
Araştırma Makalesi / Research Article

Kompozit Fren Balatasında Bakır Oranının Frenleme Karakteristiğine Etkisi

İlker SUGÖZÜ*

*Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin
(ORCID: 0000-0001-8340-8121)*

Öz

Taşıtların durması veya yavaşlatılması için fren sistemi kullanılmaktadır. Fren sisteminde yer alan balatalar diske sürtünerek aracın durmasını veya yavaşlamasını sağlamaktadır. Balatalar birden fazla malzemenin karışımından oluşmaktadır. Bakır, fren balatalarında metalik sürtünme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Fren balatalarında kullanılan bakır termal iletkenliğinin yanında iyi bir fren performansı da sağlamaktadır. Bu çalışmada, fren balatalarında kullanılan bakırın frenleme performansına etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan balata karışımı içerisinde %5, %10 ve %15 oranlarında bakır ilave edilerek üç farklı balata üretilmiştir. Balata numunelerinin sürtünme katsayısı, aşınma, yoğunluk, sertlik gibi fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile morfolojik özellikleri incelenmiştir. Bakır oranı arttıkça balata performansının iyileştiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Balata, sürtünme, aşınma.

The Effect of Copper Ratio on Braking Characteristics of Composite Brake Pads

Abstract

The brake system is used to stop or slow down the vehicles. The brake linings in the brake system rub against the disc and allow the vehicle to stop or slow down. The brake linings consist of mixture of more than one material. Copper is used as metallic friction material in brake pads. The copper used in the brake linings provides good braking performance as well as thermal conductivity. In this study, the effect to braking performance of copper is used in the brake pad was investigated. Three different brake lining were produced by adding 5%, 10% and 15% copper to the prepared brake lining mix. The physical and mechanical properties such as friction coefficient, wear, density and hardness of brake lining samples were determined. Morphological properties were examined by Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) and Scanning Electron Microscopy (SEM). It has been observed that the performance of brake lining has improved as the copper ratio increases.

Keywords: Brake lining, friction, wear.

1. Giriş

Taşıtlarda kullanılan fren sistemi, hareket enerjisini sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürerek taşıtın yavaşlamasını veya durmasını sağlamaktadır. Balata, disk ve kaliper fren sisteminin önemli parçaları arasındadır.

Fren sisteminde kullanılan disk ve balata frenleme performansında önemli rol oynamaktadır. Fren diskinin balata ile verimli bir şekilde çalışabilmesi için mekanik ve ısıl zorlamalara karşı dayanıklı olması gerekir. Sürtünmeye bağlı olarak sıcaklık artışı nedeni ile fren diskinin deformasyona uğramaması için ısıl genleşme katsayısının düşük olması istenir. Ayrıca frenleme esnasında fren diskinde ortaya çıkacak ısının çabuk atılabilmesi için diskin ısı iletim katsayısının yüksek olması

*Sorumlu yazar: ilkersugozu@mersin.edu.tr

Geliş Tarihi: 30.03.2019, Kabul Tarihi: 11.10.2019

gerekmektedir. Fren balatasının verimli bir şekilde çalışabilmesi için zorlanma ve yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısının yüksek ve stabil olması, aşınma miktarının minimum olması istenir. Ayrıca fren diskini çizip hasara uğratmaması gerekir.

Balatalar, birden fazla malzemenin bir araya getirilerek üretilmesinden oluşmaktadır. Balata malzemesi olarak; balata bileşenlerini bir arada tutmak için bağlayıcılar, balataya dayanım kazandırmak için takviye malzemeleri, istenilen sürtünme performansını bozmadan balatayı geliştirmek, maliyeti düşürmek ve hacim doldurmak amacıyla dolgu maddeleri ve sürtünme katsayısını artırmak için sürtünme ayarlayıcılar kullanılır.

Balataya dayanım kazandırmak için kullanılan asbestin yasaklanmasından sonra asbeste alternatif malzeme arayışları başlamıştır [1-5]. Literatürde yapılmış çalışmalar incelendiğinde son zamanlarda taşıt fren balatası kompozisyonunda değişimler yaşanmış, bunun etkisi doğrultusunda balataların sürtünme katsayısı, aşınma direnci ve ısıya dayanımı iyileşmiştir [6-9].

