

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM) ve Stiren Bütadien (SBR) Kauçukların Kükürt ve Peroksit Vulkanizasyon ile Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Physical and Mechanical Properties of Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) and Styrene Butadiene Rubber (SBR) with Sulfur and Peroxide Vulcanization

Ali Öteleş¹ İlker Köprü¹ Salih Hakan Yetgin^{2*}

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

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

Geliş / Received: 17.10.2023

Kabul / Accepted: 31.10.2023

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author) Salih Hakan Yetgin shyetgin@gmail.com

ÖZ: Bu çalışmada, Stiren Bütadien Kauçuğu (SBR) ve Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM) kauçukların Kükürt ve Peroksit vulkanizasyon yöntemleri ile üretilerek fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. 1,5 lt'lik laboratuvar tipi mini banbury kullanılarak EPDM ve SBR hamur haline getirilmiştir. Elde edilen EPDM ve SBR hamurları preste 180 oC ve 20 dakika boyunca vulkanize edilerek test plakaları elde edilmiştir. Pres öncesi rehometri (MDR) ve Mooney viskozite testleri ile EPDM ve SBR hamurlarının reolojik ve akışkanlık özellikleri incelenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi ve kalıcı deformasyon testi, fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yoğunluk ve Shore A sertlik testleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda, CRI değerleri EPDM/P kauçuğu için %52,2, SBR/P kauçuğu için %2,8 oranında artmıştır. EPDM/P ve EPDM/K kauçukların mooney viskozite değeri değişmezken SBR/P kauçuğunun ise %16,7 oranında artmıştır. EPDM kauçuğun vulkanizasyon türüne bağlı olarak kopma mukavemeti ve kopma uzaması artarken SBR kauçuğun azalmıştır. EPDM/P kauçuğunun kalıcı deformasyon oranı %86,9 oranında artarken SBR/P kauçuğunun kalıcı deformasyon oranı %78,1 oranında azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Etilen Propilen Dien Monomer, Stiren Bütadien Kauçuğu, kükürt, peroksit, vulkanizasyon.

ABSTRACT: In this study, Styrene Butadiene Rubber (SBR) and Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) rubbers were produced by Sulfur and Peroxide vulcanization methods and their physical and mechanical properties were examined. EPDM and SBR were turned into dough using a 1,5-liter laboratory type mini bandury. The obtained materials was vulcanized in the press at 180 °C for 20 minutes, and test plates were obtained. Rheological and fluidity properties of EPDM and SBR rubbers were examined using pre-press rheometer (MDR) and Mooney viscosity tests. Tensile tests and permanent deformation tests were performed to determine mechanical properties and density and hardness tests were performed to determine physical properties. As a result of the study, CRI values increased by 52,2% for EPDM/P rubber and 2,8% for SBR/P rubber. While the Mooney density value of EPDM/P and EPDM/K rubbers did not change, it decreased by 16,7% of SBR/P rubber. Depending on the vulcanization type of EPDM rubber, the breaking strength and elongation at break increased, while the breaking elongation of SBR rubber decreased. While the compression set of EPDM/P rubber increased by 86,9%, the compression set of SBR/P rubber decreased by 78,1%.

Keywords: Ethylene Propylene Diene Monomer, Styrene Butadiene Rubber, sulfur, peroxide, vulcanization.

1. GİRİŞ

Kauçuklar, sentetik ve doğal kauçuk olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bütil-kauçuk (IIR), Poli-izopren-kauçuk (IR), butadien-kauçuk (BR), akrilo-nitril-bütadien-kauçuk (NBR), poli-kloropren (CR), silikon-kauçuk, etilen-propilen-dien-kauçuk (EPDM) ve stiren-bütadien-kauçuk (SBR), başlıca kullanılan sentetik kauçuklardır. Etilen-propilen-dien-monomer (EPDM) kauçuğu, ısı, ışık ve oksidasyona karşı dayanım, yüksek dolgu ve yağ alabilme özelliği ile düşük maliyetli karışımlar oluşturabilme, sulu ve konsantre asit ve alkalilere karşı yüksek dayanım, düşük yoğunluk nedeniyle hafif malzemeler üretilebilmesi ve iyi dielektrik özellikleri nedeniyle hortum ve profiller başta olmak üzere, otomotiv, inşaat ve makine ürünlerinde kullanım alanı bulan kauçuk türünden birisidir [1-4].

