



EPDM Kauçuğun Mekanik ve Yanma Özelliklerine Alüminyum Trihidroksitin Etkisinin İncelenmesi

Melisa İŞİN^{1,*} , İlker KÖPRÜ¹ , Salih Hakan YETGİN² 

¹ Seçil Kauçuk San ve Tic. A.Ş. Tarsus, Mersin, Türkiye

² Tarsus Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Gönderim 31/10/2024
Revizyon 25/11/2024
Kabul 28/11/2024

Anahtar Sözcükler:

EPDM
Alüminyum trihidroksit
Mekanik özellikler
Yanma özelliği
Limit oksijen indeksi

ÖZET

Bu çalışmada farklı oranlarda alüminyum trihidroksit ($Al(OH)_3$) yanmaz katkı ilaveli EPDM kauçukların reolojik, mekanik, UL94 yanmazlık ve limit oksijen indeksi (LOI) özelliklerine $Al(OH)_3$ katkısının etkisi incelenmiştir. EPDM kauçuğuna $Al(OH)_3$ ağırlıkça %10, 30, 50 oranlarında ilave edilmiştir. Laboratuvar tipi banbury kullanılarak $Al(OH)_3$ katkılı EPDM kauçukları hazırlanmış, preste vulkanize edilmiş ve test plakaları elde edilmiştir. $Al(OH)_3$ miktarının artması ile minimum tork (ML) ve maksimum tork (MH) artmıştır. EPDM kauçuğun 66 Shore A olan sertlik değeri $Al(OH)_3$ ilavesi ile 87 Shore A elde edilmiştir. Çekme mukavemeti ve kopma uzaması azalırken kalıcı deformasyon ve abrasif aşınma miktarı artmıştır. EPDM kauçuğuna ilave edilen 25phr oranındaki $Al(OH)_3$ yatay yanma hızını azaltmıştır. EPDM kauçuğunun %22.3 olan LOI değeri $Al(OH)_3$ ilavesi ile %37.4 elde edilmiştir.

1. GİRİŞ

Polimerler günlük yaşantımızda kullandığımız ürünlerin temel maddesini oluşturmaktadır. Kauçuklar, polimer sınıfında göstermiş oldukları molekül dizilişleri ve davranışlarından dolayı elastomer grubunda yer almaktadır. EPDM (etilen propilen dien monomer), vulkanizasyon için çapraz bağlama yerleri sağlayan etilen, propilen ve az miktarda bir dien monomerlerini içeren kopolimer olmakla birlikte moleküler yapısı ile de karakterize edilebilen sentetik bir kauçuktur. EPDM, -40 °C ila 120 °C arasında bir çalışma sıcaklığı aralığı ile üstün esneklik ve dayanıklılık sergiler. Polar çözücülere, asitlere ve bazlara karşı kimyasal direnci, kullanımını daha da artırır. Ek olarak, EPDM kauçuğunun yaşlanmaya ve ozon bozulmasına karşı doğal direnci ve UV stabilitesi otomotivden inşaatı kadar değişen farklı uygulama alanlarında çok yönlülüğü ile ve bu alanlardaki uygulamaları için ideal bir aday olmasını

sağlamaktadır (Ibarra vd.; 2005).

Bir kauçuk polimeri tek başına ticari değeri kısıtlı olan yetersiz özelliklere sahiptir. Özelliklerini iyileştirmek ve ticari olarak kullanışlı hale getirmek için kauçuk çeşitli katkı malzemeleri ile birleştirilmelidir. Sentezi ve potansiyeli yüksek modifikasyonları ile ilgili devam eden araştırmalar, kusursuz kullanım uygulanabilirliği sağlanabilir (Tang vd., 2013; Zhao vd., 2021). Karbon bazlı kauçuğun bir dezavantajı, kolayca yanması, hızlı yangın yayılımına ve yüksek miktarda yoğun duman emisyonuna neden olmasıdır. Alev geciktirici dolgu maddeleri, alev oluşumunu önlemek, bastırmak veya geciktirmek için üretim sırasında polimer ve kauçuk malzemelere yaygın olarak eklenir.

