

PFAS YASAKLAMALARINA İLİŞKİN FKM VE PTFE MALZEMELERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ALTERNATİFLER

Barış ÇAYLAK
Cem TANYERİ
Edanur ALBAYRAK

ÖZET

Son yıllarda, çevresel kaygılar ve giderek sıkılaştıran regülasyonlar, endüstriyel üretimde kullanılan malzemelerin sürdürülebilirliğini yeniden şekillendirmektedir. Özellikle PFAS (Per- ve Polifloroalkil Maddeler) içeren malzemelerin doğaya ve insan sağlığına olan zararları, başta Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) olmak üzere birçok otorite tarafından oldukça ciddi bir şekilde ele alınmaktadır.

Olası regülasyonlardan etkilenmesi öngörülen FKM ve PTFE malzemeleri, sızdırmazlık çözümleri için medya ve ısı dirençleri nedeniyle otomotiv, havacılık, tıbbi cihazlar ve gıda gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Per- ve Polifloroalkil Maddeler (PFAS), flor içeren sentetik kimyasallar olup, ECHA tarafından "sonsuz kimyasallar" olarak adlandırılmaktadır. PFAS bileşiklerinin doğada bozunmadığı ve biyolojik sistemlerde birikerek ciddi çevresel ve sağlık riskleri oluşturabileceği görüşü, çeşitli araştırmalar ve raporlarla sunulmaktadır.

Bu bağlamda, sürdürülebilir malzeme seçimleri ve çevre dostu üretim teknolojilerine olan talep giderek artmaktadır. PFAS-free malzemeler ve PTFE alternatiflerinin belirlenmesi, yüksek performans gereksinimlerinin karşılaştırılması, çevresel etkilerin minimizasyonu ve sürdürülebilir üretim süreçlerine dair çalışmaların detayları ve planlanan adımlar bu bildiriye aktarılacaktır.

Anahtar Kelimeler: PFAS (Per- ve Polifloroalkil Maddeler), Sürdürülebilirlik, FKM (Fluoroelastomer), PTFE, PFAS-Free

ABSTRACT

In recent years, environmental concerns and increasingly stringent regulations are reshaping the sustainability of materials used in industrial production. The harmful effects of materials containing PFAS (Per- and Polyfluoroalkyl Substances) on the environment and human health are being seriously addressed by many authorities, particularly the European Chemicals Agency (ECHA) and the United States Environmental Protection Agency (EPA).

FKM and PTFE materials, which are expected to be affected by potential regulations, are widely used in various industries such as automotive, aerospace, medical devices, and food due to their media and heat resistance properties in sealing solutions.

Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) are fluorine-containing synthetic chemicals, and they are referred to as "forever chemicals" by the ECHA. It is argued in various studies and reports that PFAS compounds do not degrade in nature and accumulate in biological systems, posing significant environmental and health risks.

In this context, the demand for sustainable material choices and environmentally friendly production technologies is steadily increasing. The identification of PFAS-free materials and PTFE alternatives, the comparison of high-performance requirements, the minimization of environmental impacts, and the details and planned steps for sustainable production processes will be discussed in this presentation.

Key Words: PFAS (Per- ve Polifloroalkil Substances), Sustainability, FKM (Fluoroelastomer), PTFE, PFAS-Free

1.GİRİŞ

Sızdırmazlık elemanları, sistemlerde genellikle iki farklı basınç bölgesi arasındaki akışkanı kontrol etmek ve istenmeyen geçişleri önlemek amacıyla kullanılır. Sızdırmazlık elemanları, sistemler içinde görece düşük maliyetli bileşenler olsa da işlevsel açıdan kritik bir rol üstlenirler. Tarım, iş makineleri, hidrolik presler, demir çelik, maden, otomotiv gibi birçok farklı alanda üretim teknolojilerindeki gelişmeler ve sistem teknolojilerindeki artış (yüksek sıcaklık, basınç ve hız gibi) nedeniyle; farklı geometrilere ve çeşitli malzeme türlerine sahip sızdırmazlık elemanlarının kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir [1]. Bu nedenle, sızdırmazlık elemanlarının uzun ömürlü ve güvenilir bir performans sergilemesi için tasarımlarının optimize edilmesi ve kullanılan malzemelerin mekanik davranışlarının doğru şekilde anlaşılması büyük önem taşır [2].