Stiren-bütadien-kauçuğu (SBR), stiren ve bütadien monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilen diğer bir sentetik kauçuk türüdür. Ağırlıkça üçte bir oranında stiren ve bütadienden oluşmaktadır. SBR kauçuğunun reolojik ve mekanik özellikleri polimerizasyon tipine bağlı olarak farklılıklar göstermekle birlikte yapısındaki stiren oranına bağlı olarak camsı geçiş sıcaklığı artmakta ve rijitliği azalmaktadır. Aynı zamanda, işlenebilirlik zorlaşmakta ancak mekanik özellikleri iyileşmektedir. Katkı maddeleri ile birlikte iyi aşınma direnci ve iyi yaşlanma kararlılığı göstermektedirler. Otomotiv sektöründe araç lastiği olarak %75 oranında kullanılmakla birlikte hortum, konveyör kayışı, spor malzemeleri ve ayakkabı tabanında da tercih edilen bir kauçuk türüdür [5-8].

Vulkanizasyon, çapraz bağlanma reaksiyonu (üç-boyutlu network) ile kauçuk malzemelerin kimyasal yapılarının değiştirilerek geri dönüşümsüz olarak yüksek plastik özellikler yerine yüksek elastik özelliklerin elde edilmesi işlemidir [4], [9, 10]. Günümüzde vulkanizasyon işlemi kauçuk teknolojisindeki en önemli prosestir. Kimyasal yapıları ve doğaları ile özellikleri bakımından farklılık gösteren birçok ticari kauçuk türü mevcuttur ve dolayısıyla bu kauçukların vulkanizasyonları için farklı türde vulkanizasyon sistemleri geliştirilmiştir [11]. En çok kullanılan vulkanizasyon sistemleri kükürt, peroksit, metal oksitler ile vulkanizasyon ve fenolik reçinelerdir.

Günümüzde pratikte en yaygın kullanılan vulkanizasyon sistemleri ise kükürt ve peroksittir [4], [11-14]. Tercih edilen vulkanizasyon türü, elde edilen çapraz bağların tipini, yapısını ve özelliklerini dolayısıyla elde edilen vulkanizatların özelliklerine etki etmektedir [11, 14].

Kükürt vulkanizasyonu 180 yılı aşkın süredir bir süreç olarak bilinmesine rağmen, hangi kimyasal mekanizma ile gerçekleştiği henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Peroksit vulkanizasyonu çok daha sonra keşfedilmesine rağmen, kimyasal süreci daha iyi araştırılmıştır. Bununla birlikte, her iki tip kauçuk vulkanizasyonunun da avantajları ve dezavantajları vardır [4,15]. Kükürt vulkanizasyonunun avantajları, elde edilen vulkanizatların iyi mekanik, fiziksel ve dinamik özelliklerle karakterize edilmesidir. Nispeten yüksek çekme mukavemetine ve iyi esnekliğe sahiptirler. Ancak bu tip vulkanizasyon sisteminin dezavantajı sadece doymamış kauçuklara uygulanabilmesi ve ortaya çıkan vulkanizatların genellikle ısıyla yaşlanmaya karşı düşük dirence ve yüksek sıkıştırma ayarına sahip olmasıdır [15-17]. Peroksit vulkanizasyonunun avantajları, kükürt vulkanizasyonundan farklı olarak hem doymuş hem de doymamış kauçuklarda kullanılabilmesidir. Vulkanizasyonun bu türü daha yüksek sıcaklıklarda geri dönüş olmaksızın hızlı bir işlemdir. Peroksit vulkanizatları, düşük sıkıştırma ayarı ve ısıyla yaşlanmaya karşı yüksek direncin yanı sıra daha iyi elektriksel özelliklerle karakterize edilmektedir [18-20]. Peroksit vulkanizasyonunun bir dezavantajı, elde edilen vulkanizatların düşük elastikliğe ve zayıf dinamik özelliklere sahip olmasıdır. Ayrıca çok daha önemli iki dezavantajı daha vardır. Bunlardan ilki; çapraz bağlanma işlemi sırasında yan reaksiyonların oluşma ihtimalinin yüksek olması ve elde edilen vulkanizatların daha gevşek bir çapraz bağ ağına sahip olmasıdır. İkincisi ise sürecin çok kısa sürede başlaması ve masif kauçuk ürünlerin üretimindeki uygulamasının sınırlanmasıdır [13-14], [21].