Katkı tipi alev geciktiricideki alev geciktiriciler, magnezyum hidroksit, alüminyum hidroksit, amonyum polifosfat ve benzeri gibi organik ve

inorganik alev geciktiriciler içerir. Halojen içeren alev geciktiricilerin kullanımı, çeşitli malzemelerdeki yanıcılığı azaltma özellikleriyle yaygın olarak kullanılmıştır fakat bununla birlikte, bu katkı maddelerinin yanması önemli miktarda duman ve zehirli gaz üretmektedir (Wan vd., 2020; Khattab vd., 2016), bu nedenle yangın güvenliği ve çevresel etki ile ilgili endişelerin artmasına sebebiyet vermiştir. Sonuç olarak, halojenli bileşiklerin ilişkili tehlikeleri olmadan yangına dayanıklılık sağlamayı amaçlayan aynı zamanda yeşil çevre dostu olan halojensiz alev geciktiricilere yönelik araştırmalar yaygınlaşmaya başlamıştır (Levchik ve Weil, 2008; Weil ve Levchik, 2009; Wan vd., 2020).

Alüminyum trihidroksit (ATH), aynı zamanda bir duman baskılayıcı olan iyi bilinen bir alev geciktiricidir. ATH'nin diğer benzer yanmaz katkılara göre en büyük avantajları, düşük maliyeti ve düşük toksisitesidir, toksik veya aşındırıcı maddeler gelişmez ve diğer alev geciktiricilerle birlikte kullanılabilirler (Balachandran Nair vd., 2012). Alüminyum trihidroksit (ATH), yanma sırasında hem yoğunlaştırılmış hem de gaz fazlarında çalışan çoklu mekanizmalar yoluyla etkili bir halojensiz alev geciktirici olarak işlev görmektedir. Yakıtın değiştirilmesi, suyun serbest bırakılması ve koruyucu bir tabaka oluşturulması ile ATH, duman ve zehirli gazların üretimini en aza indirirken malzemelerin yangına dayanıklılığını artırmaktadır. Bu, onu daha güvenli, halojensiz alev geciktirici sistemlerin geliştirilmesinde değerli bir seçenek haline getirmektedir (Zirnstein vd., 2018; Hull vd., 2011; Di vd., 2023). Yeterli bir alev geciktirici etkisi elde etmek için, ATH gibi mineral dolgu maddeleri, genellikle %40–70 olan yüksek yüklemelerde kullanılmalıdır. Bu yüksek yüklemeler genellikle kauçuk bileşiklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini bozmaktadır (Hornsby, 2001). Farklı kauçuklar/termoplastiklerde ATH ilavesinin alev geciktiricilik, mekanik ve reolojik özelliklere etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda bu malzemelerin dayanım, rijitlik, esneklik, yoğunluk ve yanıcılık gibi

özelliklerine ATH miktarının ve ATH toz boyutunun etkisi olduğu belirtilmiştir (Natinee vd., 2019; Canaud vd., 2001; Zhang vd., 2005). Canaud ve arkadaşları (Canaud vd., 2001), karbon siyahı dolgu etilen-propilen-dien monomer kauçuğunun (EDPM) yangın geciktirici özelliklerini incelemiştir. 160/15 ve 170/7 phr/phr ATH/karbon siyahı içeren EDPM bileşiklerinin düşük ve orta gerilim altında tel ve kablolarla kullanılmaya en uygun malzeme olduğu belirtilmiştir. Zhang ve arkadaşları (Zhang vd., 2005), etilen-vinil asetat (EVA) artan ATH (ağırlıkça %20-%60) ilavesinin modülü, çekme mukavemetini ve kopma uzamasını azalttığını, ancak termal ve alev geciktirici özellikleri önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

EPDM kauçuğunun avantajlarının yanında en önemli dezavantajı son derece yanıcı bir kauçuk olmasıdır. Bu durum EPDM kauçuğunun farklı sektörlerde kullanımını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, EPDM kauçuğunun yanma direncini artırmak için ağırlıkça %10-30-50 oranlarında alüminyum trihidroksit (ATH) ilave edilmiş ve üretilen EPDMATH kauçukların reolojik, mekanik ve yanmazlık özelliklerine alüminyum trihidroksit (ATH) etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla EPDM/ATH kauçuklarına reoloji ve viskozite testleri yanında çekme testi, kalıcı deformasyon testi, aşınma testi yapılmıştır. Ayrıca, EPDM/ATH kauçukların UL94 yanmazlık ve LOI özellikleri belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak yağla genişletilmiş ticari bir EPDM kauçuğu (Keltan 8550), vulkanizasyon işlemi için ise yine ticari olarak piyasada kullanılan kükürt kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak 2.3 g/cm³ yoğunluğa sahip OMYA Madencilik San. Ve Tic. A.Ş. (Kocaeli, Türkiye) şirketinden temin edilen alüminyum trihidroksit (Al(OH)₃) kullanılmıştır. Çizelge 1'de EPDM ve EPDM/ATH kompozitlerin üretiminde kullanılan oranlar phr cinsinden verilmiştir.

