

Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilmiş Uçucu Kül Takviyeli Bronz Matrisli Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Özellikleri Üzerine Kolemanit Miktarının Etkisi

Hüsamettin KUŞ^{1*}, Duran ALTIPARMAK² Gökhan BAŞAR³

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Programı

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü

³İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

(Geliş / Received : 05.03.2016 ; Kabul / Accepted : 21.04.2016)

ÖZ

Bu çalışmada sıcak presleme yöntemi ile üretilen kütlece % 6 uçucu kül takviyeli bronz matrisli fren balata malzemesinin tribolojik özellikleri üzerine farklı oranlarda (% 0,5-4) ilave edilen kolemanit miktarının etkisi araştırılmıştır. Üretilen balata malzemelerinin sürtünme aşınma deneyleri SAE J661 test standardına göre Chase tipi test cihazında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sertlik, yoğunluk gibi bazı fiziksel özellikler de belirlenmiştir. Aşınma mekanizmasını belirleyebilmek için numunelerin aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) kullanılarak karakterize edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda bütün balata numunelerinin aşınma direnci ve sürtünme katsayısı değerleri SAE-J661 standart aralığında çıkmıştır. Aşınma direnci açısından en iyi sonucu kolemanit ilavesiz sürtünme malzemesi verirken, sürtünme katsayısı açısından en iyi sonucu % 0,5 kolemanit ilaveli sürtünme malzemesi vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Fren balata malzemesi, Uçucu Kül, Kolemanit, Aşınma mekanizması

The Effect of Colemanite Content on Friction-Wear Properties of the Bronze Based Brake Lining Material Reinforced with Fly Ash Fabricated by the Hot-Pressing Method

ABSTRACT

In this study, the effect of the addition of different ratios of colemanite (0.5-4 %) on tribological properties of bronze based brake lining material containing 6 % fly ash fabricated by hot pressing method were investigated. The friction-wear tests of produced brake lining materials were performed on a Chase type friction tester according to SAE J661 test standard. Furthermore, some of physical properties such as density and hardness were also determined. Wear surface of samples were characterized by using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) to determine the wear mechanism. Wear resistance and friction coefficient values of all the brake lining specimens were found to be in the range specified in SAE-J661 standard. In terms of wear resistance, the best result was found for brake lining material without colemanite addition while 0,5 % colemanite added sample gave the best result in terms of friction coefficient.

Key Words: Brake lining materials, Fly Ash, Colemanite, Wear mechanisms

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Frenler otomobillerdeki en önemli güvenlik ve performans elemanlarından biridir [1]. Hareket enerjisini sürtünme yoluyla ısıya dönüştürerek hareketin durdurulması ya da kontrol altına alınmasını sağlayan sistemlere fren sistemi denir [2].

Fren sisteminin en önemli parçalarından biri ise fren balatasıdır [3]. Fren balata malzemesi taşıtın sahip olduğu kinetik enerjisi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürür. İdeal bir balata malzemesinden; kuru veya ıslak ortamlarda değişken yük, sıcaklık, hız gibi farklı çalışma koşullarında nispeten kararlı ve yüksek bir sürtünme katsayısı göstermesi bunun yanı sıra düşük aşınma oranı, frenleme esnasında düşük ses ve fren diskine zarar vermemesi beklenir [4]. Fren balata malzemesinin sahip olduğu bu özellikler doğrudan taşıtın frenleme ve güvenlik performansını etkiler [5].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: husamettin.kus@hotmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 537-546

Otomobil fren sistemlerinde yaygın olarak polimer matrisli balata malzemeleri kullanılmaktadır [6]. Bu balata malzemelerinin üretiminde tüm bileşenleri bir arada tutmak amacıyla yaklaşık % 30-% 40 arasında fenolik reçine kullanılır. Ayrıca fenolik reçineyi üretmek ucuz ve kolaydır. Ancak ağır fren koşulları altında sürtünme çifti (balata-disk veya balata-kampana) arasında oluşan yüksek sıcaklık (300-450 °C) balatayı oluşturan bileşenleri bir arada tutan fenolik reçinenin termal bozulmaya uğramasına neden olur. Buna bağlı olarak da balata malzemesinin sürtünme katsayısı değeri hızla düşer [7-9]. Fren etkinlik kaybı olarak adlandırılan bu durum durma mesafesinin artmasına neden olarak taşıt güvenliğini azaltır [10].