EPDM kauçuğu etilen ve propilen monomerlerinin yanında üçüncü bir monomerin reaksiyona girmesiyle elde edilmektedir. Bu sayede diğer polimerlerle karıştırılabilmekte, peroksit ve radyasyon haricinde kükürt ve kükürt verici sistemler ile de vulkanizasyon işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Çift bağa sahip olan

üçüncü monomer sülfür ile vulkanizasyona da imkan vermektedir [4, 22, 23]. SBR kauçukları ise diğer doymamış kauçuklar gibi çoğunlukla kükürt ile vulkanize edilmektedir. SBR kauçuğu, doğal kauçuğun vulkanizasyonundan daha fazla hızlandırıcı ve daha az kükürt kullanımı nedeniyle farklılık içermektedir. Daha sert kauçuk talep edildiğinde kükürt miktarı artırılmalıdır [22].

Bu çalışmada peroksit vulkanizasyonu ile kükürt vulkanizasyonun EPDM ve SBR kauçukların reolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Vulkanizasyon türüne bağlı olarak reolojik ve mekanik özellikler açısından en uygun malzeme türü belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, ticari olarak piyasada kullanılan bir EPDM ve SBR kauçuğu kullanılmıştır. Vulkanizasyon işlemi için ise ticari olarak piyasada kullanılan kükürt ve peroksit kullanılmıştır. EPDM ve SBR kauçukların üretiminde kullanılan katkıları ve oranları phr cinsinden Tablo 1’de verilmiştir.

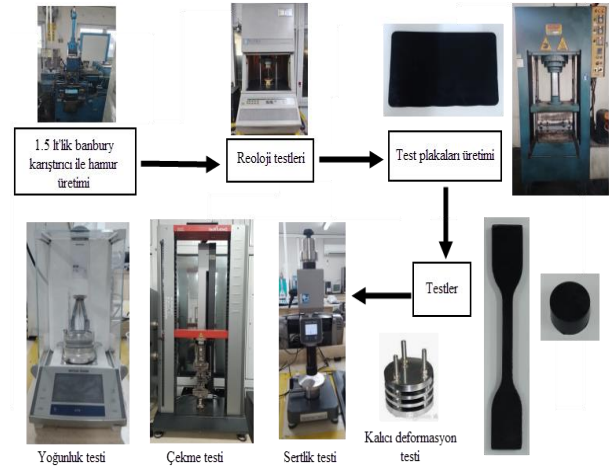
Tablo 1: EPDM ve SBR kauçukların formülasyonu.

| | EPDM/S | EPDM/P | SBR/S | SBR/P |
|---------------|--------|--------|-------|-------|
| EPDM | 100 | 100 | - | - |
| SBR | - | - | 100 | 100 |
| Karbon siyahı | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Beyaz dolgu | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Yağ | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Çinko oksit | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Stearik asit | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Sülfür | 1 | - | 1 | - |
| MBT | 0.5 | - | 0.5 | - |
| TMTD | 1 | - | 1 | - |
| Trigonox | - | 0.3 | - | 0.3 |
| Luperox | - | 4 | - | 4 |
| Acticgran | - | 0.6 | - | 0.6 |