Balata ile disk arasında sürtünmeden dolayı oluşan ısının iletilmesi için bakır, pirinç, demir, alüminyum gibi metalik bileşenler kullanılmaktadır. Metalik bileşenler arasında bakır, en yüksek termal iletkenliği (TC) ve çevresel etkilerden dolayı avantajları vardır [9]. Ju ve arkadaşları çelik, pirinç, seramik ve bakır gibi metalik bileşenleri kullanarak balata üretmiş ve balatanın mekanik ve tribolojik özelliklerini etkilerini incelemişlerdir. Balatada yüksek oranlarda çelik, pirinç, seramik ve bakır kullanılması aşınma direncini arttırmıştır [10]. Handa ve Kato çalışmalarında, bakır ve barit oranının balatanın sürtünme ve aşınma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bakır tozu eklenmesinin balatanın kayma direncini arttırdığını ve aşınma miktarının azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir [11].

Bu çalışmada, fren balatalarında kullanılan bakırın frenleme performansına etkisini araştırmak için balata karışımı içerisine %5 (B5), %10 (B10) ve %15 (B15) oranlarında bakır ilave edilerek üç farklı balata üretilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Taşıt fren balatalarında kullanılan bakırın frenleme performansına etkisini araştırmak için %5, %10 ve %15 oranlarında bakır içerikli balata üretilmiştir. Balataların sürtünme katsayısı, aşınma, yoğunluk, sertlik testleri yapılarak sem görüntüleri alınmıştır.

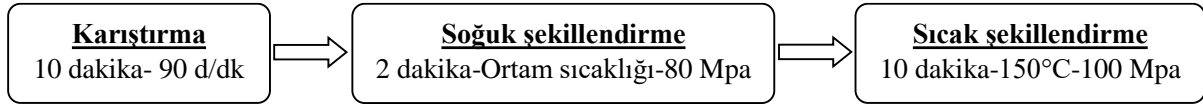
Balata performans testleri TSE 555 standartlarında belirtilen kriterler dikkate alınarak yapılmıştır [12]. Balata kompozisyonu içerisinde balata bileşenlerini bir arada tutmak için bağlayıcı olarak reçine, balataya dayanım kazandırmak için takviye malzemeleri olarak çelik yünü, istenilen sürtünme performansını sağlamak, hacim doldurmak ve maliyeti azaltmak amacıyla dolgu maddesi olarak barit, sürtünme katsayısını artırmak için sürtünme ayarlayıcı olarak pirinç talaşı, alümina, maun cevizi tozu, yağlayıcı olarak grafit kullanılmıştır. Tablo 1 balata içeriğinde yer alan malzeme ve oranlarını göstermektedir. Balata içeriğini oluşturan malzeme oranları kütleli olarak alınmıştır.

Tablo 1. Balata içeriği (% Kütleli)

İçerik	B5	B10	B15
Reçine	20	20	20
Çelik yünü	8	8	8
Maun cevizi tozu	10	10	10
Pirinç talaşı	5	5	5
Grafit	5	5	5
Alümina	8	8	8
Barit	39	34	29
Bakır	5	10	15

Üretim işleminden önce Tablo 1'de miktarları verilen toz malzemeler 0.001 g hassasiyetindeki terazi kullanılarak belirlenmiştir. Tartılan malzemeler toz karıştırma cihazının haznesine aktarılmıştır. Karışımın homojenliğini sağlamak için numune içeriği, özel olarak imal üretilmiş toz karıştırma cihazında 90 d/dk karıştırma hızında 10 dk süre ile karıştırılmıştır. Soğuk şekillendirme işlemi 25,4×25,4mm ebatlarında bir kalıpta yapılmıştır. Soğuk şekillendirme işlemi 80 MPa basınçta ve 2 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Balataların dayanımını artırmak için sıcak şekillendirme işlemi

yapılmıştır. Sıcak şekillendirme 100 MPa basınçta, 150°C sıcaklıkta ve 10 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Şekil 1 balata üretim akış şemasını göstermektedir.



Şekil 1. Balata üretim akış şeması

Şekil 2 balataların sürtünme katsayısı ve aşınma testlerinin yapıldığı test cihazını göstermektedir. Test cihazı elektronik bir sistem olup sürtünme katsayısı, hidrolik sistem basıncı, fren kuvveti ve disk yüzey sıcaklığı parametrelerini deney esnasında kaydetmektedir. Test cihazı ile ilgili detaylı bilgi yazarın diğer çalışmalarında detaylı olarak verilmiştir [2].