Yüksek sürtünme arayüzey sıcaklığında polimer matrisli fren balata malzemelerinin neden olduğu fren etkinlik kaybı probleminin üstesinden gelebilmek için polimer matrisli balata malzemelerine göre daha yüksek aşınma direnci ve sıcaklık karşısında daha kararlı sürtünme katsayısı davranışı gösterebilen sinterlenmiş balata malzemeleri taşıt fren sistemlerin de kullanılabilir [11]. Bu balata malzemeleri metal bir matris (Cu, Demir, Alüminyum veya onların alaşımları) ve sürtünme katsayısını arttırmak için oksitler (Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , Mullit ve Spinel), nitrürler (TiN ve Si_3N_4) ve karbürler (B_4C , SiC , TiC ve VC) gibi metal olmayan bileşikler ile katı yağlayıcıların (Grafit, MoS_2 , vd.) karışımından oluşmaktadır [12]. Ancak bu tip balatalarda matris malzemeyi güçlendirmek için kullanılan takviye elemanlarının nispeten yüksek fiyatları bu balataların ana dezavantajını oluşturmaktadır. Bu nedenle bu tip balatalar termik santrallerde kömürün yakılması sonucunda ortaya çıkan ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunlara yol açan uçucu kül partikülleri ile güçlendirilebilir [13]. Uçucu kül günümüzdeki ticari fren balatalarının birçoğunda kullanılmakta olan SiO_2 , Al_2O_3 , $CaSO_4$ ve yanmamış karbon içeren bir karışım olup, düzgün fiziksel ve mühendislik özelliklere sahip ince büyüklükte partiküllerden oluşmaktadır. Ayrıca uçucu kül günümüzdeki fren balatalarında kullanılan malzemelerle karşılaştırıldığında % 2-3 oranında daha düşük özgül ağırlığa sahiptir [1]. Balata üretiminde takviye elemanı olarak atık uçucu kül partiküllerinin kullanımı ile hem üretim maliyetleri düşürülebilecek hem de çevre korunmasına katkı sağlanabilecektir. Literatürde uçucu külün polimer matrisli fren balata malzemelerinde dolgu/takviye elemanı olarak kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar uçucu külün kompozit malzemelerin sürtünme-aşınma performansları üzerine olumlu katkılar sağladığını göstermiştir [1,14,15]. Ayrıca son yıllarda uçucu kül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin sürtünme-aşınma davranışlarını araştıran çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda uçucu kül partikülü ilavesinin matris malzemenin aşınma direncini dikkate değer oranda geliştirdiği ifade edilmiştir [16-18]. Literatürde çeşitli seramik partiküller (Al_2O_3 , SiO_2 , $ZrSiO_3$, SiC) ile

güçlendirilmiş sinterlenmiş balata malzemelerin sürtünme-aşınma özellikleri ile ilgili de çeşitli araştırmacıların yaptıkları çalışmalar bulunmaktadır [19-24]. Ancak literatürde uçucu kül takviyeli sinterlenmiş bronz matrisli balata malzemelerin sürtünme-aşınma özellikleri ile ilgili yeterli çalışma bulunamamıştır. Bu yüzden bu konuda yapılacak çalışma literatürdeki önemli bir eksikliği dolduracaktır.

Kimsayal bileşimi $Ca_2B_6O_{11}.5(H_2O)$ olan kolemanit en önemli bor minerallerinden biridir ve Türkiye dünyadaki en büyük kolemanit rezervlerine sahiptir [25]. Kolemanitin sertliği Mohs

sertlik sınıflandırmasına göre 4-4,5, özgül ağırlığı 2,42 g/cm^3 'tür. [2]. Literatürde polimer matrisli fren balata malzemelerinde üleksit, borik asit, borat gibi çeşitli bor minerallerinin kullanımı ile ilgili çeşitli araştırmacıların yaptıkları çalışmalar bulunmaktadır [25-29]. Bu çalışmalarda borik asit, üleksit ve boraks ilaveli polimer matrisli fren balata numunelerinin daha yüksek ve daha kararlı bir sürtünme katsayısı davranışı gösterdikleri rapor edilmiştir.

Bu çalışmada kütlece % 6 uçucu kül takviyeli bronz matrisli fren balata malzemesine sürtünme-aşınma performansını geliştirmek için kütlece farklı oranlarda (% 0,5-4) kolemanit ilave edilerek yeni fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu numunelerin sürtünme aşınma özellikleri Chase tipi sürtünme aşınma test cihazında incelenerek numunelerin ağırlık kaybı, sürtünme davranışı belirlenmiştir. Ayrıca sürtünme karakteristiğini belirlemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-Işını Difraksiyon (XRD) analizleri de yapılmıştır.