2.2 Üretim Aşamaları/Yöntemleri

Kükürt ve peroksit ilaveli EPDM ve SBR kauçukları 1.5 lt’lik laboratuvar tipi mini banbury ile hamur haline getirilmiştir. Üretilen numunelerin reometre testleri, Seçil Kauçuk A.Ş. firmasında bulunan Alpha MDR 2000 marka reometre cihazında ASTM D 5289 standardına uygun olarak yapılmıştır. Test 200 °C ve 5 dakikada yapılmıştır. Hamur ürünlerden preste 180 °C ve 20 dakika boyunca

vulkanize edilerek test plakaları elde edilmiştir. Çekme testleri, ASTM D638 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Testler, Zwick marka Z020 model bir çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Her bir çekme test numunesi en az 5 ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Çekme testleri 200 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Kalıcı deformasyon testleri 100 °C’de 22 saat ve %25 oranında sıkıştırma ile DIN 53517 standardına göre yapılmıştır. Sertlik testleri DIN 53505 standardına uygun olarak yapılmış sertlikler Shore A cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde her bir test numunesi üzerinden en az 10 sertlik ölçümü yapılmıştır. Yoğunluk testleri ISO 1183 standardı kullanılarak Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Şekil 1’de deneysel çalışma aşamalarının şematik resmi verilmiştir.



Şekil 1: Deneysel çalışma aşamalarının şematik gösterimi.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Tablo 2’de kükürt ve peroksit ile vulkanize edilen EPDM ve SBR kauçuk malzemelerin reolojik ve fiziksel test sonuçları verilmiştir. Kauçuk hamurun üretim koşullarını ve minimum viskoziteye açıklayan minimum tork (ML) ve hamurun gerilim, yırtılma ve kopma mukavemeti gibi özelliklerin elde edildiği maksimum tork (MH) değerleri incelendiğinde vulkanizasyon türünün kauçukların ML ve MH değerlerini önemli oranda etkilediği belirlenmiştir. Scorch time, t_{s2} , yani hamurun ilk pişme süresi ve t_{90} hamurun maksimum pişmeye ulaştığı süre değerleri incelendiğinde vulkanizasyon türüne bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. EPDM/S kauçuğun shore A sertlik değeri 57 iken EPDM/P kauçuğun sertlik değeri

azalarak 49 elde edilmiştir. SBR kauçuğunda ise Shore A sertlik değeri vulkanizasyon türüne bağlı olarak artmış ve SBR/P kauçuğunda 77 Shore A değerine ulaşmıştır.

Tablo 2: Reolojik ve fiziksel test sonuçları.

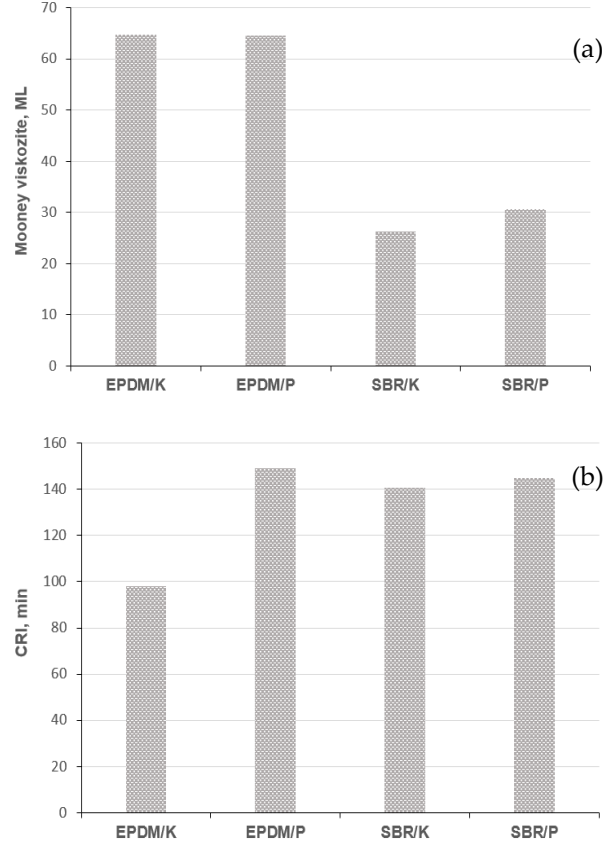
| | EPDM /S | EPDM /P | SBR/ S | SBR/ P |
|------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| ML (dNm) | 0.96 | 1.19 | 0.47 | 1.02 |
| MH (dNm) | 12.69 | 6.61 | 4.85 | 17.45 |
| ts ₂ (min) | 0.43 | 0.37 | 0.63 | 0.24 |
| ts ₉₀ (min) | 1.45 | 1.04 | 1.34 | 0.93 |
| Yoğunluk(g/cm ³) | 1.08 | 1.08 | 1.12 | 1.17 |
| Sertlik(Shore A) | 57 | 49 | 43 | 77 |