Kullanım yerlerine ve çalışma şartlarına göre hidrolik yağlara yüksek direnç, orta sıcaklık istenilirse NBR ve HNBR malzeme; aşınmaya karşı çok iyi, dinamik uygulama dayanımı için PU malzeme; yüksek mekanik mukavemet, aşınma direnci, ölçüsel kararlılık ve destekleyici fonksiyonlar isteniyorsa PA malzeme ozon, oksijen ve UV dayanımı yüksek istenilirse silikon malzemeler tercih edilirken yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanım için FKM malzeme ve düşük sürtünme, geniş kimyasal uyumluluk için PTFE malzeme öne çıkmaktadır [1] [3].

PTFE VE FKM malzemelerin içerdiği C-F bağının yüksek bağ enerjisi ve kimyasal yapısı sayesinde termal ve kimyasal dirençleri bakımından benzersizdir. Ancak son yıllarda Avrupa başta olmak üzere birçok ülkede yürürlüğe giren düzenlemeler kapsamında bu malzemelerin yapısında yer alan ve çevre ile insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu tespit edilen PFAS (Perfloroalkil ve Polifloroalkil Maddeler) bileşenleri, ciddi şekilde sorgulanmaya başlanmıştır. PFAS'ların çevrede ve canlı organizmalarda birikerek sağlık risklerine yol açtığı bilimsel olarak çalışmalar ile ortaya konmuştur.

Bu gelişmeler doğrultusunda, FKM kauçuk üreticileri, polimerizasyon sürecinde kullanılan ve doğada parçalanmayan florlu yüzey aktif maddeleri (fluorinated surfactants) üretimden çıkararak "Non-Fluoro Surfactants (NFS)" olarak adlandırılan alternatif FKM ürünleri geliştirmeye başlamışlardır. Söz konusu florlu bileşenler, proses sırasında atık suya geçerek su kaynaklarına, gaz fazına karışarak ise havaya yayılmakta ve bu yolla çevreye ve insan sağlığına ulaşabilmekteydi. NFS gelişmesiyle birlikte bu zararlı etkilerin önüne geçilmesi ve PFAS kullanımının azaltılması hedeflenmiştir [4].

Kastaş bünyesinde kullanılan FKM ve PTFE malzemelerinin PFAS regülasyonları kapsamında çevreci malzemeler denenmesi hedeflenmiştir. FKM için NFS kauçuklar üzerine reçete geliştirme ve denemeler gerçekleştirilmiş; PTFE malzeme yerine PA7501 kodlu Kastaş malzemesinin alternatif olarak kullanılabileceği öngörülerek test edilmiştir.

Bu çalışma ile sızdırmazlık elemanlarının PFAS olası kısıtlamalarına alternatif hammaddeler kullanılarak, çevreye ve insan sağlığına duyarlı, aynı zamanda yüksek performans sunan alternatif hammadde geliştirilerek üretilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, değişen yasal düzenlemelere uyum sağlanarak, gelecekte yürürlüğe girmesi beklenen kısıtlamalara karşı proaktif bir yaklaşım benimsenmekte ve sürdürülebilir üretim anlayışı desteklenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Hammadde Tespiti ve Tedarikçi Araştırması

Olası yasal düzenlemelere uyum sağlamak amacıyla, PFAS yasal gerekliliklerine uyumlu elastomerik polimerlerin geliştirilmesi konusunda faaliyet gösteren uluslararası hammadde tedarikçileri ile görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ilgili malzemelere ait Teknik ve Güvenlik Bilgi Formları (TDS ve MSDS) detaylı şekilde incelenmiş ve tedarik edilecek numuneler belirlenmiştir.

