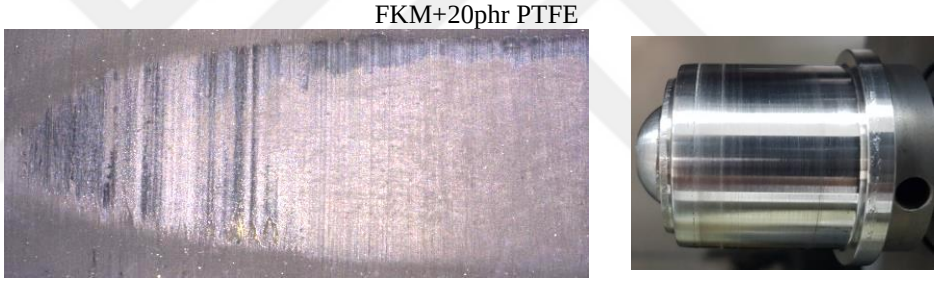
FKM



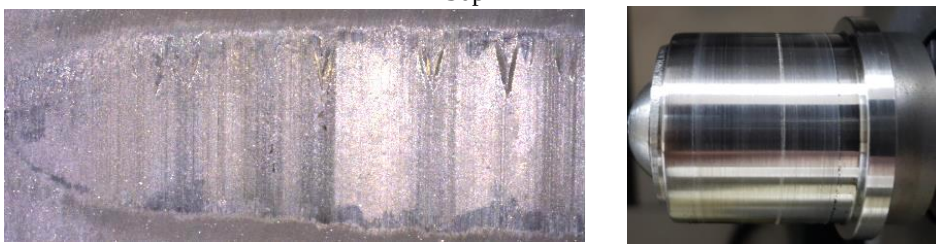
FKM+10phr PTFE



FKM+20phr PTFE



FKM+30phr PTFE



FKM+40phr PTFE

Şekil 4.19: 1000 dev/dak hızda ve 30N yük altında yapılan triboloji testleri sonucunda alınan numune aşınma yüzeyleri mikroyapı görüntüleri (34x büyütme ile)

# BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Üretimi gerçekleştirilen FKM-CB-PTFE kauçuk kompozitlerin reolojik, fiziksel, mekanik, tribolojik ve mikroyapı incelemeleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. FKM-CB-PTFE kauçuk kompozitlerin bünyesindeki PTFE miktarı arttıkça reolojik özelliklerinden MH ve $t_{90}$ değerleri 20phr PTFE miktarına kadar azalma göstermiş 20 phr miktarından sonra ise artış eğilimi göstermiştir. ML değeri ise PTFE miktarı arttıkça artış gösterirken $ts_2$ değerinde ise pek bir değişim gözlenmemiştir.
2. Üretimi yapılan FKM-CB-PTFE kauçuk kompozitlerin sertlik değerleri artan PTFE miktarına bağlı olarak artış göstermiştir. Sertlikteki en büyük artış 73,7 shore A'dan 78,8 Shore A değerine yani %6,4 kadar bir sertlik artışı gözlenmiştir.
3. FKM-CB-PTFE kauçuk kompozitlerin yoğunlukları da artan PTFE miktarına bağlı olarak artış göstermiştir. PTFE katkısız FKM-CB kompozitinin yoğunluğu 1,85 g/cm$^3$ iken 40 phr PTFE ilaveli kauçuk kompozitin yoğunluğu 1,92 g/cm$^3$ olmuştur. Yani yoğunluktaki PTFE oranındaki artışa bağlı olarak %3,7 oranında artış tespit edilmiştir.
4. FKM-CB kauçuk kompozitindeki PTFE katkı miktarı arttıkça yırtılma mukavemeti değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. PTFE katkısız FKM-CB kompoziti, 20 phr PTFE katkılı ve 40 phr PTFE katkılı FKM-CB-PTFE kompozitinde yırtılma mukavemet değerleri sırasıyla 27.36, 29.5 ve 39.0 N/mm olarak tespit edilmiştir.
5. PTFE katkı miktarı 10 phr oluncaya kadar çekme dayanımı önce azalmakta ve 15,9 MPa'dan 12,6 MPa'a düşmektedir. Sonrasında 30 phr PTFE miktarına kadar çekme dayanımı yükselmiş ve 14,4 MPa olmuştur. 40 phr PTFE'de bu değer aniden düşmüş ve 12,3 MPa olarak tespit edilmiştir.