Şekil 2 (a) ve (b)'de EPDM ve SBR kauçuklarının kükürt ve peroksit ile vulkanize edilmesi sonrası elde edilen mooney viskozite ve kür indeksi veya kür oranı indeksi olarak adlandırılan CRI sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi EPDM kauçuğunun vulkanizasyon işleminde kükürt ve peroksit kullanılması mooney viskozite değerlerini etkilemez iken SBR kauçuğunun vulkanizasyon işleminde peroksit ile vulkanize olan SBR kauçuğunun mooney viskozitesi %16,7 oranında artmıştır. Bunun sebebinin çapraz bağ yoğunluğunun vulkanizasyon işlemine bağlı olarak değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Krmelova ve arkadaşları [24] yaptıkları çalışmada EPDM karışımlarında mooney viskozite değerlerinin 88-95 MU arasında olduğunu bunun sebebinin ise karışımların farklı rijitlik değerine sahip olmasına bağlamışlardır.

CRI sonuçları incelendiğinde ise EPDM ve SBR kauçuklarının peroksit ile vulkanize edilmesi ile CRI değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu artış EPDM/P kauçuğu için %52,2 oranında SBR/P kauçuğu için ise %2,8 oranında artmıştır. Bu sonuçlar Minnath ve arkadaşlarının [25] yaptığı araştırmayla tutarlıdır, CRI değerinin artması vulkanizasyon reaksiyon süresinin azalmasıyla orantılıdır.

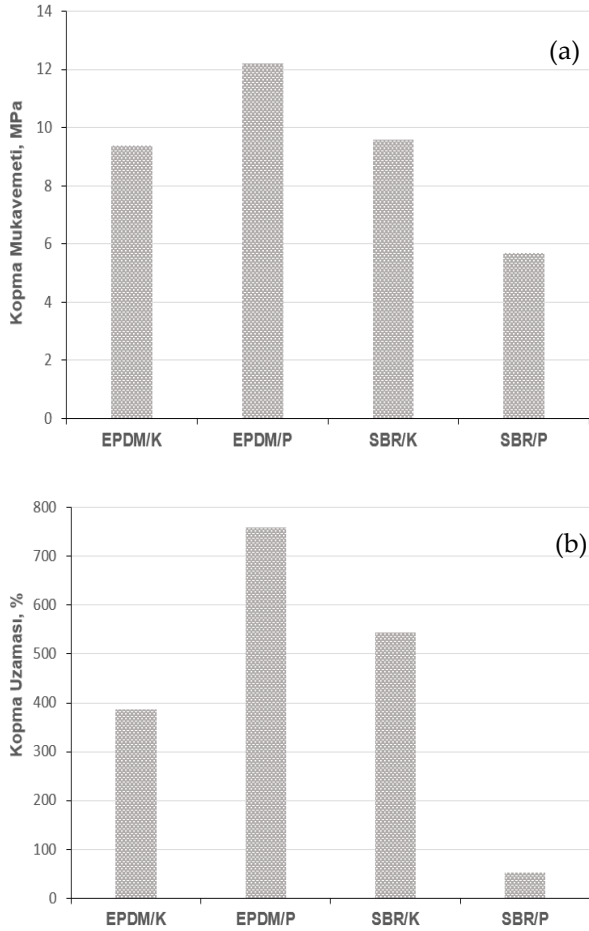
Şekil 3 (a) ve (b)'de EPDM/S, EPDM/P, SBR/S ve SBR/P kauçuklarına ait kopma mukavemeti ve kopma uzaması değişimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi EPDM kauçuğun vulkanizasyon türüne bağlı olarak kopma mukavemeti artarken SBR kauçuğun kopma mukavemeti azalmıştır. EPDM kauçuğun kükürt ile vulkanizasyonu ile 9,4 MPa olarak elde edilen kopma mukavemeti %29,7 oranında artarak 12,2 MPa elde edilmiştir. SBR