2.2. Reçete Geliştirme

Numunelere yönelik Kastaş'ın kendi hamuru olan FK7001 referans alınarak laboratuvar ölçekli reçeteler hazırlanmıştır. Kauçuk türlerinin etkisini net bir şekilde gözlemleyebilmek amacıyla kauçuk ve diğer bileşenlerin phr oranları sabit tutulmuştur.

Reçetede;

- Beyaz dolgu
- Aktivatör
- Proses kolaylaştırıcı
- Pigment
- Vulkanizasyon yardımcı malzemesi

kullanılmış olup sonucunda 70 Shore A sertliğinde, yüksek sıcaklık (≥ 200 °C) ve kimyasal direnç sunacak şekilde optimize edilmiştir.

2.3. Üretim Yöntemi

Hazırlanan reçete laboratuvar ölçekli kneader karıştırıcısına ilk olarak kauçuğun eklenmesiyle başlatılmış ardından diğer kimyasallar eklenerek belirli sıcaklıklarda sırasıyla yoğurulmuştur. Hamur homojenliğin sağlanması için twin roll ünitesinden geçirilerek soğumaya bırakılmıştır. Şekil 1' de hamur hazırlık sürecinden görseller sunulmuştur.



Şekil 1. Hamur Hazırlık Süreci

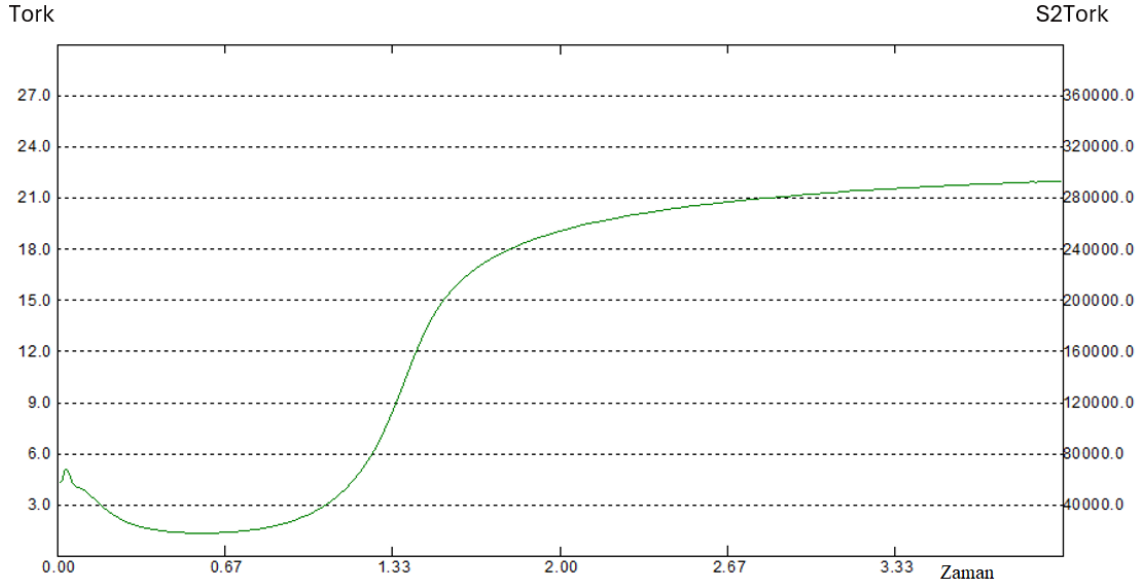
2.4. Test Yöntemi ve Test Sonuçları

Soğuyan hamurdan ilgili testler için numuneler çıkarılmıştır. Rheometre test numunesi dışındaki diğer test numuneleri 200°C 16 saat fırınlanmıştır. Tüm testler ASTM D-2000 standartları ve limitleri baz alınarak ISO standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.

2.4.1. FKM Malzeme Testleri ve Sonuçları:

Rheometre Testi (ISO6502): Hamurun vulkanizasyon özelliklerinin tanımlanması amacıyla gerçekleştirilir. Hazırlanan numune cihazda belirli sıcaklığa maruz bırakılarak zamanla gösterdiği dirence karşılık vulkanizasyon eğrisi elde edilmiştir. Bu eğriden vulkanizasyon öncesi hamurun

viskozitesini (ML) yani işlenebilirliğini; çapraz bağlanmanın %90 'ının tamamlandığı andaki tork değerini (MH) ve optimum vulkanizasyon süresini (t90) gibi önemli değerler elde edilir [5].