Şekil 2. Balata test cihazı

Deney işlemlerinde 280 mm çapında gri dökme demirden üretilmiş ve 116 HB (41.86 HRA) sertlikte fren diski kullanılmıştır. Balataların performans deneyleri; 1,05 MPa basınç, 6 m/s hız, 10 dakika süre ve 3,6 km yol yaptırılarak belirlenmiştir. Balataların aşınma testleri, deney öncesi ve deney sonrası ağırlıkları ölçülerek TSE 555 standardında belirtilen özgül aşınma denklemine (1) göre yapılmıştır [12].

$$V = \frac{m_1 - m_2}{2 \cdot \pi \cdot R_d \cdot n \cdot f_m \cdot \rho} \quad (1)$$

Denklem (1)'de; V özgül aşınma miktarını, R_d balatanın merkezi ile diskin merkezi arasındaki mesafeyi, n test boyunca diskin toplam dönme sayısını, m_1 balatanın test öncesi kütlesini, m_2 balatanın test sonrası kütlesini, f_m ortalama sürtünme kuvvetini, ρ balatanın yoğunluğunu göstermektedir.

Balataların yoğunlukları Arşimet prensibine (2) göre belirlenmiştir.

$$\rho = \frac{G_k}{G_k - G_s} \rho_{su} \quad (2)$$

Denklem (2)'de; ρ balatanın yoğunluğunu, G_k numunenin havadaki ağırlığını, G_s numunenin sudaki ağırlığını, ρ_{su} suyun yoğunluğunu göstermektedir.

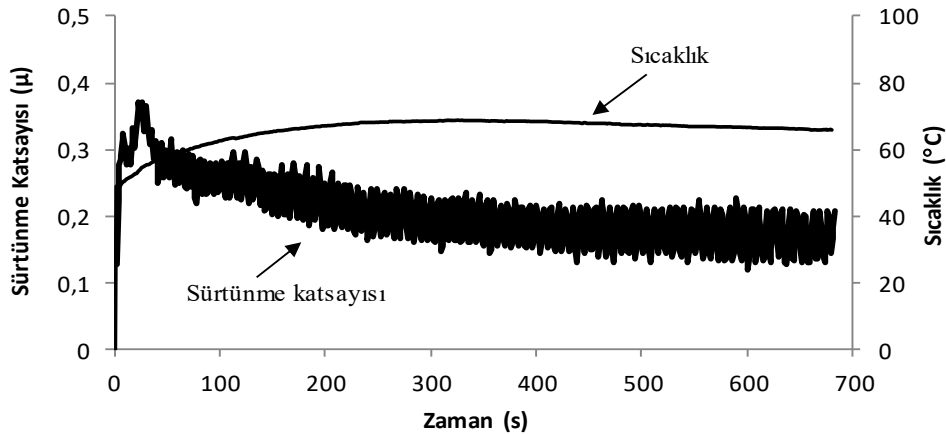
Sertlik ölçümleri Brinell sertlik ölçüm cihazı kullanılarak 2,5 mm bilye çapı, 62.5 kgf yük uygulanarak yapılmıştır. Balataların aşınan yüzeylerinden ve beş farklı noktadan sertlik ölçümleri yapılarak ortalaması alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

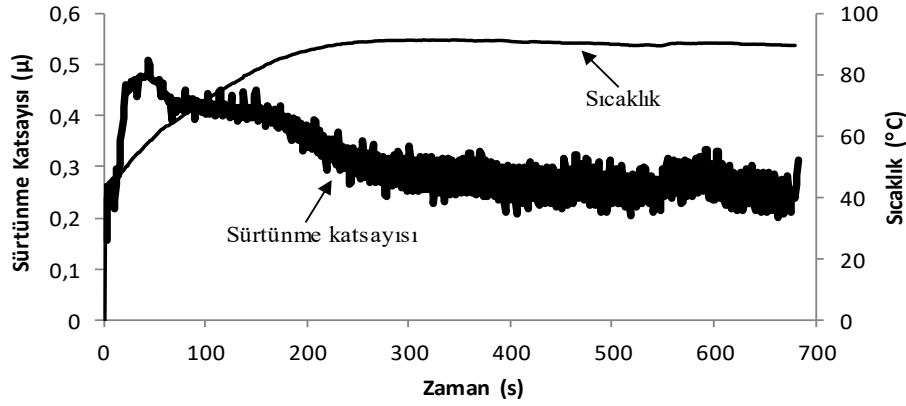
Fren balatalarında bakır etkisini araştırmak için %5 içerikli B5 kodlu, %10 içerikli B10 kodlu ve %15 içerikli B15 kodlu balatalar üretilmiştir. Balataların tribolojik performansları, TSE 555 standartlarına uygun olarak özel imal edilmiş sürtünme test cihazında yer alan 280 mm çapında dökme demir diske karşı 25,4 mm çapında üretilen balataların aşındırılmasıyla değerlendirilmiştir. Her balatadan üç tane üretilmiş ve üç deney sonucunun ortalaması alınmıştır. Testler literatüre uygun olarak yapılmıştır [12].

Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5 balataların zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı sıcaklık grafiklerini göstermektedir. Fren balatalarında, frenleme sırasında sürtünme nedeniyle ısı üretilir. Bu ısı, arayüz sıcaklığını artırır ve bu durum, sürtünme katsayısını azaltır. Bu nedenle, etkili bir frenleme için sürtünme katsayısındaki azalma minimum olmalıdır [13, 14]. Şekiller incelendiğinde bakır oranı arttıkça sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. Ayrıca bakır oranının artması sürtünme katsayısının daha stabil bir durum almasına neden olmuştur. Şekil 5 incelendiğinde %15 oranında bakır ilaveli balata deneylerinin sürtünme katsayısının en yüksek olduğu ve %5 ile %10 bakır içerikli balata örneklerine göre daha stabil olduğu görülmektedir. Fren balatasının sürtünme katsayısının fren süresi boyunca stabil kalması istenilen bir durumdur [8]. Şekiller incelendiğinde sürtünme katsayısının dalgalanmalı bir şekilde ilerlemesinin nedeni olarak dökme demirden imal edilen diskin yapısının homojen olmamasından kaynaklandığı literatürde belirtilmiştir [15]. Ayrıca Anderson [16] bu dalgalanmaları balata temas yüzeyindeki homojen olmayan ısı yükünden kaynaklandığını belirtmiştir. Bunun nedeni, test süresi boyunca temas yüzeylerinden diskin merkezine doğru ısının değişmesidir. Bu nedenle, sürtünme katsayısı bu etki nedeniyle sürekli değişmektedir. Stachowiak ve Batchelor [17], bu durumu sürtünme yüzeylerindeki yapışma olarak açıklamıştır. Yapışma yüzeyi bir süre sonra nispi hareket nedeniyle kayar ve bu durum sürtünme katsayısında değişikliklere neden olur.

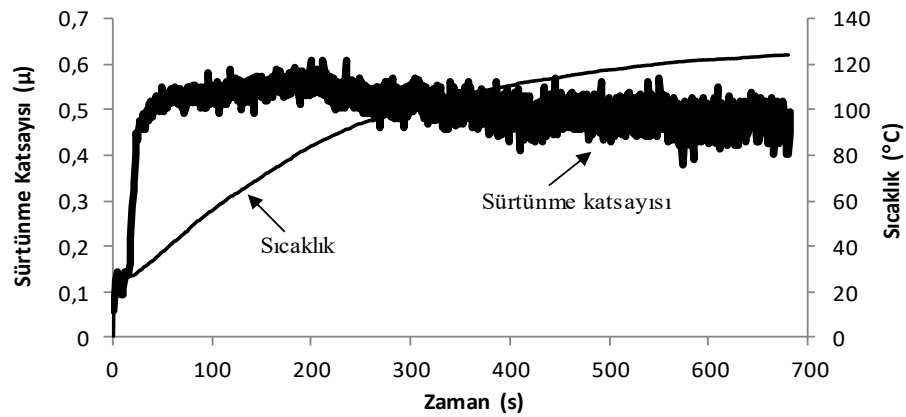
Şekiller incelendiğinde balata testlerinin 300. saniyesinden sonra daha stabil bir durum aldığı görülmektedir. Sürtünme stabilitesinin, ticari fren balatası için önemli bir özellik olduğu bilinmektedir [18]. İyi sürtünme stabilitesini sağlamak için, fren balatasının bileşenleri dikkatli seçilmelidir. Sürtünme katsayısı, fren balatası için 0,3–0,45 arası endüstriyel standart aralığına girmektedir [19]. Literatürde sürtünme katsayısının (μ) sürtünme kuvveti ve disk kaplama arayüzü sıcaklığına bağlı olarak genellikle 0,1 ile 0,7 arasında değiştiği belirtilmektedir [20]. Şekillerde görülen yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısındaki azalma, balatada bağlayıcı olarak kullanılan fenolik reçinenin termal ayrışmasından kaynaklanır, bu durum matris ve bileşenler arasındaki yapışma etkisini zayıflatır [21].