kauçuğunda ise kopma mukavemeti kükürt ile vulkanize edildiğinde 9,6 MPa iken peroksit ile vulkanize edildiğinde %40,6 oranında azalarak 5,7 MPa elde edilmiştir. Kauçuk malzemelerin uzaması çekme dayanımları ile orantılıdır. Artan çapraz bağ miktarı malzeme uzamasını daha zor hale getirdiği için çapraz bağ yoğunluğunun artması ile uzama azalacaktır [26].



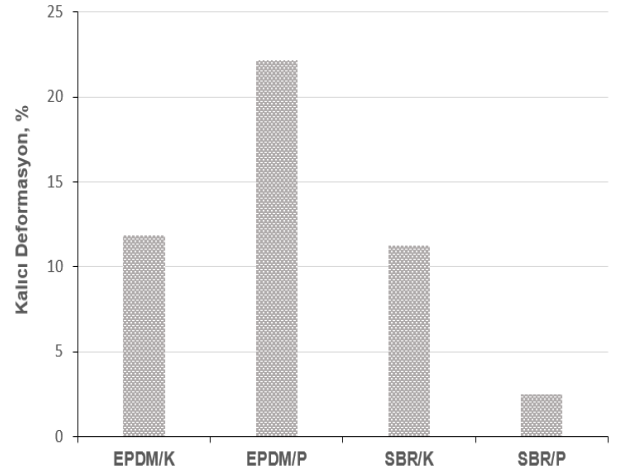
Şekil 2: (a) Mooney viskozite ve (b) CRI sonuçları.

Şekil 3 (b)'de EPDM/S, EPDM/P, SBR/S ve SBR/P kauçuklarına ait kopma uzaması değişimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi EPDM kauçuğun vulkanizasyon türüne bağlı olarak kopma uzaması artarken SBR kauçuğun kopma uzaması önemli oranda azalmıştır. EPDM kauçuğun kükürt vulkanizasyonu ile %386 olarak elde edilen kopma uzaması %96,6 oranında artarak %759 elde edilmiştir. SBR kauçuğunda ise kopma uzaması kükürt ile vulkanize edildiğinde %544 iken peroksit ile vulkanize edildiğinde %926,4 oranında azalarak 53% elde edilmiştir. Mayasari ve Yuniari [27] vulkanizasyon sistemi ve kauçuk türüne bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimin çapraz bağ oluşumuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 3: (a) Kopma mukavemeti ve (b) kopma uzaması sonuçları.

Şekil 4'te ise kauçuk parçaların sızdırmazlık özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir parametre olan kalıcı deformasyon testleri sonuçları verilmiştir. EPDM kauçuğunun peroksit kullanılarak vulkanize edilmesi ile kalıcı deformasyon oranı %86,9 oranında artarken SBR kauçuğunun poeroksit kullanılarak vulkanize edilmesi ile kalıcı deformasyon oranı %78,1 oranında azalmıştır.



Şekil 4: Kalıcı deformasyon sonuçları.

4. SONUÇLAR

EPDM ve SBR kauçuklarının kükürt ve peroksit vulkanizasyonu ile reolojik ve mekanik özelliklerin incelendiği çalışma sonucunda;

- EPDM/P ve EPDM/K kauçukların mooney viskozite değerlerinin değişmediği SBR/P kauçuğunun ise %16,7 oranında arttığı belirlenmiştir.
- EPDM kauçuğun vulkanizasyon türüne bağlı olarak kopma mukavemeti ve kopma uzaması artarken SBR kauçuğun azalmıştır.
- EPDM/P kauçuğunun kalıcı deformasyon oranı %86,9 oranında artarken SBR/P kauçuğunun kalıcı deformasyon oranı %78,1 oranında azalmıştır.
- Kauçuk parçaların sızdırmazlık özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir parametre olan kalıcı deformasyon testleri sonucunda EPDM kauçuğunun peroksit kullanılarak vulkanize edilmesi ile kalıcı deformasyon oranı %86,9 oranında artarken SBR kauçuğunun poeroksit kullanılarak vulkanize edilmesi ile kalıcı deformasyon oranı %78,1 oranında azalmıştır.