Şekil 2. Numune 1 Örnek Vulkanizasyon Eğrisi

Test sonuçları incelendiğinde Numune 1 ve Numune 2 değerlerinin referans değerlere yakın geldiği gözlemlenmiştir. Karşılaştırma değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Rheometre Sonuçları Karşılaştırma Tablosu

	REFERANS	NUMUNE 1	NUMUNE 2
MH	23,01	22,00	22,85
ML	1,15	1,35	1,40
ts2	01:07	01:06	01:11
t90	02:33	02:16	02:32

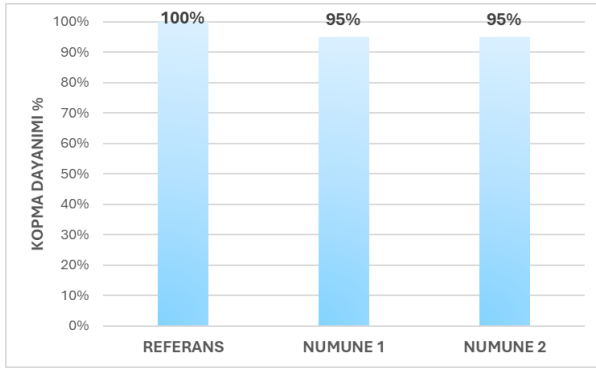
Çekme Kopma Testi (ISO 37): Vulkanizasyon sonrasında gerilim altında hamurun esnekliğini ve bu gerilime dayanımını ölçmek amacıyla gerçekleştirilir. Numune vulkanize edildikten sonra gerekli fırınlama işlemine tabi tutulur. 2mm kalınlığında 15mm uzunluğunda test kaşıkları aparat yardımıyla hazırlanır. Kaşıklar mekanizmada bulunan çenelere bağlanır ve test başlatılır. Test sonunda uzama değeri ve kopma dayanımı değerleri elde edilir [6] [7].