Şekil 3. B5 kodlu balata numunesinin zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı-sıcaklık değişimi



Şekil 4. B10 kodlu balata numunesinin zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı-sıcaklık değişimi



Şekil 5. B15 kodlu balata numunesinin zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı-sıcaklık değişimi

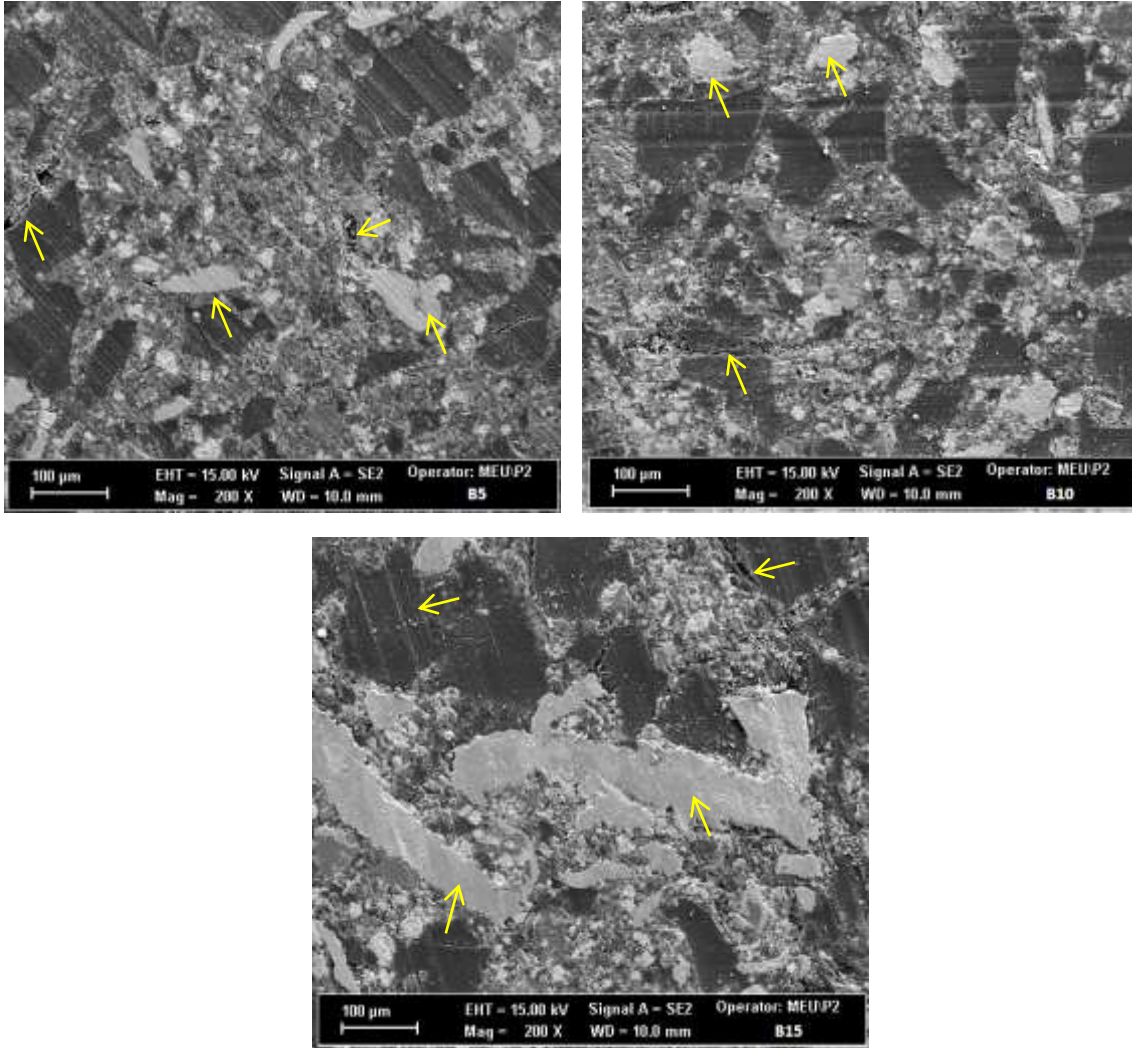
Fren balatalarında sıfır aşınma beklenemez. Balata içeriğinde aşınmayı önlemek için çok yüksek dayanıklı malzemeler kullanılsa bile bu karşı yüzeyin aşınmasına neden olacaktır. Bu nedenle, aşındırıcıların seçimi, aşınma direncini arttırmak için bir balata formülasyonundaki en önemli hususlardan biridir. Sürtünme malzemelerinin aşınma mekanizmaları son derece karmaşıktır, çünkü disk ve balata yüzeyinden frenleme sırasında çeşitli etkileşimler ve mekanizmalar aynı anda çalışır. Bu dinamik süreçler, yük, hız ve özellikle arayüz sıcaklığı gibi çalışma parametrelerine bağlı olmak üzere temas eden yüzeylerin bileşimine bağlıdır. Tablo 2, %5 (B5), %10 (B10) ve %15 (B15) bakır içeren balata numunelerine ait özgül aşınma, ortalama sürtünme katsayısı, yoğunluk, sertlik ve sürtünme kararlılığını göstermektedir. Aşınma miktarı sürtünme katsayısı ile orantılı bir şekilde artmıştır. Balata içeriğinde kullanılan bakır oranı yoğunluk ve sertlik değerlerini artırmıştır. Elde edilen yoğunluk seviyeleri, fren balatası uygulaması için önerilen değerler arasındadır [22]. Bakır oranı arttıkça sürtünme kararlılığında iyileşmeler görülmüştür. Sürtünme kararlılığının yüksek olması balatanın sürtünme katsayısının yüksek olduğunun göstergesidir.