Çalışma sonucunda peroksit ile vulkanize edilen EPDM kauçuğunun reolojik ve mekanik özellikler açısından kullanımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Yazar Katkısı: Yazarlar çalışmaya eşit şekilde katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması: Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını onaylarız.

5. KAYNAKLAR

- [1] P. Rybinski, B. Syrek, A. Marzec, B. Szadkowski, M. Kusmierk, M. Sliwka-Kaszynska, U. Z. Mirkhodjaev, "Effects of basalt and carbon fillers on fire hazard, thermal, and mechanical properties of EPDM rubber composites," *Mater.*, vol. 14, no.18, 5245, Sept. 2021.
- [2] C. Zhang, J. Wu, F.Teng, B. Su, Y. Wang, H. Ao, "Theoretical and experimental characterization for macro-micro friction behaviors of EPDM rubber," *Polym. Test.*, vol. 99, 107213, July 2021.
- [3] A. A. Abdelsalam, W. S. Mohamed, G. Abd El-Naeem, S. H. El-Sabbagh, "Effect of the silane coupling agent on the physicomechanical properties of EPDM/SBR/AL2O3 rubber blend nanocomposites," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 36, no. 5, pp. 1811–1832, Feb. 2022.
- [4] J. Kruželák, M. Mikolajová, A. Kvasničáková, M. Džuganová, I. Chodák, J. Hronkovič, J. Prefo, I. Hudec, "Combined sulfur and peroxide vulcanization of filled and unfilled EPDM based rubber compounds," *Mater.*, vol. 16, no. 16, p. 5596, Aug. 2023.
- [5] N. P. R. Guntur, S. G. Yadav, S. Gopalan, "Effect of titanium carbide as a filler on the mechanical properties of styrene butadiene rubber," *Mater. Today: Proc.*, vol. 24, no. 2, pp. 1552–1560, 2020.
- [6] J. Zhang, W. Wang, Y. Wang, C. Qiu, C. Mao, S. Deng, W. Jian-Guo, "Effect of cross-linked structures on mechanical properties of styrene-butadiene rubber via molecular dynamics simulation," *Macromol. Theory Simul.*, vol. 31, no. 2, p. 2100054, Mar. 2022.
- [7] Y. Zou, J. He, Z. Tang, L. Zhu, F. Liu, "Structural and mechanical properties of styrene-butadiene rubber/silica composites with an interface modified in-situ using a novel hindered phenol antioxidant and its samarium complex", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 188, 107984, Mar. 2020.
- [8] J. K. Ahmed, M.H. Al-Maamori, H. M. Ali, "Effect of nano silica on the mechanical properties of Styrene-butadiene rubber (SBR) composite," *Int. J. Mater. Sci. Appl.*, vol. 4 no. 2-1, pp. 15-20, 2015.
- [9] K. C. Baranwal, H. L. Stephens, "Basic Elastomer Technology," Akron, OH, USA, Rubber Division, American Chemical Society, 2001.
- [10] E. M. Dannenberg, "The effects of surface chemical interactions on the properties of filler-reinforced rubbers," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 48, no. 3, pp. 410-444, July 1975.
- [11] J. Kruželák, R. Sýkora, I. Hudec, "Sulphur and peroxide vulcanisation of rubber compounds-overview," *Chem. Pap.*, vol. 70, no. 12, pp. 1533-1555, Sept. 2016.
- [12] J. Kruzalak, R. Sykora, I. Hudec, "Influence of mixed sulfur/peroxide curing system and thermooxidative ageing on the properties of rubber magnetic composites," *J. Polym. Res.*, vol. 22, no. 1, p. 636, 2015.
- [13] J. Kruzalak, A. Kvasnicakova, I. Hudec, "Peroxide curing systems applied for cross-linking of rubber compounds based on SBR", *Adv Ind Eng Polym Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 120-128, July 2020.
- [14] J. Kruzalak, A. Kvasnicakov, R. Dosoudil, I. Hudec, J. Vilcakova, "Combined sulfur and peroxide curing systems applied in cross-linking of rubber magnets," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 29, no. 8, pp. 1155–1166, Oct. 2021.
- [15] W. Naebpetch, B. Junhasavasdikul, A. Saetung, T. Tulyapitak, N. Nithi-Uthai, "Influence of accelerator/sulphur and co-agent/peroxide ratios in mixed vulcanisation systems on cure characteristics, mechanical properties and heat aging resistance of vulcanised SBR," *Plast. Rubber Compos.*, vol. 45, no. 10, pp. 436-444, Nov. 2016.
- [16] H. Shahrapour, A. Motavalizadehkakhky, "The effects of sulfur curing systems (insoluble-rhombic) on physical and thermal properties of the matrix polymeric of styrene butadiene rubber," *Pet. Chem.*, vol. 57, no. 8, pp. 700-704, July 2017.
- [17] Y. Gao, Y. Xue, Z.G. Lu, Z. Wang, Q. Chen, N. Shi, F. Sun, "Self-accelerating decomposition temperature and quantitative structure-property relationship of organic peroxides", *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 94, pp. 322-328, March 2015.