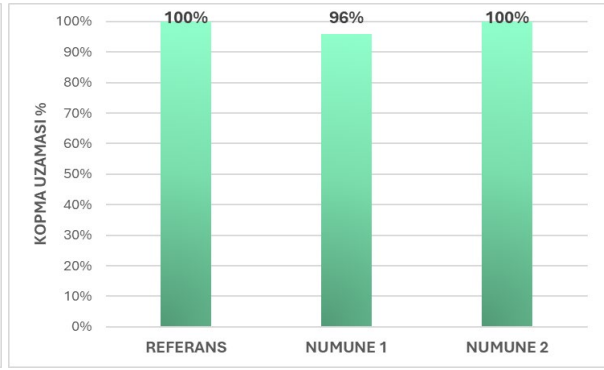
Şekil 3. Test Kaşığı



Şekil 4. Çekme Kopma Testi

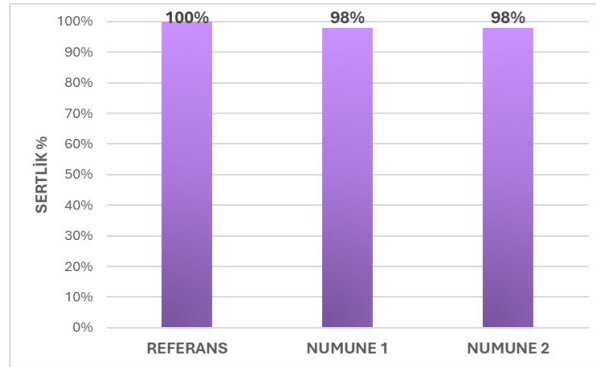


Şekil 5. Kopma Dayanımı Grafiği



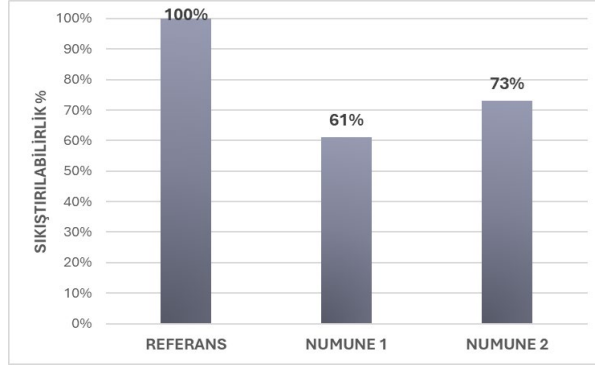
Şekil 6. Kopma Uzaması Grafiği

Sertlik Ölçümü (ISO 48): Vulkanize olmuş ve fırınlanmış 6mm numune cihazda merkezlenerek batıcı uç ile bir kuvvet uygulanarak ucun ilerleme derecesiyle ölçüm gerçekleştirilir. Sonuç olarak Shore A cinsinden sertlik değeri elde edilir [8]. Sonuçlar Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Sertlik Grafiği

Sıkıştırılabilirlik testi (ISO 815): Hazırlanan hamurlardan 12,5 mm kalınlığında takozlar basılarak fırınlama işleminin ardından sıkıştırma düzeneğine yerleştirilmiştir. 175°C 22 saat test sonrasında yapılan öncesi sonrası ölçümlerden malzemenin geri toplanabilme yeteneği gözlemlenmiştir [12].



Şekil 8. Sıkıştırılabilirlik Grafiği

Yağda yaşlandırma ve hacimsel şişme testleri (ISO 1817): Çapraz bağlı kauçuk malzemelerin belirli sıcaklıklarda ASTM 1 ve FUEL C medyalarıyla etkileşimi sağlanarak malzemenin yağ direncini ve kullanım ömrünü değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir [9].

Test koşulları: 70 saat 250°C

Tablo 2. ASTM 1 Yağ Yaşlandırması Öncesi- Sonrası Değişim Sonuçları Tablosu

	STANDART	REFERANS	NUMUNE 1	NUMUNE 2
Sertlik (Shore A)	-15, +5	-1,13	-1,07	-0,13
Kopma Dayanımı (%MPA)	-40	-5,31	-7,38	-10,20
Kopma Uzaması (%)	-20	-2,44	-12,82	-5,06
Hacim (%)	0, +15	0,17	4,03	0,56

Test koşulları: 70 saat 23°C

Tablo 3. FUEL C Yaşlandırması Öncesi- Sonrası Değişim Sonuçları Tablosu

	STANDART	REFERANS	NUMUNE 1	NUMUNE 2
Sertlik (Shore A)	± 5	-4,53	-4,13	-3,20
Kopma Dayanımı (MPA)	-25	-13,09	-19,49	-17,17
Kopma Uzaması (%)	-20	-7,32	-5,13	-10,13
Hacim (%)	0, +10	7,50	8,45	8,91

Kuru havada yaşlandırma testi (ISO 188): Havalandırılmalı etüvlerde standartlar kapsamında plakaların yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Isıl oksidatif yaşlanmaya karşı fiziksel ve mekanik değişimlerin gözlemlenmek amacıyla yapılmıştır [10] [11].