Çizelge 1. EPDM ve EPDM/ATH kompozitlerin formülasyonu.

	EPDM	10ATH	30ATH	50ATH
EPDM	100	100	100	100
Karbon siyahı	50	50	50	50
Beyaz dolgu	20	20	20	20
Yağ	15	15	15	15
Çinko oksit	5	5	5	5
Stearik asit	1	1	1	1
Sülfür	1	1	1	1
MBT	0.5	0.5	0.5	0.5
TMTD	1	1	1	1
ATH	0	25	85	200
Sertlik	66	69	78	87
Yoğunluk	1.11	1.18	1.33	1.51

2.2. Metot

Üretim Aşamaları ve Karakterizasyon

ATH katkılı EPDM kompozitleri 1.5 lt'lik laboratuvar tipi mini banbury ile hamur haline getirilmiştir. Üretilen numunelerin reometre testleri Alpha MDR 2000 marka reometre cihazında ASTM D 5289 standardına uygun olarak 200 oC ve 5 dakikada yapılmıştır. Deney plakaları 180 °C sıcaklıkta 20 dakika preste vulkanize edilerek elde edilmiştir. Çekme testleri, ASTM D638 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Testler, Zwick marka Z020 model bir çekme test cihazında 200 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir çekme test numunesi en az 5 ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Kalıcı deformasyon testleri DIN 53517 standardına göre 100 °C'de 22 saat ve %25 oranında sıkıştırma ile yapılmıştır. Sertlik testleri DIN 53505 standardına uygun olarak yapılmış sertlikler Shore A cinsinden ölçülmüştür. Yoğunluk testleri ISO 1183 standardı kullanılarak Arşimet prensibine göre yapılmıştır. EPDM ve ATH katkılı EPDM kauçukların aşınma testleri DIN ISO 4649 (DIN 53516) standardına göre 7.5 N yük ve 200 mm kayma yolu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yatay yanmazlık testleri, DIN 4102-2 (UL94/ISO 3795) standartlarına göre Fire Testing Technology-FTT-01 test cihazında gerçekleştirilmiştir. Limit oksijen indeksi (LOI) testi, bir oksijen indeksi ölçer (Concept Equipment, Birleşik Krallık) EN ISO 4589-2 standardına göre 112×6.5×3 mm³ ölçülerindeki

numuneler ile yapılmıştır. Farklı oksijen konsantrasyonlarında numunelerin incelenmesiyle sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) belirlenmiştir. Şekil 1'de deneysel çalışmalarda kullanılan cihazların resimleri verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hazırlanan EPDM kauçuğu ile ATH katkılı EPDM kompozitlerin minimum ve maksimum tork (ML ve MH), ön pişme süresi (t_{s2}) ve optimum pişme süresi (t_{90}) değerleri gibi önemli reolojik parametreleri içeren reometre testi sonuçları Şekil 2a ve Şekil 2b'de gösterilmiştir. Kauçuk hamurların viskozitesi ile orantılı olan ML değerleri ATH ilavesi ile önemli oranda artmıştır. Yanmazlık özelliği sağlayan ATH gibi kimyasallar, aynı zamanda dolgu maddeleri de olduğundan dolayı viskozite yani ML değerlerinin artışının normal olduğu düşünülmektedir. EPDM kauçuğuna ilave edilen 200 phr oranındaki ATH dolgusu ML değerini %320 oranında artırmıştır. MH değerlerinde de artan ATH dolgusu ile %90 oranında bir artış gözlenmiştir. EPDM kauçuğuna göre daha rijit bir katkının ilave edilmesi sertlik değerlerini artırmış (Çizelge 1) ve MH değerleri artmıştır. Ön pişme süresi (t_{s2}) değerlerinde ise bir azalma söz konusudur. EPDM kauçuğuna ilave edilen ATH dolgusu vulkanizasyon başlangıç süresini yani ön pişme süresini azaltmıştır. 200 phr oranında ATH ilavesi ile ön pişme süresi %43 oranında azalmıştır.