6. 10 phr PTFE'ye kadar % uzama miktarında pek bir artış gözlenmezken, 10 phr'dan 30 phr'a kadar ani bir yükselme görülmüş ve 30 phr'da uzama değeri %215 olmuştur. 40 phr'da % uzama değeri azalma eğilimi göstermiş ve %200'e düşmüştür.
7. FKM-CB kauçuk kompoziti bünyesindeki PTFE katkı miktarı arttıkça %5 uzamadaki elastik modülü artmış olup, 40 phr'da bu değer 11,9 MPa'dan 34,67 MPa değerine aniden yükselmiştir. Aynı şekilde %100 uzamadaki elastik modülü değerinin 10 phr'a kadar düştüğü ve 5,2 MPa değerine azalmasına rağmen, PTFE miktarı artmaya devam ettikçe bu %100 uzamadaki elastik modülü değerinin arttığı ve 40 phr'da 6,4 MPa olduğu tespit edilmiştir.
8. 15 N sabit yük altında iki farklı hızda sürtünme katsayısı değeri 20 phr PTFE katkısına kadar ani düşme eğilimi göstermiş 20 phr PTFE katkısından sonra ise ani olarak artmıştır. 15N yük, 500 ve 1000 dev/dak kayma hızlarında 20 phr PTFE katkılı kompozit malzemenin sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0,42 ve 0,39 olmuştur.
9. Yükün 30N'a artırılması ile 500 dev/dak hızda 30 phr PTFE katkısına kadar sürtünme katsayısı değerinde azalma görülmüş ve 0,66'dan 0,50 değerine düşme gözlenmiştir. 30 phr PTFE katkısından sonra sürtünme katsayısına pek bir artış görülmemiş olup, 40 phr PTFE katkısında bu değer 0,51 olarak ölçülmüştür. 30 N yük altında ve 1000 dev/dak hızda sürtünme katsayısı değeri 20 phr PTFE'ye kadar azalmakta ve 0,53 'den 0,49 değerine düşerken, 30 phr'da 0,53 ve 40 phr'da 0,50 değeri elde edilmiştir.
10. PTFE katkısız FKM-CB kauçuk kompozitinin aşınma deneylerinde kauçuk kompozit yüzey sıcaklıkları 15N yük, 500 dev/dak hızda 107$^{o}$C, 1000 dev/dak hızda ise 118 $^{o}$C gibi oldukça yüksek sıcaklıklar tespit edilirken, 40 phr PTFE katkısı ile kauçuk kompozit malzeme yüzey sıcaklıklarında oldukça azalma gözlenmiştir. Bu azalma 500 dev/dak hızda 64$^{o}$C, 1000 dev/dak hızda ise 92 $^{o}$C'ye kadar azalmıştır.
11. PTFE katkısız FKM-CB kauçuk kompozitinin aşınma deneylerinde kauçuk kompozit yüzey sıcaklıkları 30N yük ve 500 dev/dak hızda 151$^{o}$C, 1000 dev/dak hızda ise 159 $^{o}$C gibi yüksek sıcaklıklar gözlenirken, 40 phr PTFE katkısı ile kauçuk kompozit malzeme yüzey sıcaklıklarında belirgin bir azalma

gözlenmiştir. Sıcaklıktaki azalma yaklaşık olarak 500 dev/dak hızda 82ºC, 1000 dev/dak hızda ise 92 ºC'ye düşmüştür.

12. 15N yük altında 500 dev/dak ile1000 dev/dak hızlarda benzer karakteristlik gösterdiği ve 20 phr PTFE katkısına kadar azaldığı, 20 phr ile 40 phr arasında yeniden arttığı tespit edilmiştir. 500 dev/dak. ve 1000 dev/dak. hızlarında PTFE katkısız FKM kauçuk kompozitin spesifik aşınma oranı değerleri sırasıyla $3{,}26x10^{-5}$ ile $2{,}94x10^{-5}$ $mm^3/N.m$'dir. 20 phr PTFE katkılı FKM kauçuk karışımında ise bu değerler yine sırasıyla $0{,}97x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ değerinden $1{,}29\ x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ değerine kadar azalmıştır.

13. 500 dev/dak. ile 1000 dev/dak hızlarda ve 30N yük altında ve 20 phr PTFE katkısına kadar spesifik aşınma oranının düştüğü, 20 phr'den 40 phr' ye kadar aniden artış gözlenmiştir. 500 dev/dak. ile 1000 dev/dak hızlardaki PTFE katkısız FKM kompozit malzemenin spesifik aşınma oranı değerleri sırasıyla $1{,}96x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ ile $2{,}28x10^{-5}$ $mm^3/N.m$'dir. 20 phr PTFE katkılı FKM kauçuk kompozitinde spesifik aşınma oranı değerleri ise aynı hızlarda sırasıyla $0{,}97x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ ve $1{,}45x10^{-5}$ $mm^3/N.m$ değerlerine düşmüştür.

# KAYNAKLAR


Desale, D.D. & Pawar, H.B. (2018). Performance Analysis of Polytetrafluoroethylene as Journal Bearing Material, 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, Procedia Manufacturing (20), 414-419.

Drobny, J.G. (2009). Technology of Fluoropolymers. Broken Sound Parkway, N.W.

Feyzullahoglu, E. (2016). The Influences of Environmental Factors on Abrasive Wear of FKM, NBR and CR, Politeknik Dergisi 19 (1), 1-8.

Frölich, D. & Magyar, B. (2013). A comprehensive model of wear, friction and contact temperature in radial shaft seals, Wear (311), 71-80.

Hertz, D.L. (2001). Engineering with Rubber, Red Bank, N.J.

Hopmann, C. & Dering, J.P. (2012). Property modification of EPDM rubber compounds using PTFE micro powder, Selected from International Polymer Science and Technology, 39 (10), 648-652.

Ismail, M.H. & Nor, H.M. (2015). Feedstock Flow Characterization and Processing of Porous Niti By Metal Injection Moulding (MIM), Journal Teknologi (76:11), 97-105.

Khan, M.S. & Franke, R. (2008). Physical and tribological properties of PTFE micropowder-filled EPDM rubber, Tribology International (42), 890-896.

Khan, M.S. & Heinrich, G. (2011). PTFE-Based Rubber Composites for Tribological Applications, Adv Polym Sci (239), 249-310.

Khan, M.S. & Lehmann, D. (2008). Modification of PTFE nanopowder by controlled electron beam irradiation: A useful approach for the development of PTFE coupled EPDM compounds, Express Polymer Letters Vol.2 (4), 284-293.

Kruželák, J. & Sýkora, R. (2016). Sulphur and peroxide vulcanisation of rubber compounds–overview, Chemical Papers 70 (12), 1533-1555.

Lee, S.H. & Yoo, S.S. (2012). Accelerated wear test of FKM elastomer for life prediction of seals, Polymer Testing (31), 993-1000.

Li, H. & Yin,Z. (2015). A study of the tribological behavior of transferfilms of PTFE composites formed under different loads, speeds and morphologies of the counterface, Wear (328-329), 17-27.