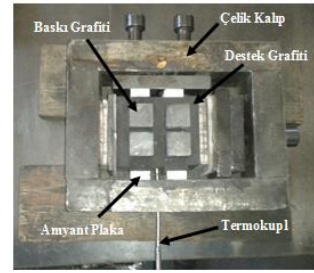
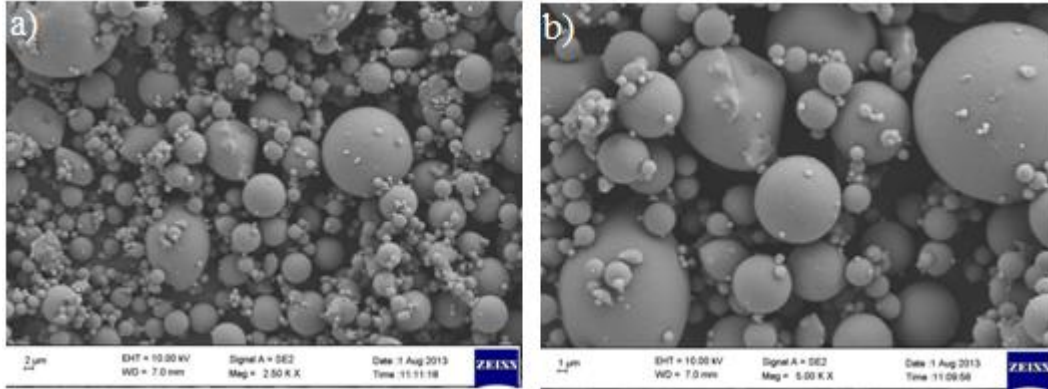
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

2.1. Numune Üretimi (Production of the sample)

Bu çalışmada bronz matrisli balata malzemesi üretmek için kütlece % 86 bronz tozu ($CuPb10Sn10$), % 11 demir tozu ve % 3 grafit tozu kullanılmıştır. Balata üretiminde kullanılan tozların boyut analizi Çizelge 1'de verilmiştir. Bu matris malzemeye takviye elemanı olarak İskenderun Sugözü Termik Santralinden temin edilen uçucu kül kütlece % 6 oranında ilave edilmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu kül partiküllerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri Şekil 1'de, kimyasal analiz sonuçları da Çizelge 2'de verilmiştir. Matris malzeme+% 6 uçucu kül takviyeli bronz matrisli balata malzemesine Çizelge 3'de kimyasal analizi verilen kolemanit kütlece % 0,5, % 1, % 2 ve % 4 oranında ilave edilerek yeni fren balata numuneleri üretilmiştir. Homojen bir toz karışımı elde edebilmek amacıyla balata üretiminde kullanılan tozlar üç boyutlu hareket edebilen Turbula tipi karıştırıcıda 90 dakika boyunca karıştırılmıştır. Fren balata numunesi üretmek için hazırlanan karışım tozları Şekil 2'de verilen 25 mmx25 mmx7 mm boyutlarındaki grafit kalıp içerisinde 650 °C sıcaklık ve 70 MPa basınç altında 4 dakika boyunca sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 1. Fren balata malzemesi üretiminde kullanılan tozların boyut analizi (Size analyses of the powders used in fabrication of brake lining material)

Partikül	d (0,1)	d (0,5)	d (0,9)
Demir Tozu	36,16 µm	94,08 µm	168,37 µm
Bronz Tozu	35,17 µm	91,87 µm	190,83 µm
Grafit	16,23 µm	88,69 µm	206,53 µm
Uçucu Kül	3,63 µm	19,60 µm	76,25 µm
Kolemanit	3,82 µm	32,19 µm	95,92 µm

**Şekil 2.** Fren balata numunesi üretiminde kullanılan toz presleme kalıbı (Powder pressing die used in the brake pad sample fabrication)**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan uçucu külün farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri a) ×2500 b) ×5000 (SEM micrographs representative of the fly ash particles used in this study a) 2500× b) 5000×)**Çizelge 2.** Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal bileşimi (Chemical constituents of fly ash used in this study)

Bileşik	Kütlece (%)
SiO ₂	62,30
Al ₂ O ₃	20,10
Fe ₂ O ₃	7,93
MgO	1,33
TiO ₂	1,15
Na ₂ O	1,09
K ₂ O	2,03
CaO	2,42

Çizelge 3. Çalışmada kullanılan kolemanitin kimyasal bileşimi (Chemical constituents of colemanite used in this study)

Bileşik	Değer (%)
B ₂ O ₃	40,00±0,5
CaO	27,00±1,00
SiO ₂	4,00-6,50
SO ₄	0,60 Max.
Fe ₂ O ₃	0,08 Max.
Al ₂ O ₃	0,40 Max.
MgO	3,00 Max.
SrO	1,50 Max.
Na ₂ O	0,35 Max.
Kızdırma Kaybı	24,60 Max.
Nem	1 Max.