Tablo 2. Balataların test sonuçları

Numune kodu	Özgül aşınma oranı (cm ³ /Nm)	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HB)	Sürtünme kararlılığı (%)
B5	0.413 x 10 ⁻⁶	0.272	1.894	17	0,59
B10	0.493 x 10 ⁻⁶	0.314	2.071	20	0,66
B15	0.589 x 10 ⁻⁶	0.496	2.164	23	0,80

Fren sürtünme malzemeleri aşındırıcı, yapıştırıcı, yorulma ve sürünme gibi birçok karmaşık aşınma mekanizmasına maruz kalır. Sürtünme malzemelerinin aşınması sırasında aşınma mekanizmaları son derece karmaşıktır, çünkü birçok etkileşim ve mekanizma her iki yüzeyde de sürtünme işlemi sırasında eşzamanlı olarak çalışır. Literatürde aşınma korelasyonları çoğunlukla

mekanik veya fiziksel özelliklerden ziyade SEM ve EDS ile çalışılan yüzey topografyası ile belirlenmektedir [6,11]. Balataların aşınmış yüzeylerinin SEM mikro yapıları Şekil 6'da gösterilmektedir.

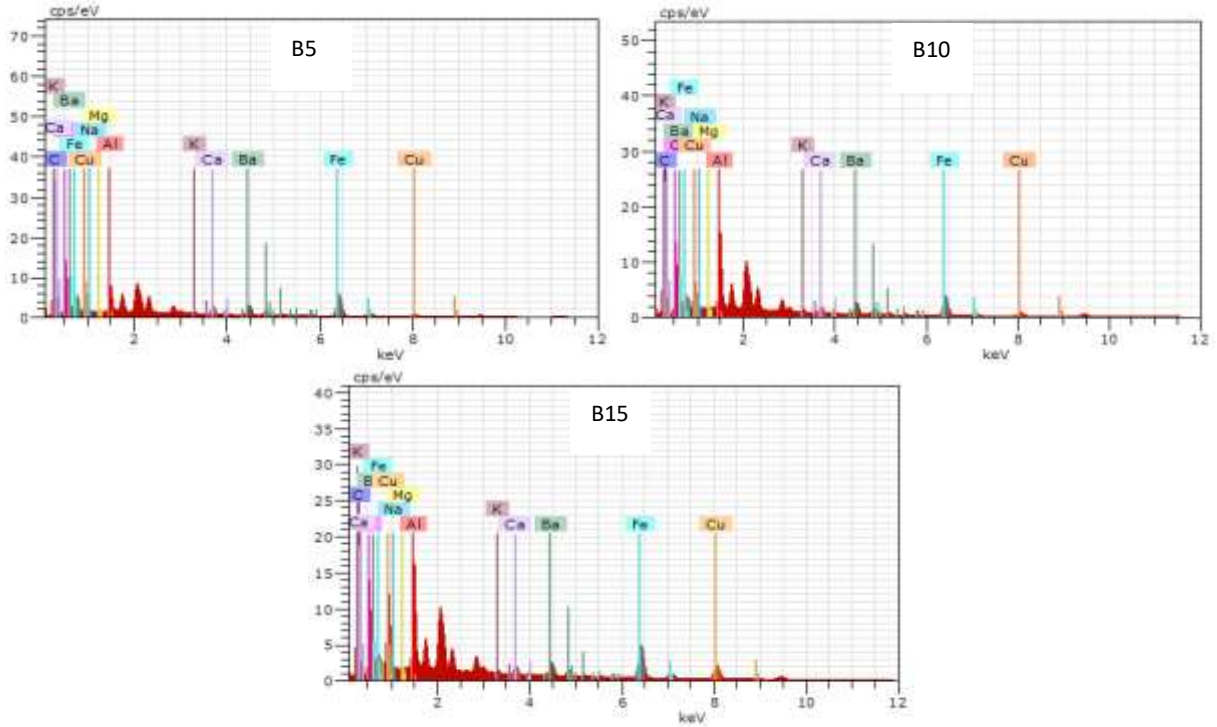


Şekil 6. Balataların aşınan yüzeylerine ait SEM resimleri

Sürtünme yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde mikro çatlaklar, mikro ve makro boşluklar, adhezif aşınmayı gösteren üzeri kaplanmış sürtünme tabakaları ile abrasif aşınmayı gösteren çizikli sürtünme izleri olduğu görülmektedir. Sürtünme yüzeyinde oluşan aşınma kalıntılarının sıkışması sürtünme filmi oluşumunun nedenidir [21]. Balata yüzeyinde kayma yönünde bulunan çizgiler sürtünme filminin varlığını göstermektedir. Ayrıca sürtünme yüzeylerinde balata içeriğini oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldıkları anlaşılmaktadır. Disk yüzeyinde tutunma sağlayacak sert ve büyük parçacıkların sürtünme tabakasında fazla bulunmaması sonucu %5 bakır içerikli balata numunesinin (B5) düşük sürtünme katsayısı sergilediği, %15 bakır içerikli balatanın SEM görüntülerinde aşınma tabakalarının miktarının fazla olması sürtünme tabakası oluşumunu etkilediği ve sürtünme katsayısının %49 gibi yüksek değerlere çıkmasını neden olduğu sonucuna varılmıştır. Bakır miktarının artmasına bağlı olarak sürtünme tabakası oluşumunu sağlayan adhezif aşınma artmıştır.