Lv, Q. & Wang, B. (2017). Study on Tribological Behavior of Composite Laminated Material of Monoaxial Stretched PTFE Film, AIP Conference Proceedings (1794), 020017-1–020017-6.

Park, E. (2007). Processibility and Mechanical Properties of Micronized Polytetrafluoroethylene Reinforced Silicone Rubber Composites, Journal of Applied Polymer Science (107), 372-381.

Ran, G. & Xiaojin, W. (2012). Tribological Properties and Failure Analysis of PTFE Composites used for Seals in the Transmission Unit, Journal of Wuhan University of Technology-Mater, Sci. Ed., 26-30.

Shen, M. & Dong, F. (2016). Effect of abrasive size on friction and wear characteristics of nitrile butadiene rubber (NBR) in two-body abrasion, Tribology International (103), 1-11.

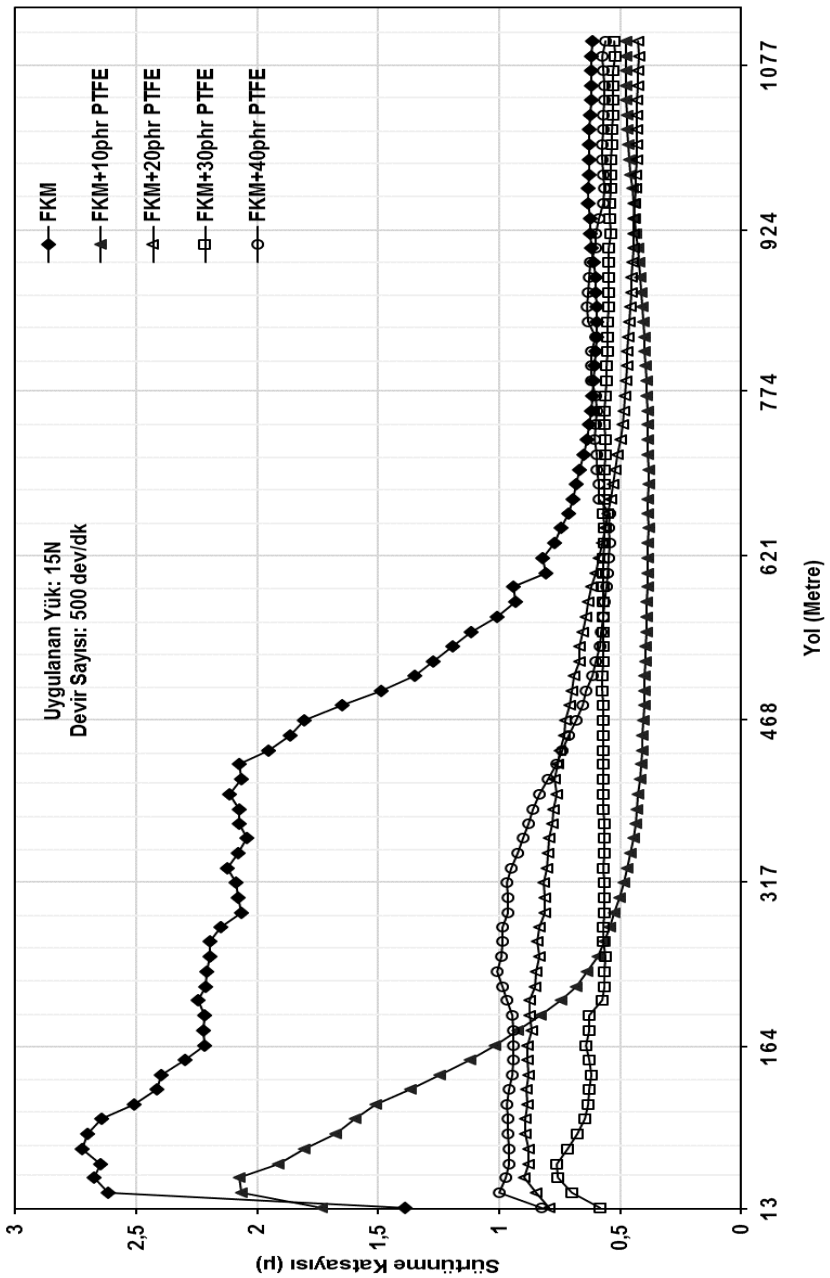
Xu, D. & Karger-Kocsis, J. (2009). Unlubricated Rolling Wear of HNBR/FKM/MWCNT Compounds Against Steel, Journal of Applied Polymer Science (112), 1461-1470.