1.5 lt'lik banbury



Reoloji test cihazı



Pres



Çekme test cihazı



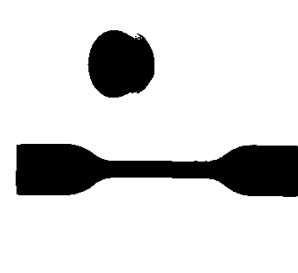
Aşınma test cihazı



Sertlik testi

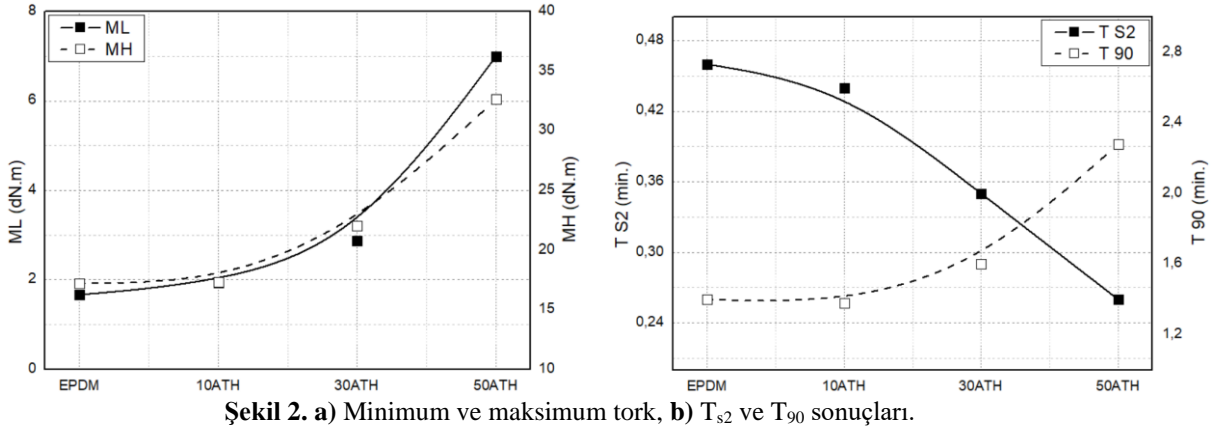


Kalıcı deformasyon testi



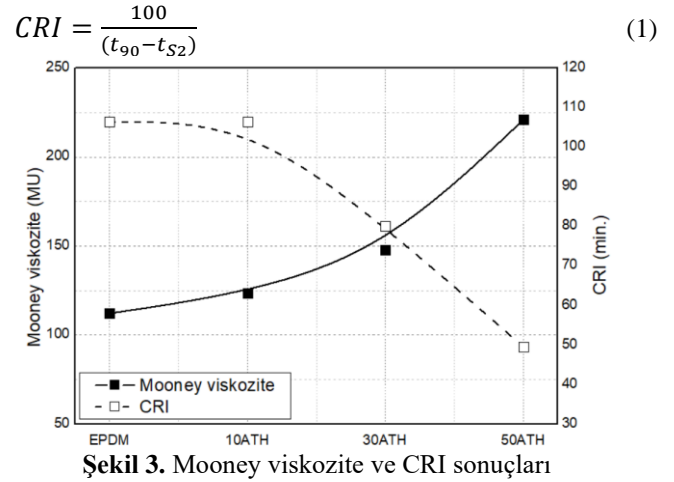
Deney numuneleri

Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar

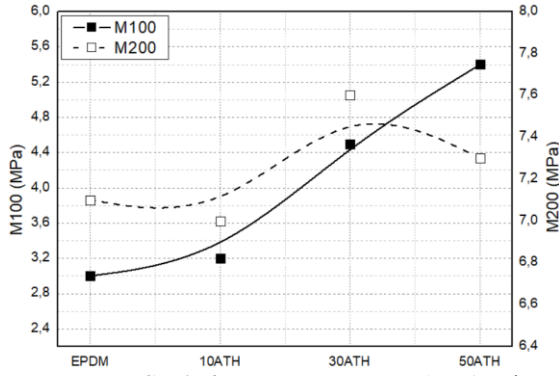


Optimum pişme süreleri (t_{90}) ise ATH ilavesi ile artmıştır. EPDM kauçuğun 1.4 dak. olan optimum pişme süresi 25, 85 ve 200 phr oranlarında ATH ilavesi ile 1.38, 1.6 ve 2.28 dak. elde edilmiştir. 50ATH kompoziti, EPDM kauçuğuna göre optimum pişme süresini %62 oranında artırmıştır. Çizelge 1'deki yoğunluk değerleri incelendiğinde EPDM kauçuğuna ilave edilen farklı oranlardaki ATH dolgusu ile yoğunluk değerleri artmıştır. Bu artış, ATH yoğunluğunun 2.23 g/cm³ olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu artış gerek üretim prosesini gerekse kaliteyi etkileyecek düzeyde değildir.

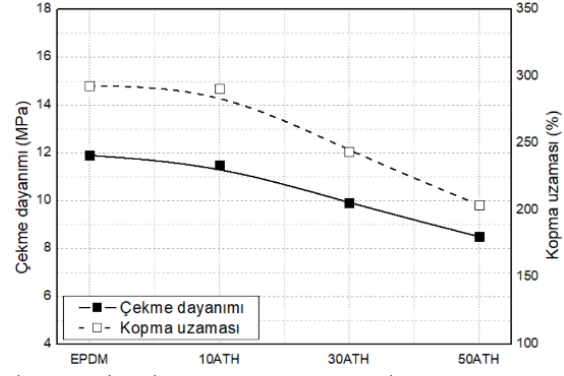
Şekil 3'te EPDM kauçuğu ile EPDM/ATH kompozitlerin akmaya karşı direncini ifade eden Mooney viskozite değeri ile kür indeksi/kür oranı indeksi olarak ifade edilen CRI sonuçları verilmiştir. EPDM kauçuğunun Mooney viskozite değeri 112 MU iken 10ATH, 30ATH ve 50ATH kompozitleri için Mooney viskozite değerleri önemli oranda artmış ve sırasıyla 123.6, 148 ve 221 MU elde edilmiştir. Artan ATH miktarına bağlı olarak Mooney viskozite değerleri 10.1, 31.9 ve 96.9 oranlarında artmıştır. Polimer ve dolgu maddesi arasındaki güçlü etkileşim polimer zincirinin hareketliliğini yavaşlatmış ve dolayısıyla yüksek