- [18] Q. Lian, Y. Li, K. Li, J. Cheng, J. Zhang, "Insights into the vulcanization mechanism through a simple and facile approach to the sulfur cleavage behavior," *Macromolecules*, vol. 50, no. 3, pp. 803–810, Feb. 2017.
- [19] J. Kruželák, H. K. Kvasničáková, I. Hudec, "Influence of dicumyl peroxide and Type I and II coagents on cross-linking and physical-mechanical properties of rubber compounds based on NBR," *Plast. Rubber Compos.*, vol. 49, no. 7, pp. 307-320, Mar. 2020.
- [20] N. Thanh Liem, N. Huy Tung, N. P. Duy Linh, B.T. Phuc, N. T. Thuy, B. Chuong "Preparation and investigation of the mechanical and thermal properties of styrene butadiene rubber using dicumyl peroxide as curing agent," *JS: NST*, vol. 36, no. 2, pp. 91-97, June 2020.
- [21] B. George, R. Alex, "Stable free radical assisted scorch control in peroxide vulcanization of EPDM," *Rubber Science*, vol. 17, no. 1, pp. 135-145, 2014.
- [22] N. Torbati-Fard, M. H. R. Ghoreishy, G. Naderi, S. M. Hosseini, "Enhancement of mechanical properties of styrene-butadiene rubber composites by carbon black/silicone carbide hybrid filler networking," *Polym. Compos.*, vol. 43, no. 7, pp. 4255–4267, July 2022.
- [23] K. Deredas, N. Kepczak, M. Urbaniak, "Influence of doping with styrene-butadiene rubber on dynamic and mechanical properties of polymer concrete," *Compos. Struct.*, vol. 268, no. 5, p. 113998, July 2021.
- [24] V. Krmelova, L. Fusikova, J. Krmela, "Evaluation of effect of white fillers on selected properties of EPDM blend," *Procedia Eng.*, vol. 136, pp. 336-340, 2016.
- [25] A. M. Minnath, G. Unnikrishnan, E. Purushothaman, "Transport studies of thermoplastic polyurethane/natural rubber (TPU/NR) blends," *J. Membr. Sci.*, vol. 379, no. 1-2, pp. 361-369, Sept. 2011.
- [26] K. A. J. Dijkhuis, J. W. M. Noordermeer, W. K. Dierkes, "The relationship between crosslink system, network structure and material properties of carbon black reinforced EPDM", *Eur. Polym. J.*, vol. 45, no. 11, pp. 3302-3312, Nov. 2009.
- [27] H. E. Mayasari, A. Yuniari, "Effect of vulcanization system and carbon black on mechanical and swelling properties of EPDM blends," *MKKP*, vol. 32, no. 1, pp. 59-64, 2016.