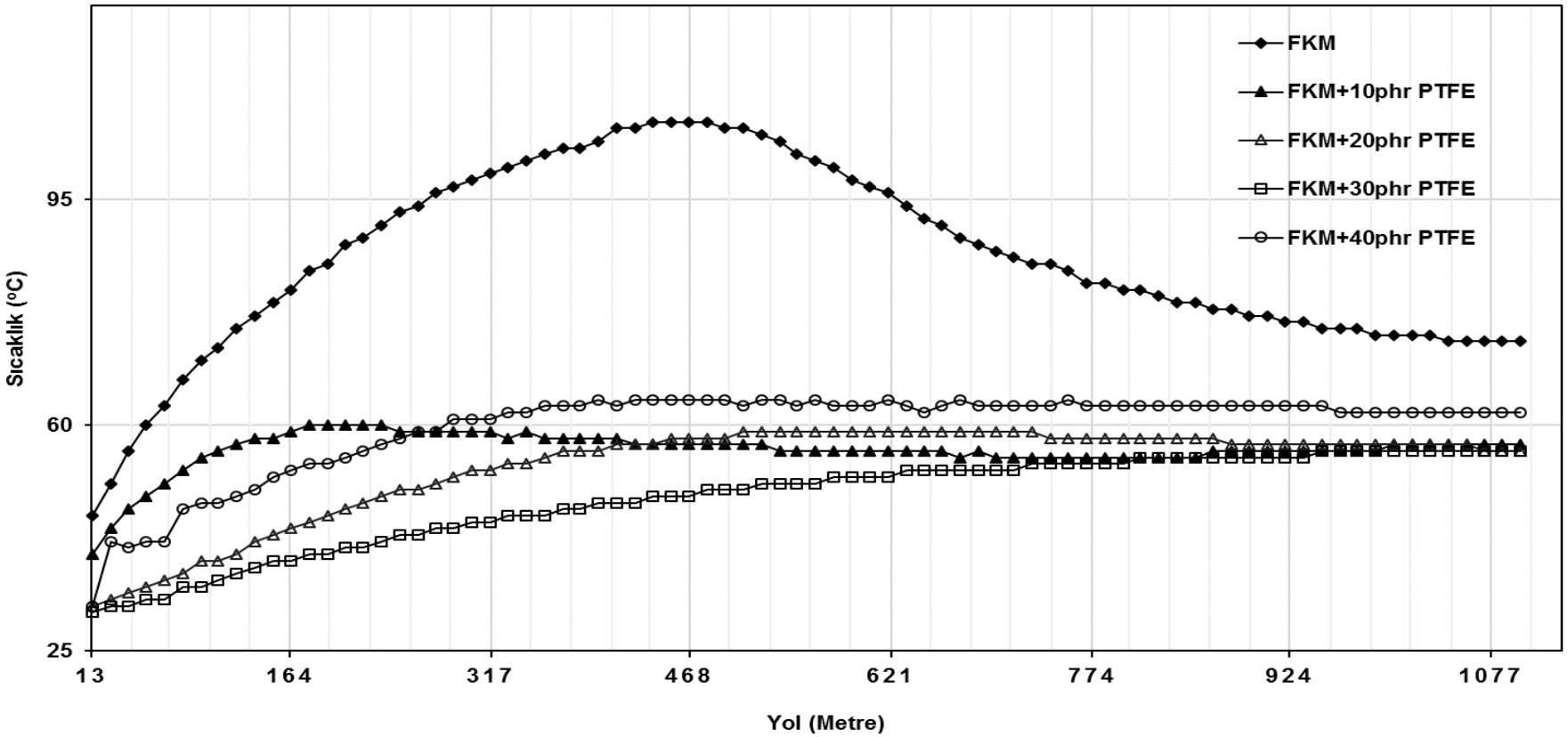
Yuan, X. & Yang, X. (2010). A study on friction and wear properties of PTFE coatings under vacuum conditions, Wear (269), 291-297.

Zhao, G. & Shi, L. (2011). Preparation and Properties of Polytetrafluorethylene Filled Ethylene–Propylene–Diene Monomer Composites, Journal of Applied Polymer Science (123), 3734-3740.