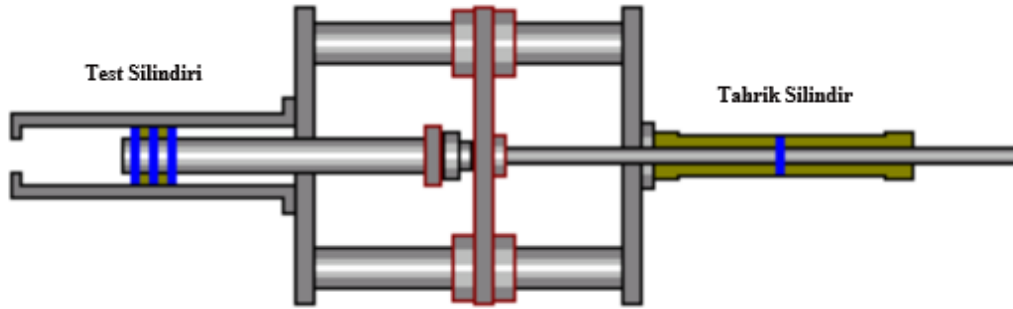
Test koşulları: 70 saat 250°C

Tablo 4. Kuru Hava Yaşlandırması Öncesi- Sonrası Değişim Sonuçları Tablosu

	STANDART	NUMUNE 1	NUMUNE 2	REFERANS
Sertlik (Shore A)	+10	0,90	3,20	2,43
Kopma Dayanımı (MPA)	-25	12,47	14,80	15,22
Kopma Uzaması (%)	-25	-10,26	-14,18	-12,20

2.4.2. PA7501 ve PTFE Malzeme Ürün Performans Testleri ve Sonuçları

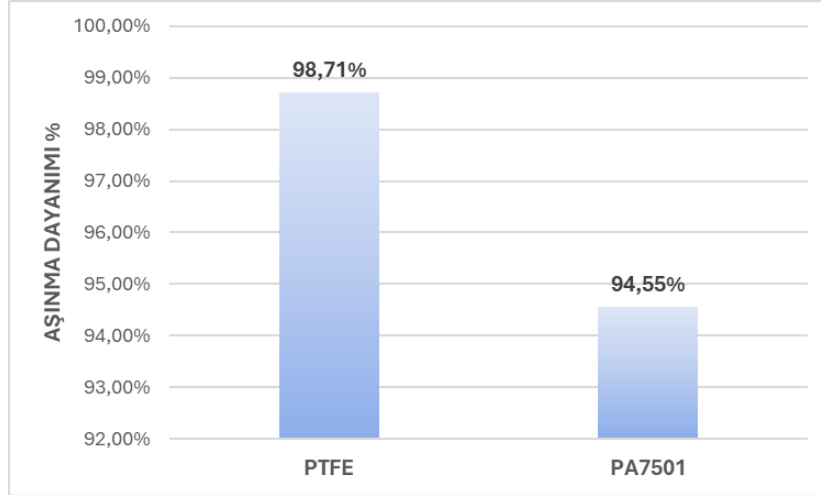
Malzemelerin Kastaş piston keçelerinde ürün performans testleri gerçekleştirilmiştir. Ürünler şemada görüldüğü gibi piston başına diğer sızdırmazlık elemanları ile monte edilmiş ve test sıvısı sisteme doldurulmuştur. Basınç verilerek test başlatılmıştır. 0km, 25km, 50km, 75km ve 100km de sızıntı miktarları ölçülmüştür. Test koşulları Tablo 3'te sunulmuştur.