oranlarda ilave edilen ATH dolgusu EPDM kauçuklarının viskozitesini önemli ölçüde artırmıştır. Eşitlik 1'de kürlenme endeksi, yani kürlenme oranı endeksini (CRI) tanımlayan (Surya ve Khosman, 2020; Surya vd., 2018) ve t_{90} ile t_{S2} arasındaki farkı gösteren CRI sonuçları değerlendirildiğinde, EPDM kauçuğuna ilave edilen ATH dolgusu CRI değerlerini azaltmıştır. 50ATH kompoziti için CRI değerindeki azalma %53.4 oranında elde edilmiştir.



Şekil 4a ve Şekil 4b'de EPDM kauçuğu ile EPDM/ATH kompozitlerin çekme testi sonrası elde edilen M100 ve M200 elastiklik modülü ile çekme mukavemeti ve kopma uzaması sonuçları verilmiştir. %100 uzamadaki gerilim ile %200 uzamadaki gerilimi ifade eden M100 ve M200 değerleri, farklı oranlarda ATH ilavesi ile artmıştır. EPDM kauçuğu ile karşılaştırıldığında 50ATH kompozitin M100 çekme modülü %80 oranında artarak 5.4 MPa değerine ulaşmıştır. Bununla birlikte 50ATH kompozitin M200 çekme modülü ise %3 oranında artmış ve 7.3 MPa değerine ulaşmıştır. İnorganik dolgu maddelerinin polimer/kauçuk sistemlerine ilave edilmesi, dolgu maddesinin daha yüksek rijitliğe sahip olmasından dolayı elastiklik modülünde bir artışa sebep olmaktadır (Fu vd., 2008). ATH ilaveli EPDM kompozitlerin çekme mukavemetleri ile kopma uzaması sonuçları değerlendirildiğinde, 10ATH kompozitin çekme mukavemeti %3.3 kopma uzaması %0.6 oranında, 30ATH kompozitin çekme mukavemeti %16.8 kopma uzaması %16.7 oranında ve 50ATH kompozitin çekme mukavemeti %28.5 kopma uzaması %30.3 oranında azalmıştır. Yanmaz katkı olarak kullanılan ATH kimyasalının yüksek oranlarda kullanılması nedeniyle dolgu ile kauçuk