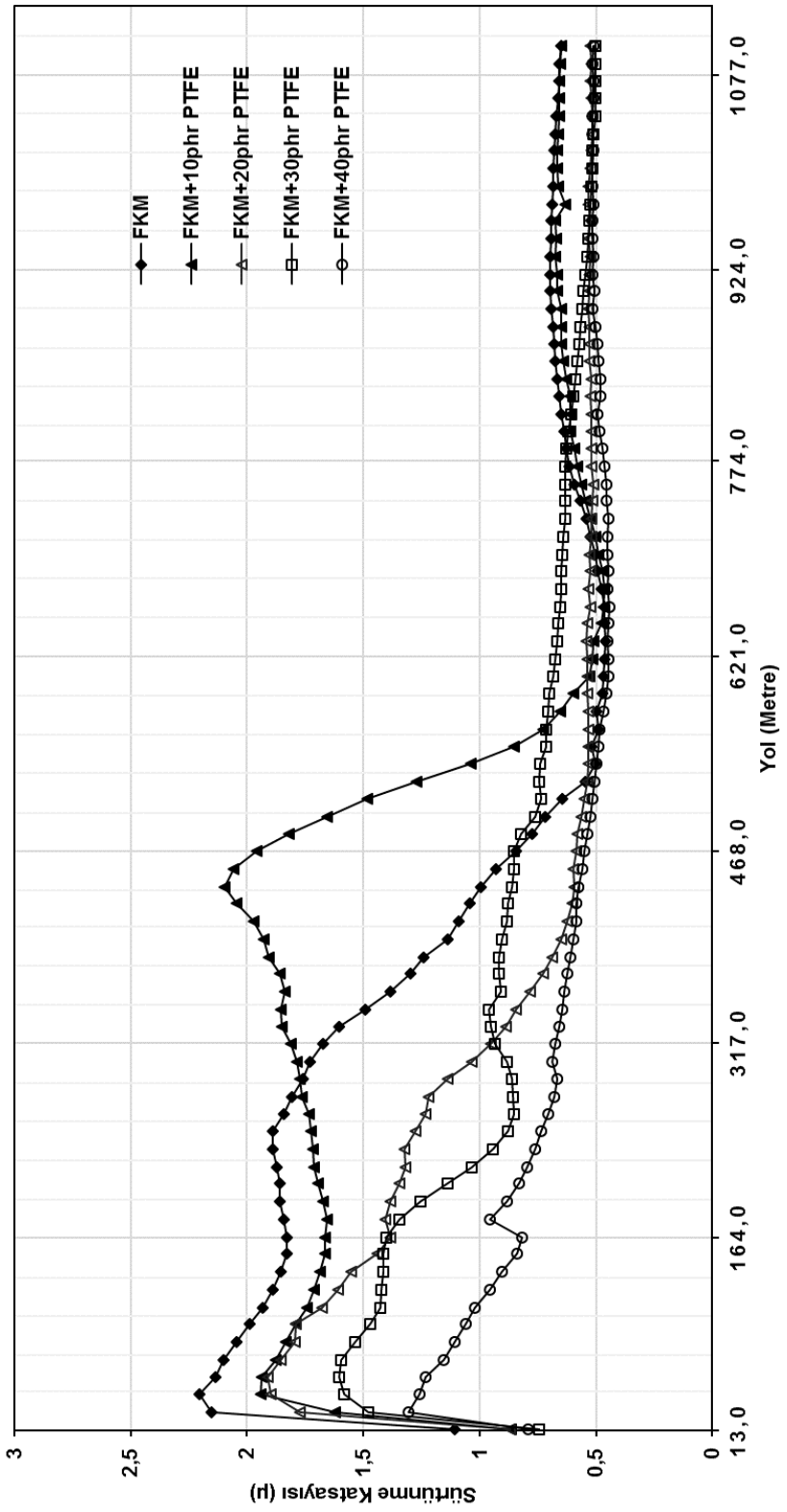
# EKLER

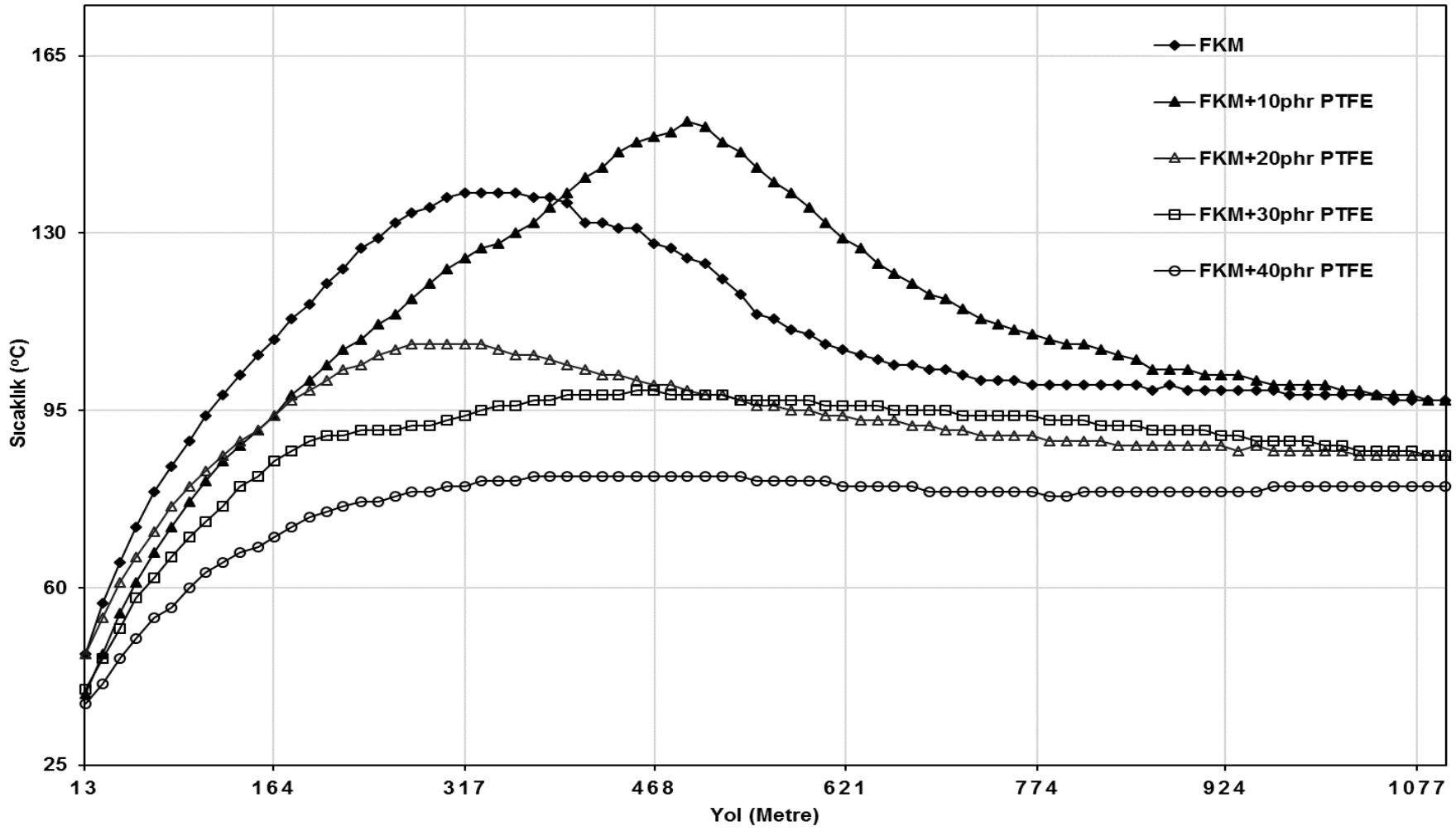
**EK A:** 500 rpm ve 15 N yük altında yapılan Triboloji testi sürtünme katsayısı ile sürtünme sıcaklığı / yol grafiği.