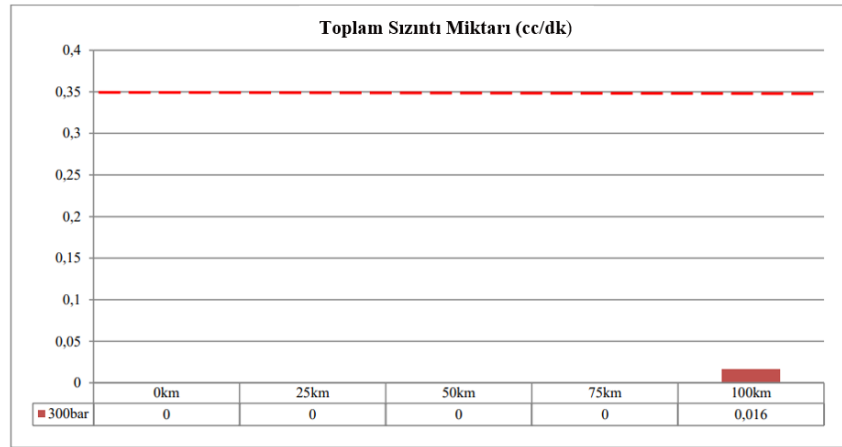
Şekil 10. Test Şeması

Tablo 5. PA7501 Test Koşulları

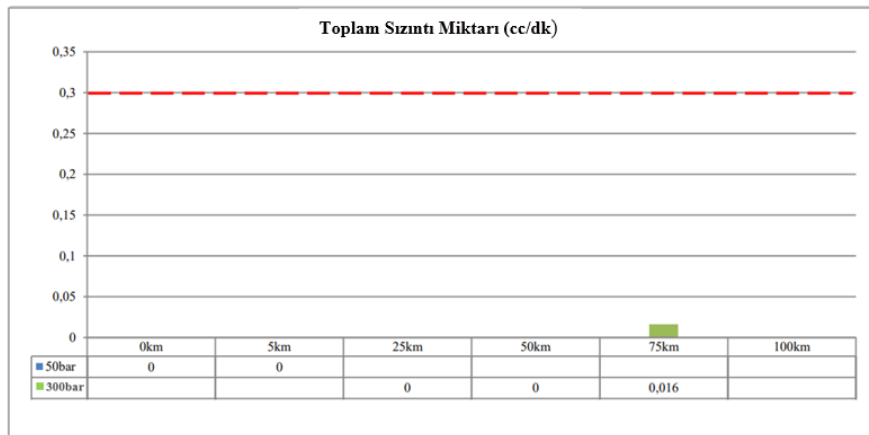
Pressure (Bar) :	300
Speed (m/s):	0,3
Target Distance (km):	100
Temperature (°C):	80
Range of Extrusion Gap (mm):	0.25
Media:	Vg 46 Hydraulic Oil



Şekil 11. PTFE ve PA7501 Malzemelerinin Aşınma Dayanımı Grafiği



Şekil 12. PA7501 Malzemeli Ürünün Sızıntı Test Grafiği



Şekil 13. PTFE Malzemeli Ürünün Sızıntı Test Grafiği

3. SONUÇ

PFAS yasal gereklilikleri için geliştirilen alternatif kauçuk türleri aynı formülasyonda denenmiş olup Kastaş Sızdırmazlık Teknolojilerine ait FK7001 kodlu referans hamur ile aynı proses koşullarında hazırlanmıştır. Hamurların standartlar kapsamında testleri tamamlanmıştır.

Sonuçlara bakıldığında rheometre testi numune denemelerinde referansa yakın değerler elde edilmiştir, bir uygunsuzluk gözlenmemiştir. Çekme kopma testinde kopma dayanımı, uzama ve sertlik parametreleri incelenmiş olup sertlik değerlerinde minör farklılıklar görülmüştür. Bu farklılıkların mekanik dayanım üzerinde majör bir etki yaratmayacağı öngörülmüştür. Kopma uzama sonuçlarında Numune 2 ile Referans değeri elde edilirken Numune 1 de daha az uzama değeri elde edilmiştir. Yapılan sıkıştırılabilirlik test sonuçları incelendiğinde her iki numunede de uygun oranda geri toplanabilme yeteneği göstermiştir.

Yaşlandırma testi çalışmalarında üç farklı medya kullanılmıştır. İlk olarak numuneler etüvde kuru havaya maruz bırakılmış ve numune kauçuklar üzerinde oksidasyon gerçekleşip gerçekleşmeyeceği gözlemlenmek istenmiştir. Test sonrası değişim miktarları referansa yakın olup çapraz bağları varlığını koruyarak oksidasyona referans seviyede direnç gösterdiği gözlemlenmiştir.

ASTM1 ve FUEL C medyalarında yapılan çalışmalarda referans değer seviyesinde sonuçlar elde edilmiş olup minör farklılıkların malzeme çalışma ömründe ve performansında büyük bir etki oluşturmayacağı öngörülmüştür.