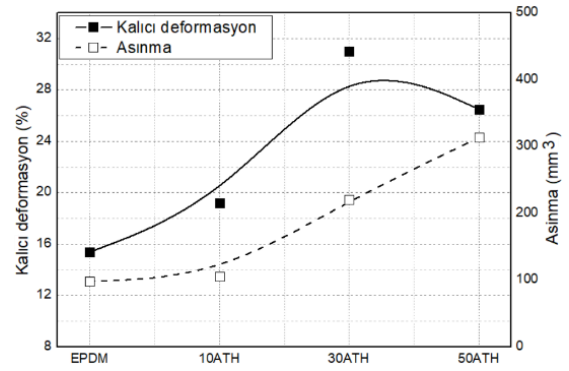
Şekil 4.a) M100 ve M200 ile b) çekme mukavemeti ve kopma uzaması sonuçları.



arasındaki etkileşimin azalması topaklanmaya sebep olmuş olabilir (Ekwueme ve Igwe, 2018). ATH katkısı, topaklanma nedeniyle kauçuktan gelen gerilimleri düzgün bir şekilde iletememiş ve çekme mukavemeti azalmıştır. Partikül boyutunun yüksek olması polimer-katkı etkileşimi yerine katkı-katkı etkileşimini desteklemiş ve bu durum topaklanma mekanizmasının hızlanmasına ve dolayısıyla mekanik özelliklerin azalmasına neden olmuştur (Maiti vd., 2016). EPDM kauçuğuna ilave edilen ATH dolgusu, kauçuk zincirlerinin hareketini kısıtlamış, daha sert (Çizelge 1) ve daha rijit (Şekil 4.a) EPDM kauçukların elde edilmesine yol açmıştır. EPDM kauçuğuna ilave edilen ATH dolgusu rijitliği artırırken sünekliliği azaltmıştır. Bu durum ATH dolgu ilavesi ile artan çapraz bağ yoğunluğu ile de ilişkili olabileceği göstermektedir. EPDM ve EPDM/ATH kompozitlerin reometre testleri sonrası elde edilen tork artış oranı ($\Delta M = M_H - M_L$) sonuçları desteklemektedir. EPDM kauçuğuna ilave edilen ATH dolgusunun topaklanması ve dolayısıyla gerilim yığılmaları matrisin erken deforme olmasına ve kopma uzamasının azalmasına sebep olmuş olabilir.

EPDM kauçuğuna ilave edilen ATH yanmazlık dolgusunun kalıcı deformasyon ve abrasif aşınma miktarı üzerindeki etkisini belirlemek için yapılan kalıcı deformasyon ve aşınma testi sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. EPDM kauçuğuna ilave edilen ATH dolgusu ile kalıcı deformasyon değerlerinin arttığı gözlenmiştir. EPDM kauçuğu ile karşılaştırıldığında, bu artış 200 phr ATH ilavesinde %72.3 oranında elde edilmiştir. Abrasif aşınma sonuçları değerlendirildiğinde ise EPDM kauçuğuna ilave edilen ATH dolgusu aşınma miktarını önemli oranda artırmıştır. Bu artış, 10ATH, 30ATH ve 50ATH kompozitleri için sırasıyla %8.1, %125.0 ve %219.8 oranlarında elde edilmiştir. Daha düşük aşınma kaybı





daha iyi aşınma direncini göstermektedir. En düşük aşınma miktarı EPDM kauçuğunda elde edilmiştir.