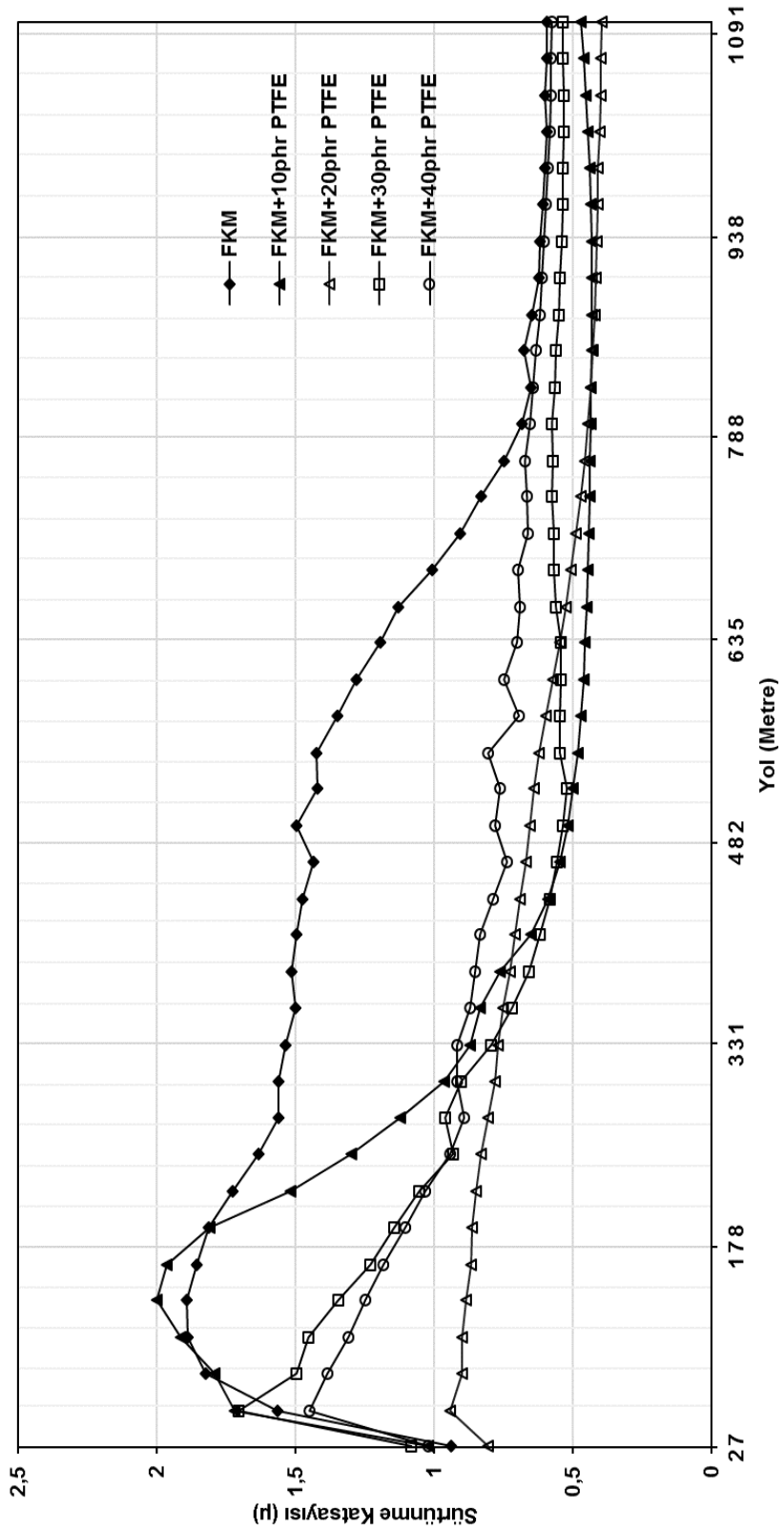

FKM
FKM+10phr PTFE
FKM+20phr PTFE
FKM+30phr PTFE
FKM+40phr PTFE
Sıcaklık (°C)
95
60
25
13
164
317
468
621
774
924
1077
Yol (Metre)

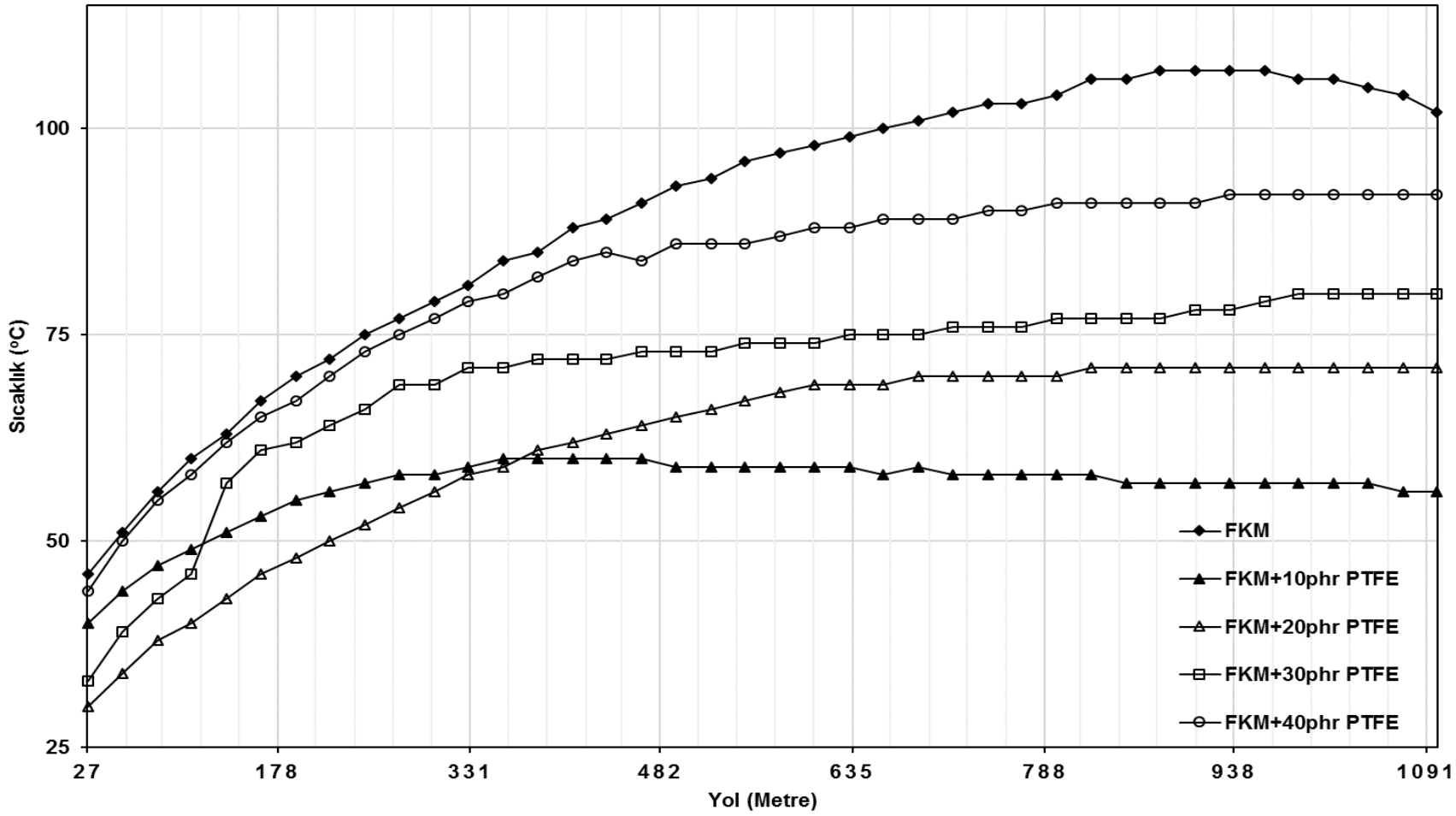
**EK B:** 500 rpm ve 30 N yük altında yapılan Triboloji testi sürtünme katsayısı ile sürtünme sıcaklığı / yol grafiği.