2.2. Karakterizasyon Testleri (Characterisation tests)

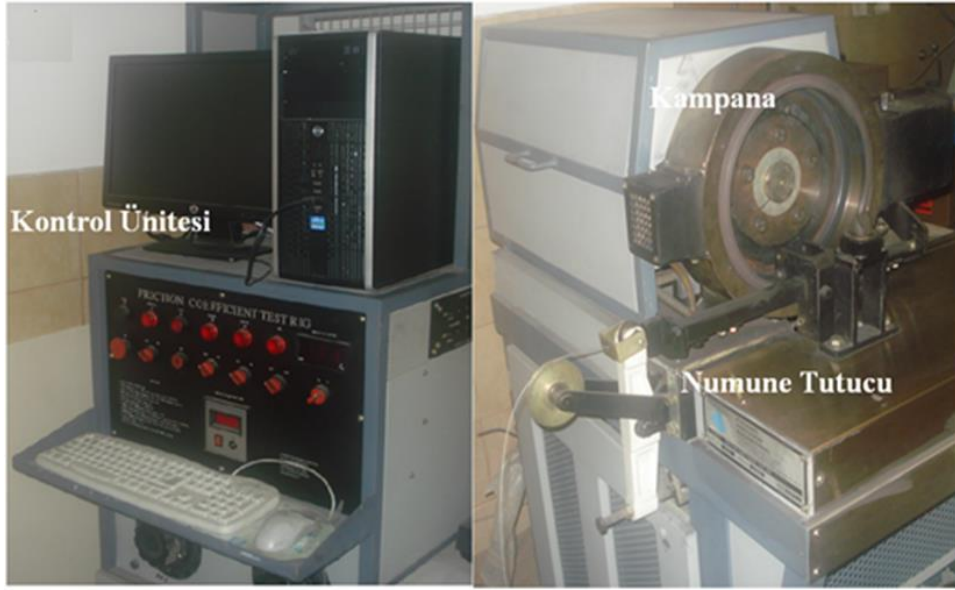
Üretilen fren balata malzemelerinin karakterizasyonu amacıyla sinterleme sonrası yoğunluk ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Balata malzemelerinin yoğunlukları Arşimet prensibi ile belirlenmiştir. Balata malzemelerinin sertlik ölçümleri ise Instron Wolpert marka sertlik ölçme cihazında Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Brinell sertlik ölçme yöntemi 2,5 mm bilye çapı ve 31,25 kg kuvvet kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yük numunelere 30 s boyunca uygulanmıştır. Balata malzemelerinden en az beş ölçüm değeri alınmış ve alınan bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Balata malzemelerinin aşınma testi sonrası aşınma yüzeylerinde meydana gelen aşınma ve sürtünme mekanizmalarını tespit edebilmek için Zeiss/Supra marka taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak gerekli noktaların fotoğrafları çekilmiş ve EDS analizleri yapılmıştır. Ayrıca fren balata malzemelerinin aşınma yüzeyinde oluşan fazları tanımlamak için Rigaku SmartLab marka cihazda, 5°<2θ<100° tarama aralığında, 40 kV–30 mA ve Cu/K–beta radyasyon ışınımıyla 3° mm⁻¹ tarama hızında ve 0,05° tarama adımında X-Işını Difraksiyon (XRD) analizi yapılmıştır.

Performans Testi (Performance test)

Fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma testleri SAE-J661 standardına (Çizelge 4) göre test yapan chase tipi sürtünme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı numune tutucusu, disk ve kontrol ünitesi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3). Aşındırma

işleminde 250 Hv sertlikte ve 280 mm çapında gri dökme demirden üretilmiş aşındırıcı disk kullanılmıştır. Test cihazında 25 mmx25 mmx7 mm boyutlarına sahip balata numuneleri kullanılmıştır. Her bir parametre için 4 deney numunesi üretilmiş ve bu deney numunelerinden elde edilen sonuçların ortalamaları alınmıştır. Numuneye uygulanan yük pnömatik bir sistem tarafından sağlanmaktadır. Test boyunca kampana sıcaklığı, kampananın dış çevresine yerleştirilmiş rezistanslar ve hava soğutma sistemi tarafından otomatik olarak kontrol edilmektedir. Deney sonuçları aşınma test cihazına bağlı bir bilgisayardan alınmıştır.