Şekil 7 incelendiğinde balata içeriğindeki bakır oranının artışına bağlı olarak EDS grafiklerinde bakır miktarının artışına paralel bir şekilde artış olduğu görülmektedir. EDS analizinde numune içindeki elementlerin yüzdeleri, elementlerin piklerinin altındaki alanlarla orantılıdır. Balata numunelerinde karbon, potasyum, kalsiyum, sodyum, baryum, magnezyum ve demir elementleri görülmüştür. EDS analizlerinde, kullanılan malzemelerin hepsinin numunenin yüzeyinde görülmesi homojen bir karışımın elde edildiğini göstermektedir. Balatayı oluşturan malzemelerde novalak tip (bakalit B) fenolik reçene,

formaldehit (CH_2O) ve fenolün ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) asidik ortam veya katalizör etkisiyle reaksiyona girmesiyle oluşur. Çelik yünü, demir-karbon alaşımı, pirinç ise bakır-çinko alaşımıdır. Pirinç içinde bulunabilen diğer bazı elementler kalay, kurşun, nikel, mangan, demir, alüminyum, arsenik, antimon ve fosfordur. Balata kompozisyonu içinde bulunan maun cevizi (cashew) tozunun ise kimyasal bileşimi tam olarak bilinmemektedir. Balata içeriğinde bulunmayan fakat EDS görüntülerinde çıkan kalsiyum ve magnezyum elementleri maun cevizi içeriğinden gelmektedir [11].



Şekil 7. Balataların aşınan yüzeylerine ait EDS analizleri

4. Sonuç ve Öneriler

Farklı oranlarda bakır içeren kompozit fren balatası geliştirilmiş ve endüstriyel standartlara göre mekanik ve tribolojik performansları değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Bakır miktarının artması, sürtünme katsayısının büyüklüğünde kayda değer bir artışa yol açmıştır. Numunelerin aşınma direnci bakır miktarının artmasıyla azalmıştır. Artan bakır miktarına bağlı olarak balataların yoğunluk ve sertliği artmıştır. Bakır miktarının artmasına bağlı olarak sürtünme tabakası oluşumu artmış ve sürtünme katsayısı daha stabil bir durum sergilemiştir. Geliştirilen %10 ve %15 bakır içerikli balatalar endüstriyel uygulamaya göre istenen sürtünme katsayısı aralığında (0.30-0.50) çıkmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince 2016-2-AP4-1945 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Yawas D.S., Aku S.Y., Amaren S.G. 2016. Morphology and Properties of Periwinkle Shell Asbestos-Free Brake Pad. Journal of King Saud University Engineering Sciences, 28 (1): 103-109.