Şekil 5. Kalıcı deformasyon ve abrasif aşınma sonuçları

EPDM ve EPDM/ATH kompozitlerin yatay yanma testi ve LOI testi sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Yatay yanma testinde numuneleri tutuşturmak için 15 sn. boyunca alev uygulanarak tutuşma sağlanmıştır. EPDM kauçuğu ve farklı oranlarda ATH ilaveli EPDM kompozitlerin yanma testi görüntüleri Çizelge 2'de verilmiştir. EPDM kauçuğunun yanma hızı ortalama 6.8 mm/dak. iken 10ATH kompozitinin yanma hızı ortalama 2.7 mm/dak. elde edilmiştir. EPDM kauçuğuna ilave edilen 25phr oranındaki ATH yatay yanma hızını %60 oranında azaltmıştır. 30ATH ve 50ATH kompozitlerinin yatay yanma testlerinde alev ile tutuşma gerçekleşmiş ancak alev ilerlemesi gerçekleşmemiştir. Benzer sonuçlar Benjamin ve arkadaşları (Benjamin, vd., 2019) tarafından yapılan amonyum polifosfat (APP), alüminyum trihidroksit (ATH) ve polianilin (PANI) ilaveli etilen propilen dien monomer (EPDM) kauçuğunda elde edilmiştir. LOI testi sonuçları değerlendirildiğinde, EPDM kauçuğunun %22.3 olan LOI değeri ATH ilavesi ile gelişmiş ve katkı oranına bağlı olarak %23.9-%37.4 arasında elde edilmiştir. 10ATH, 30ATH ve 50ATH kompozitlerin LOI değerleri katkısız EPDM kauçuğu ile karşılaştırıldığında sırasıyla %7.17, %27.8 ve %67.7 oranlarında geliştirmiştir. ATH, ısıya maruz kaldığında su buharı ve alüminyum oksit

Çizelge 2. EPDM ve EPDM/ATH kompozitlerin yatay yanma hızı ve LOI değerleri

	EPDM	10ATH	30ATH	50ATH
				
Yatay yanma hızı, mm/dak	6.8	2.7	-	-
LOI değerleri, %	22.3	23.9	28.5	37.4

oluşmaktadır. Bu işlem yanma reaksiyonlarını kontrol altında tutmakta, alevi sınırlamakta ve yayılmayı önlemektedir. Dayang ve arkadaşları da (Dayang vd., 2015) yaptıkları çalışmada yangın geciktirici mekanizmaların endotermik olarak ayrışma, su salınımı ve Al_2O_3 gibi oksit kalıntısı oluşumunun bir kombinasyonunu içeren yoğunlaştırılmış faz etkisinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. ATH'nin daha yüksek özgül yüzey alanının polimer bileşiklerinde daha iyi alev geciktiricilik ile birlikte olduğu bildirilmiştir.

4. SONUÇ

$Al(OH)_3$ ilave edilmiş EPDM kauçukların özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda;

1. Reoloji testi sonuçları değerlendirildiğinde $Al(OH)_3$ miktarına bağlı olarak minimum tork (ML) ve maksimum tork (MH) değerleri artmıştır.
2. $Al(OH)_3$ ilavesi ile EPDM/ATH kompozitlerin çekme mukavemeti ve kopma uzaması azalırken çekme modülü artmıştır.
3. $Al(OH)_3$ miktarına bağlı olarak kalıcı deformasyon ve aşınma miktarı artmıştır.
4. EPDM kauçuğuna ilave edilen 25phr oranındaki $Al(OH)_3$ yatay yanma hızını %60 oranında azaltmıştır.
5. EPDM kauçuğunun %22.3 olan LOI değeri 50 phr $Al(OH)_3$ ilavesi ile %37.4 elde edilmiştir.

KAYNAKÇA

Balachandran Nair, A., Kurian, P. and Joseph, R. (2012). Effect of aluminium hydroxide, chlorinated polyethylene, decabromo biphenyl oxide and expanded graphite on thermal, mechanical and

sorption properties of oil-extended ethylene-propylene-diene terpolymer rubber. *Materials & Design*, 40, 80–89.

doi: 10.1016/j.matdes.2012.03.032

Benjamin, Z., Dietmar, S. and Bernhard, S. (2019). Mechanical and fire properties of multicomponent flame retardant EPDM rubbers using aluminum trihydroxide, ammonium polyphosphate, and polyaniline. *Materials*, 12, 1932. doi:10.3390/ma12121932

Canaud, C., Visconte, L.L.Y. and Nunes, R.C.R. (2001). Mechanical and flammability properties of ATH-filled EPDM compositions. *Macromolecular Materials and Engineering*. 286, 377-381.