PFAS içermeyen alternatif malzeme çalışmaları kapsamında, referans malzeme olan PTFE yerine PA7501 malzemesi kullanılarak denemeler gerçekleştirilmiş ve çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Yapılan aşınma dayanımı testlerinde, PA7501 malzemesinin performansı PTFE'ye oldukça yakın seviyelerde ölçülmüştür. Testler sonucunda, sızdırmazlık performansı açısından ürün üzerindeki malzeme etkisi gözlemlenmiş benzer test koşullarında, sızıntı miktarlarında da PTFE ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir. PA7501 malzemesi, referans PTFE'nin kabul edilen sınır değerlerine göre incelendiğinde olumlu bulunmuş olup, bu doğrultuda PA7501 malzemenin ürün üzerindeki diğer parametreler üzerindeki etkisinin detaylı olarak incelenmesi planlanmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, çevre ve insan sağlığı açısından zararlı olduğu bilinen ve gelecekte kullanımının yasaklanması öngörülen PFAS bileşenlerine alternatif malzemelerle yürütülen bu çalışma, sürdürülebilirlik ve çevresel uyumluluk açısından gelecek vaat etmektedir. Hem firma hem sektör için bir farkındalık oluşturulmuş ve PFAS Free kauçuklar teorik ve deneysel olarak değerlendirilmiştir. İlerideki aşamalarda sızdırmazlık ürünleri üzerindeki tüm etkilerinin araştırılması çalışmanın sürdürülebilirliği için hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] *Hidrolik Teknik Bilgiler*. (2025). Kastaş Sızdırmazlık Teknolojileri: <https://www.kastash.com/> adresinden alındı
- [2] S. L. ve arkadaşları (2012, July 25). Accelerated wear test of FKM elastomer for life prediction of seals. *Polymer Testing*.
- [3] HANDBOOK, P. (tarih yok). *Hydraulic Seals*. Catalog_HydrSeals_PTD3350-EN.
- [4] *Challenge for Seal Selection*. (2025, January). Angst+Pfister: <https://www.angst-pfister.com/media-resources/solutions-hub/pfas-free-sealing-selection.html> adresinden alındı
- [5] ISO. (2023). *Rubber — Measurement of vulcanization characteristics using curemeters* (ISO 6502-3:2023). International Organization for Standardization.
- [6] ISO. (2017). *Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties* (ISO 37:2017). International Organization for Standardization.
- [7] (Zwick Roell, tarih yok)

- [8] ISO. (2019). *Rubber, vulcanized or thermoplastic -- Determination of hardness -- Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness)* (ISO 48-4:2019). International Organization for Standardization.
- [9] ISO. (2022). *Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of the effect of liquids* (ISO 1817:2022). International Organization for Standardization.
- [10] (Ezgi Erbek Cömez, 2023)
- [11] ISO. (2023). *Rubber, vulcanized or thermoplastic — Accelerated ageing and heat resistance tests* (ISO 188:2023). International Organization for Standardization.
- [12] ISO. (2019). *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of compression set - Part 1: At ambient or elevated temperatures* (ISO 815-1:2019). International Organization for Standardization.

ÖZGEÇMİŞ

Barış ÇAYLAK

1988 yılı İstanbul doğumludur. 2012 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Viking International Ltd. şirketinde sondaj akışkanları mühendisi olarak; Petlas şirketinde karışım geliştirme mühendisi olarak çalışmıştır. 2020 yılından bu yana Kastaş Sızdırmazlık Teknolojilerinde çalışmakta ve Malzeme Teknolojileri Kıdemli Yöneticisi görevini yerine getirmektedir.

Cem TANYERİ

1986 yılı İzmir doğumludur. 2009 yılında SDÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2012 yılında Ege Üniversite Sosyal Bilimler Enstitüsünde İşletme yönetimi yüksek lisansını tamamlamıştır. 2022 yılında İKÇÜ Fen Bilimleri Fakültesi Malzeme Bölümünde Yüksek Mühendis unvanını almıştır. KLS Klima şirketinde üretim ve proje mühendisi olarak; Emas şirketinde satınalma mühendisi olarak çalışmıştır. 2013 yılından bu yana Kastaş Sızdırmazlık Teknolojilerinde çalışmakta ve Test Merkezi ve Simülasyon Müdürü görevini yerine getirmektedir.

Edanur ALBAYRAK

2000 yılı İzmir doğumludur. 2023 yılında Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2023 yılından bu yana Kastaş Sızdırmazlık Teknolojilerinde çalışmakta ve Arge Mühendisi görevini yerine getirmektedir.