Çizelge 5’de görüldüğü gibi kolemanit miktarının artması ile fren balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Kolemanit katkısız fren balata malzemesinin yoğunluğu 6,81 g/cm³ bulunmuştur. Bu malzemeye % 4 kolemanit ilave edildiğinde yoğunluğun yaklaşık % 10 düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun 650 °C sinterleme sıcaklığında, kolemanitin sahip olduğu kristal suyu kaybederek gözenekli bir yapıya dönüşmesinden ileri geldiği düşünülmüştür. Kolemanit yaklaşık olarak % 22 civarında su ihtiva ettiğinden, numunelerin sinterlemesi esnasında su kaybından dolayı yoğunluklarda azda olsa bir düşüş olabilir. Benzer sonuçlar Boz ve Kurt



Şekil 3. Chase tipi sürtünme aşınma test cihazı (Chase-type friction-wear test machine employed in the testing)

Çizelge 4. SAE J661 test standardına göre sürtünme aşınma deney şartları (Friction-wear test conditions according to SAE J661 test standard)

İşlem Basamakları	Hız (Dev/dak)	Yük(N)	Sürtünme (s)	Bekleme (s)	Uygulama Sayısı	Sıcaklık(°C)		
						Min	Max	Artış
Parlatma	308	450	1200	0	1	-	93	0
Düzenleme	205	230	300	0	1	-	93	0
I. Alıştırma	411	670	10	20	20	82	104	0
I. Yorma	411	670	600	0	1	82	289	28
I.Toparlanma	411	670	10	0	4	261	93	56
Aşınma	411	670	20	10	100	193	205	0
II. Yorma	411	670	600	0	1	82	345	28
II.Toparlanma	411	670	10	0	5	317	93	56
II.Alıştırma	411	670	10	20	20	82	104	0

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mekanik Özellikler (Mechanical properties)

% 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk ve sertlik değerleri Çizelge 5’de verilmiştir.

tarafından yapılan çalışmada da rapor edilmiştir [22]. Ayrıca artan kolemanit miktarına bağlı olarak yoğunluk düşüşünün diğer bir nedeni olarak da kolemanit tozunun bronz tozuna göre oldukça düşük yoğunluğa sahip olması gösterilebilir.

Çizelge 5. Kolemanit miktarına bağlı yoğunluk ve sertlik değişimi (Variations of density and hardness depending on the colemanite content)

Kolemanit Miktarı (%)	0	0,5	1	2	4
Yoğunluk (g/cm ³)	6,81	6,58	6,46	6,35	6,11
Sertlik (HB)	68	58	61,56	60	54

Çizelge 5 incelendiğinde % 6 uçucu kül takviyeli balata malzemesinin sertlik değerinin 67 HB olduğu belirlenmiştir. Bu malzemeye % 0,5 kolemanit ilave edildiğinde sertlik değerinin 58 HB'ye düştüğü belirlenmiştir. Kolemanit miktarının % 1 olması ile sertlik değerinin hafif bir artış ile 61,56 HB'ye çıktığı ve bu noktadan sonra da artan kolemanit miktarı ile sertlik değerlerinin azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Sertlikteki bu azalmanın nedeni olarak yoğunluk değerlerindeki düşüş gösterilebilir [30].

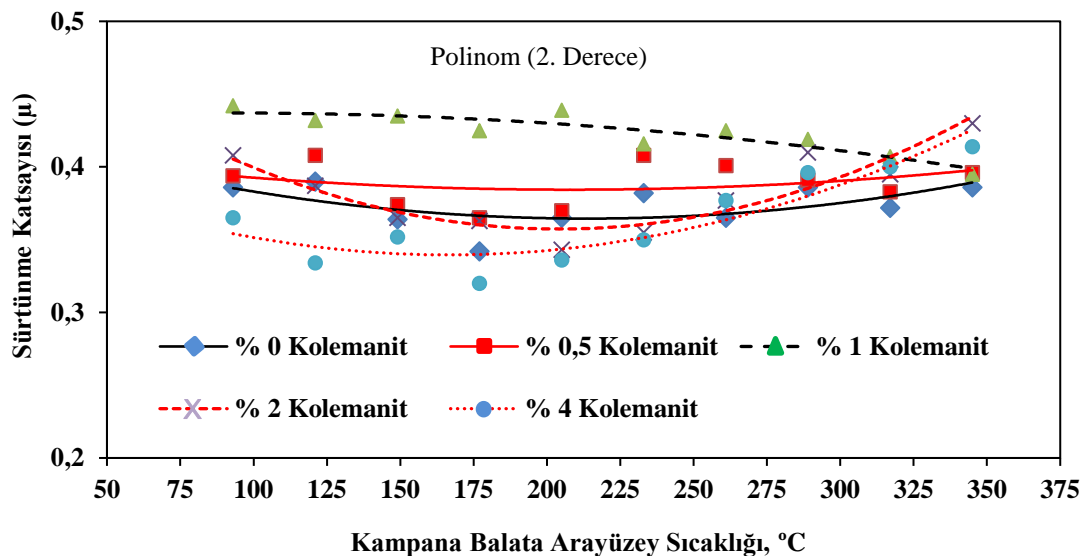
3.2. Sürtünme Performansı (Friction performance)

Fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı, aşınma direnci ve artan sürtünme arayüzey sıcaklığı karşısındaki sürtünme katsayısı kararlılığı önemli ölçüde sürtünme tabakasının doğasına bağlıdır. Sürtünme yüzey filmleri birincil ve ikincil temas platosu olmak üzere iki tür temas platosundan oluşmaktadır [31]. Sürtünme başladığında fren balata malzemesinin aşınmaya karşı dirençli ve mekanik olarak kararlı bileşenlerinin düşük aşınma oranları göstermesi nedeniyle ilk olarak birincil temas platoları oluşmakta ve bu noktalar ikincil temas platolarının büyüebilmesi için çekirdeklenme noktalarını oluşturmaktadır. Sürtünme ara yüzeyinde oluşan normal basınç ve kayma kuvvetinin etkisi ile birincil temas platolarının karşısında biriken aşınma partikülleri sıkıştırılmakta ve sürtünme arayüzeyinde artan sıcaklık etkisiyle sinterlenmektedir. Böylece birincil temas platolarının karşısında ince ikincil temas

platoları oluşmaktadır [32-33]. Dolayısıyla balata sürtünme yüzeyinde oluşan bu farklı karaktere sahip sürtünme filmleri balata malzemelerinin farklı sürtünme davranışı göstermelerinin nedeni olarak düşünülmektedir [34].

Fren balata malzemelerinin frenleme esnasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan sıcaklık artışı karşısında oldukça yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı göstermeleri taşıt güvenliği açısından oldukça hayatidir. Şekil 4 incelendiğinde 95-345 °C sıcaklık aralığında en düşük sürtünme katsayısı değerini (0,365-0,414) % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi verirken en yüksek sürtünme katsayısı değerini (0,442-0,395) ise % 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi vermiştir.

Fren balata malzemeleri, artan sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı sürtünme katsayısı kararlılığı yönünden değerlendirildiğinde % 0,5 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin oldukça kararlı bir sürtünme katsayısı davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, % 0,5 kolemanit içeren fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde oluşan temas platolarının varlığı ile açıklanabilir. Benzer şekilde Österle vd., yaptıkları çalışmada fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde, temas platosu olarak adlandırılan oluşumun frenleme esnasındaki sürtünme katsayısı kararlılığı üzerinde önemli bir rol oynadığını rapor etmişlerdir [31]. Ancak % 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin 261 °C sıcaklıktan sonra hafif bir düşme eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Artan

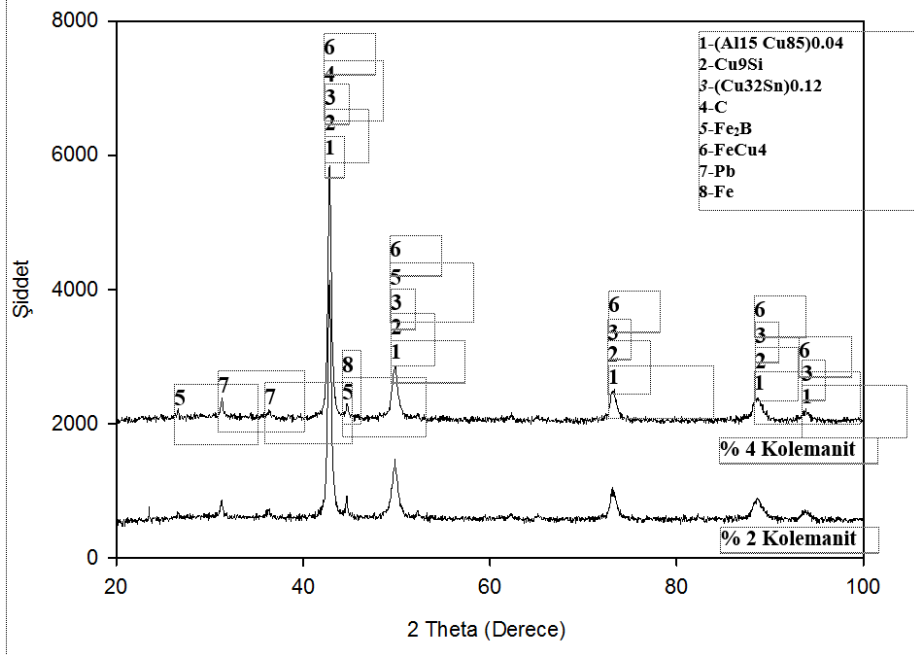


Şekil 4. Fren balata malzemelerinin sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine kolemanit miktarının etkisi (Effect of colemanite content on the variations of the temperature-dependent friction coefficients of the brake lining materials)