Di, Z., Zheng, W., Yue, Y., Jingjing, L., Chunqing, H., Ning, Q., Xiangyang, P., Zhen, H. and Pengfei, F. (2023). Effect of aluminum hydroxide (ATH) content on free volumes and water barrier property of silicone rubber. *4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS2019) JJAP Conf. Proc.*, 011203.

Ekwueme, C C. and Igwe, I.O. (2018). Cure characteristics and mechanical properties of pineapple leaf fibre filled natural rubber, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6, 601-617. doi: 10.4236/jmmce.2018.66043.

Fu, S.Y., Feng, X.Q., Lauke, B. and Mai, Y.W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Composites Part B*, 39(6), 933–961. doi:10.1016/j.compositesb.2008.01.002

Hull, T.R., Witkowski, A. and Hollingbery, L. (2011). Fire retardant action of mineral fillers. *Polymer Degradation and Stability*, 96(8), 1462–1469. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.006

- Hornsby, P.R. (2001). Fire retardant fillers for polymers. *International Materials Reviews*, 46(4), 199–210. doi: 10.1179/095066001771048763
- Ibarra, L., Posadas, P. and Esteban-Martínez, M. (2005). A comparative study of the effect of some paraffinic oils on rheological and dynamic properties and behavior at low temperature in EPDM rubber compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 97(5), 1825–1834. doi:10.1002/app.21954
- Khatab, M.A., Feteha A.H.F., Sadik, W.A. and Abdel-Bary, E.M. (2016). Effect of aluminium trihydrate as flame retardant on properties of a thermoplastic rubber nanocomposite. *Fire and Materials*, 41(6), 688-699. doi: 10.1002/fam.2411
- Levchik, S.V. and Weil, E.D. (2008). Developments in phosphorus flame retardants. *Advances in Fire Retardant Materials*, 41–66. doi: 10.1533/9781845694701.1.41
- Maiti, M., Basak, G.C., Srivastava, V.K. and Jasra, R.V. (2016). Mesoporous silica reinforced polybutadiene rubber hybrid composite, *International Journal of Industrial Chemistry*, 7, 131–141. doi: 10.1007/s40090-015-0062-8
- Natinee, L., Alif, W., Azizon, K. and Tadamoto, S. (2019). Mechanical, thermal and fire retardant Characteristics of NR/PP/ATH thermoplastic vulcanizates. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*. 16(10), 723-737.
- Tang, G., Hu, Y. and Song, L. (2013). Study on the Flammability and Thermal Degradation of a Novel Intumescent Flame Retardant EPDM Composite. *Procedia Engineering*, 62, 371–376. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.078
- Surya, I. and Khosman, H. (2020). The compounds of montmorillonite-filled natural rubber: Cure rate index, swelling and hardness properties. *AIP Conference Proceedings*, 2237(1). doi:10.1063/5.0005218
- Surya, I., Sukeksi, L. and Hayeemasae, N. (2018). Studies on cure index, swelling behaviour, tensile and thermooxidative properties of natural rubber compounds in the presence of alkanolamide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309, 012060. doi:10.1088/1757-899X/309/1/012060
- Wan, L., Deng, C., Zhao, Z.-Y., Chen, H. and Wang, Y.-Z. (2020). Flame Retardation of Natural Rubber: Strategy and Recent Progress. *Polymers*, 12(2), 429. doi: 10.3390/polym12020429
- Weil, E.D. and Levchik, Sergei. (2009). *Flame retardants for plastics and textiles: Practical applications*. 1-297.
- Zhang, X., Guo, F., Chen, J., Wang, G. and Liu, H. (2005). Investigation of interfacial modification for flame retardant ethylene vinyl acetate copolymer/alumina trihydrate nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*. 87, 411-418.
- Zhao, W., Kumar Kundu, C., Li, Z., Li, X. and Zhang, Z. (2021). Flame retardant treatments for polypropylene: Strategies and recent advances. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145, 106382. doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106382
- Zirnstein, B., Tabaka, W., Frasca, D., Schulze, D. and Schartel, B. (2018). Graphene/hydrogenated acrylonitrile-butadiene rubber nanocomposites: Dispersion, curing, mechanical reinforcement, multifunctional filler. *Polymer Testing*, 66, 268–279. doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.01.035