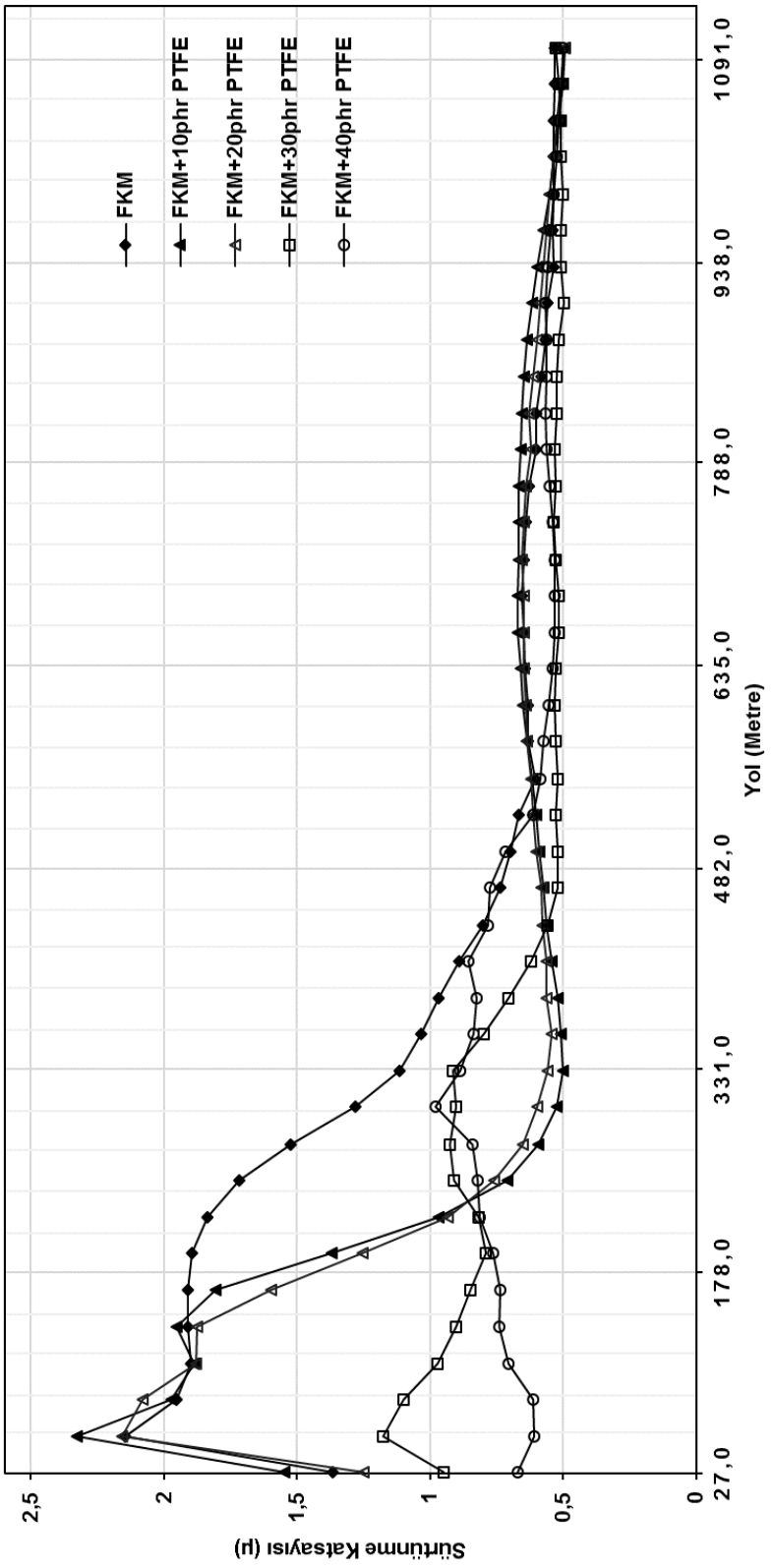

FKM
FKM+10phr PTFE
FKM+20phr PTFE
FKM+30phr PTFE
FKM+40phr PTFE
Sıcaklık (°C)
165
130
95
60
25
13
164
317
468
621
774
924
1077
Yol (Metre)