- [2] Sugozi I., Mutlu I., Sugozi B. 2018. The Effect of Ulexite to The Tribological Properties of Brake Lining Materials. *Polymer Composites*, 39 (1): 55-62.
- [3] Mahale V., Bijwe J., Sinha S. 2017. Influence of Nano-Potassium Titanate Particles on The Performance of Nao Brake-Pads. *Wear*, 376–377: 727-737.
- [4] Li Z., He M., Dong H., Shu Z., Wang X. 2018. Friction Performance Assessment of Non-Asbestos Organic (Nao) Composite to Steel Interface and Polytetrafluoroethylene (PTFE) Composite to Steel Interface: Experimental Evaluation and Application in Seismic Resistant Structures. *Construction and Building Materials*, 174: 272-283.
- [5] Kumar M., Bijwe J. 2011. Non-Asbestos Organic (NAO) Friction Composites: Role of Copper; Its Shape and Amount. *Wear*, 270 (3–4): 269-280.
- [6] Sugözü B. 2018. Tribological Properties of Brake Friction Materials Containing Fly Ash. *Industrial Lubrication and Tribology*, 70 (5): 902-906.
- [7] Ikpambese K.K., Gundu D.T., Tuleun L.T. 2016. Evaluation of Palm Kernel Fibers (PKFs) For Production of Asbestos-Free Automotive Brake Pads. *Journal of King Saud University Engineering Sciences*, 28 (1): 110-118.
- [8] Sugozi B., Daghan B., Akdemir A., Ataberk N. 2016. Friction and Wear Properties of Friction Materials Containing Nano/Micro-Sized SiO₂ Particles. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68 (2): 259-266.
- [9] Kukutschowa J., Roubicek V., Malachova K., Pavlickova Z., Holusa R., Kubackova J., Micka V., MacCrimmon D., Filip P. 2009. Wear Mechanism in Automotive Brake Materials, Wear Debris and its Potential Environmental Impact. *Wear*, 267: 807–817.
- [10] Ho S.C., Lin J.H.C., Ju C.P. 2005. Effect of Fiber Addition on Mechanical and Tribological Properties of A Copper/Phenolic Based Friction Material. *Wear*, 258: 861–869.
- [11] Handa Y., Kato T. 1996. Effects of Cu Powder BaSO₄ and Cashew Dust on The Wear and Friction Characteristics of Automotive Brake Pads. *Tribology Transactions*, 39 (2): 346-353.
- [12] TS 555 (Turkish Standard), 1992. Highway vehicles, brake systems, brake pads for frictional brake, Turkey.
- [13] Nesrine H., Cristol A.L., Najjar D., Elleuch R., Desplanques Y. 2014. Influence of Hot Molding Parameters on Tribological and Wear Properties of a Friction Material. *Tribology Transactions*, 57 (3): 387-395.
- [14] Tabor D. 1996. Friction as a Dissipated Process. *Friction of Organic Polymers in Fundamentals of Friction. Macroscopic and Microscopic Processes*, 220 (3).
- [15] Jang H., KO K., Kim S.J., Basch R.H., Fash J.W. 2004. The Effect of Metal Fibers on The Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials. *Wear*, 256 (3/4): 406–414.
- [16] Anderson A.E. 1992. Friction, Lubrication and Wear technology. *ASM Handbook*, 18: 569-577.
- [17] Stachowiak G.W., Batchelor A.W. 2001. *Engineering Tribology*. Heineman, Boston, 1: 36-44.
- [18] Sugozi I., Mutlu I., Sugozi B. 2016. The Effect of Colemanite on The Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68 (1): 92-98.
- [19] Leonardi M., Menapace C., Matějka V., Gialanella S., Straffelini G. 2018. Pin-on-Disc Investigation on Copper-Free Friction Materials Dry Sliding Against Cast Iron. *Tribology International*, 119: 73-81.
- [20] Ravikiran A., Jahanmir S. 2001. Effect of Contact Pressure and Load on Wear of Alumina. *Wear*, 251 (1–12): 980-984
- [21] Shin M.W., Cho K.H., Lee W.K., Jang H., 2010. Tribological Characteristics of Binder Resins for Brake Friction Materials at Elevated Temperatures. *Tribology Letters*, 38 (2): 161-168.
- [22] Hooton N.A. 1969. Metal-Ceramic Composites in High-Energy Friction Applications. *Bendix Technical Journal*, 55-61.