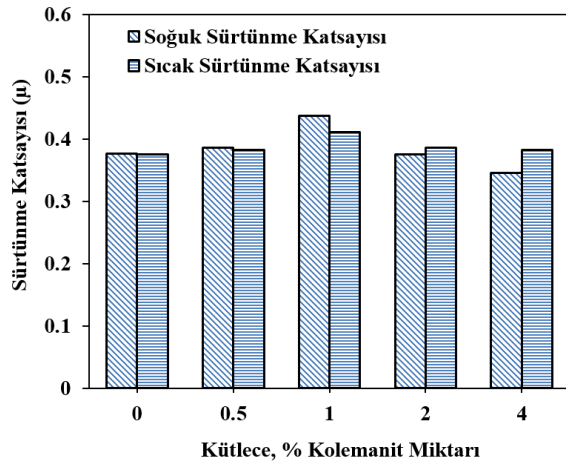
sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı olarak fren etkinliğindeki bu kayıp "fade" olarak adlandırılmaktadır [35]. Yüksek arayüzey sıcaklıklarında sürtünme kuvvetindeki bu düşüşe balata malzemesi ile kampana arasındaki kayma dayanımındaki azalmanın neden olduğu düşünülmektedir. % 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin aksine % 2 ve % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin ise sırası ile 205 °C ve 177 °C sıcaklıktan sonra artan sürtünme arayüzey sıcaklığı ile artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Balata içerisindeki kolemanit miktarının % 2 ve % 4 olması ile kolemanitten sağlanan bor elementi ile yapı içerisindeki demir elementi arasında termokimyasal bir süreç meydana gelerek aşınma yüzeyinde Fe₂B gibi sert ve kırılğan bir demir borür fazının oluştuğu düşünülmektedir. Bu görüşü % 2 ve % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinin XRD analiz sonuçları destekler niteliktedir (Şekil 5). XRD analiz sonuçları ve % 4 kolemanit takviyeli balata malzemesinin Şekil 9.a'daki aşınma yüzey SEM görüntüsü birlikte değerlendirildiğinde Fe₂B fazının oluştuğunu söyleyebiliriz. Mevcut bilgiler ışığında % 2 ve % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısındaki bu artış eğiliminin sürtünme yüzeyinde oluşan kırılğan Fe₂B fazının sürtünme esnasında kırılarak sürtünme çifti arasındaki temas alanını arttırmamasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Benzer şekilde Kim vd., yaptıkları çalışmada sürtünme esnasında düşük kırılma tokluğuna sahip abrasif partiküllerin sürtünme arayüzeyinde kırılıp parçalanabileceklerini ve buna bağlı olarak da sürtünme çifti arasındaki temas alanının artması ile sürtünme katsayısının artış gösterebileceğini ifade etmişlerdir [36].

Balata malzemesinin fren diski ile beraber çalışması esnasında sürtünme etkisi ile arayüzey sıcaklığı sürekli artış gösterir. Bu sıcaklığın etkisiyle balata malzemesinin yapısı ve sergilediği tribolojik özellikler de değişmektedir [37]. Bu çalışmada, balataların sürtünme-aşınma test sonuçlarına göre belirli bir sıcaklığın üzerinde ölçülen sürtünme katsayıları sıcak, altındakiler de soğuk olarak isimlendirilmiştir. Buna göre II. yorma testi esnasında 93°C, 121°C, 149 °C, 205 °C sıcaklıklarda elde edilen sürtünme katsayılarının ortalamasına soğuk sürtünme katsayısı, I. toparlanma (149, 205 °C), II. yorma (345, 317, 289, 261, 233 °C) ve II. toparlanma (261, 205, 149 °C) testleri esnasında belirtilen sıcaklıklarda elde edilen sürtünme katsayılarının ortalaması da sıcak sürtünme katsayısı olarak isimlendirilmiştir. Şekil 6'da % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarına bağlı olarak değişen sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kolemanit miktarının % 0,5'den % 1'e artması ile soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının arttığı ancak bu orandan sonra artan kolemanit miktarı ile soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının azaldığı belirlenmiştir.