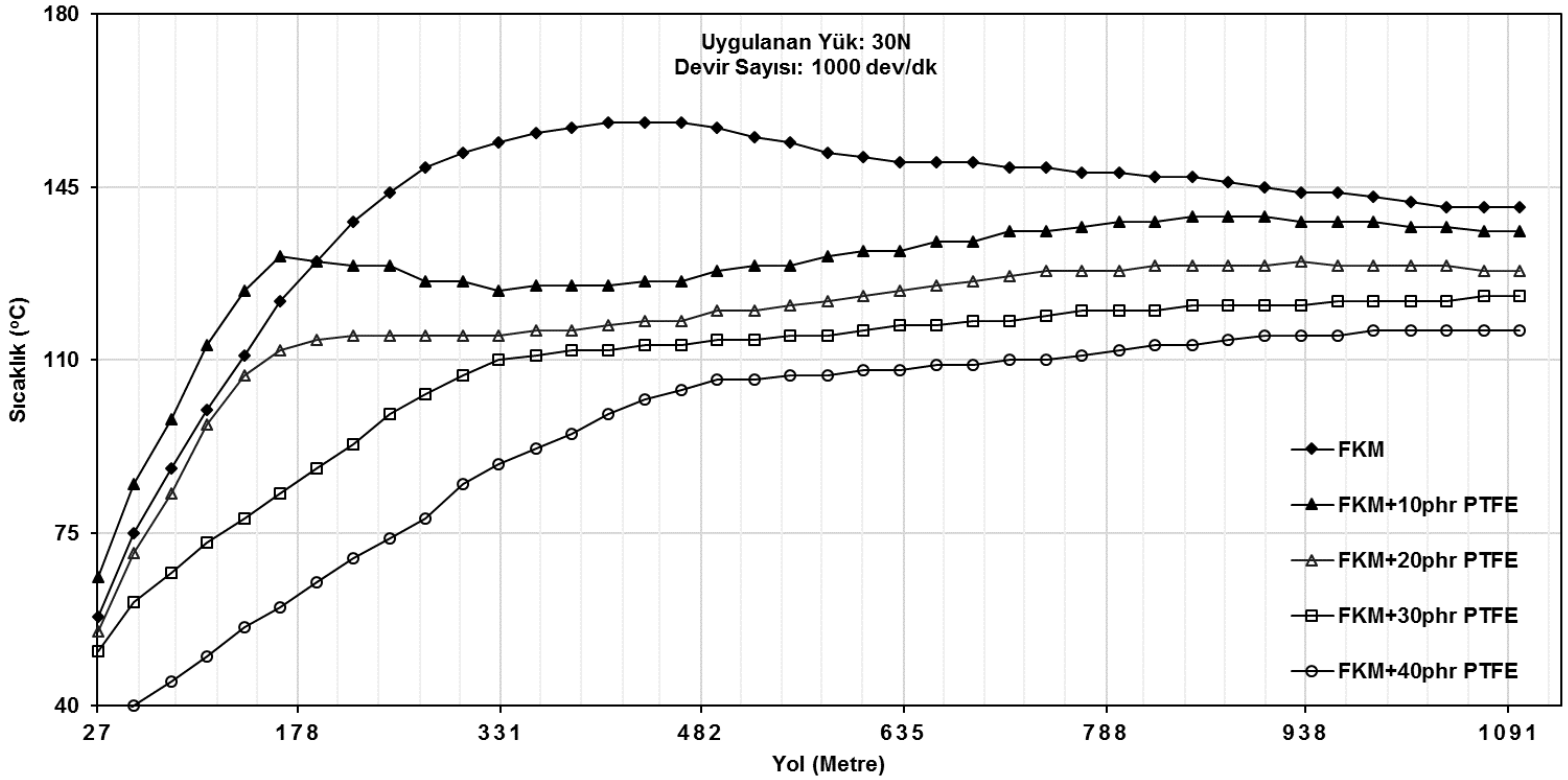
**EK C:** 1000 rpm ve 15 N yük altında yapılan Triboloji testi sürtünme katsayısı ile sürtünme sıcaklığı / yol grafiği.




Sıcaklık (°C)
100
75
50
25
27
178
331
482
635
788
938
1091
Yol (Metre)
FKM
FKM+10phr PTFE
FKM+20phr PTFE
FKM+30phr PTFE
FKM+40phr PTFE

**EK D:** 1000 rpm ve 30 N yük altında yapılan Triboloji testi sürtünme katsayısı ile sürtünme sıcaklığı / yol grafiği.




Uygulanan Yük: 30N
Devir Sayısı: 1000 dev/dk
Sıcaklık (°C)
180
145
110
75
40
27
178
331
482
635
788
938
1091
Yol (Metre)
FKM
FKM+10phr PTFE
FKM+20phr PTFE
FKM+30phr PTFE
FKM+40phr PTFE

# ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** **:** Atilla Osman ÖZDEMİR
**Doğum Tarihi ve Yeri** **:** 17.04.1987 / Erzurum
**E-posta** **:** atillaozdemirx@gmail.com

## ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2010, Cumhuriyet Ünv, Mühendislik Fak., Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

## MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2010-2011 yılları arasında Cumhuriyet Ünv. Divriği Meslek Yüksek Okulunda sözleşmeli olarak Öğretim Görevliliği.
- 2012-2014 yılları arasında farklı firmalarda Kalite Sistem Yönetimi uzmanlığı ile Kalite Yöneticiliği.
- 2014 yılından beri SKT Yedek Par. Ve Mak. A.Ş.'de Ar-Ge Bölümünde Ölçüm ve Test Laboratuvarlarında Yönetici.

## YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Özdemir A., Unal H. (**2018). IMESCON. *International Marmara Sciences Congress -Kocaeli Üniversitesi*, April 26-28, 2018 Kocaeli, Turkey.