En düşük soğuk sürtünme katsayısı değeri (0,346) % 4 kolemanit katkıli fren balata malzemesinde belirlenirken en yüksek soğuk sürtünme katsayısı değeri (0,437) % 1 kolemanit katkıli fren balata malzemesinde belirlenmiştir. En düşük sıcak sürtünme katsayısı değeri (0,375) kolemanit katkısiz fren balata malzemesinde belirlenirken en yüksek sıcak sürtünme katsayısı değeri (0,411) % 1 kolemanit katkıli fren balata malzemesinde belirlenmiştir. Ayrıca % 2 ve % 4 kolemanit katkıli fren balata malzemelerinde sıcak sürtünme katsayılarının



Şekil 5. % 2 ve % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinin XRD analizi (XRD analysis of the worn surfaces of 2 wt. % and 4 wt. % colemanite reinforced brake lining materials)

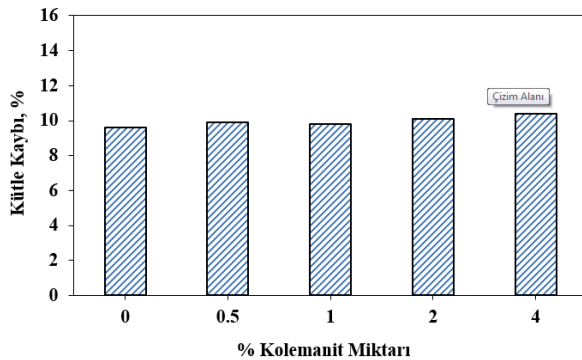


Şekil 6. Fren balata malzemelerinin soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine kolemanit miktarının etkisi (Effect of colemanite content on the variations of the cold and hot friction coefficients of the brake lining materials)

soğuk sürtünme katsayılarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Aşınma Oranı (Wear rate)

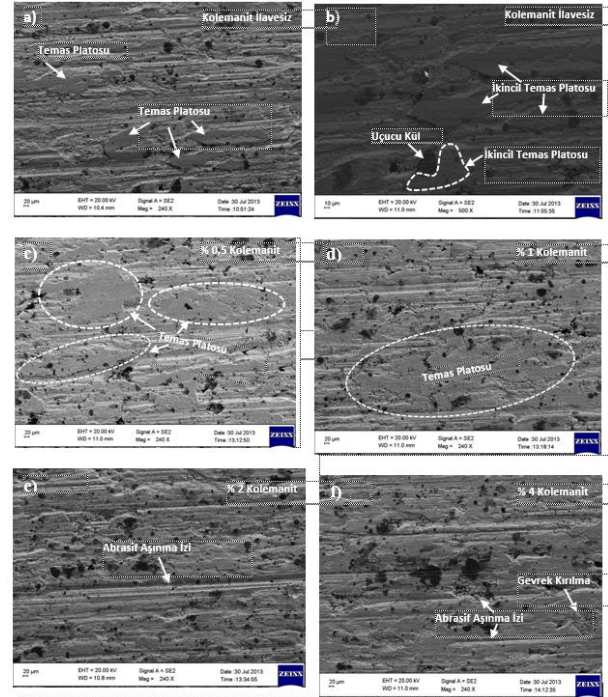
Bir fren sisteminde yer alan balata malzemesinin sergilediği sürtünme katsayısı değişimi, frenleme performansını değerlendirmek için yeterli değildir. Sürtünme katsayısı çok yüksek olsa bile ömrü az olan bir balatanın, maliyeti ve değiştirme süreleri önemli bir dezavantaj oluşturur. Bu bakımdan balata ömrünü belirleyen aşınma oranı da en az sürtünme katsayısı kadar önemli ve gereklidir [37]. Bu çalışmada kolemanit içermeyen fren balata malzemesinin kütle kaybı % 9,6 bulunmuştur (Şekil 7). Bu balata malzemesine % 0,5 kolemanit ilave edildiğinde kütle kaybının hafif bir artış ile % 9,9'a yükseldiği belirlenmiştir. Kolemanit miktarının % 1 olması ile kütle kaybının % 9,8'e düştüğü görülmüştür. Bu noktadan sonra kolemanit miktarının % 2 ve % 4'e artması ile kütle kayıplarının sırası ile % 10,1 ve 10,4'e yükseldiği belirlenmiştir.



Şekil 7. Kolemanit miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (Variations of mass loss depending on colemanite content)

3.4. Aşınma yüzeyi analizi (Analysis of the worn surface)

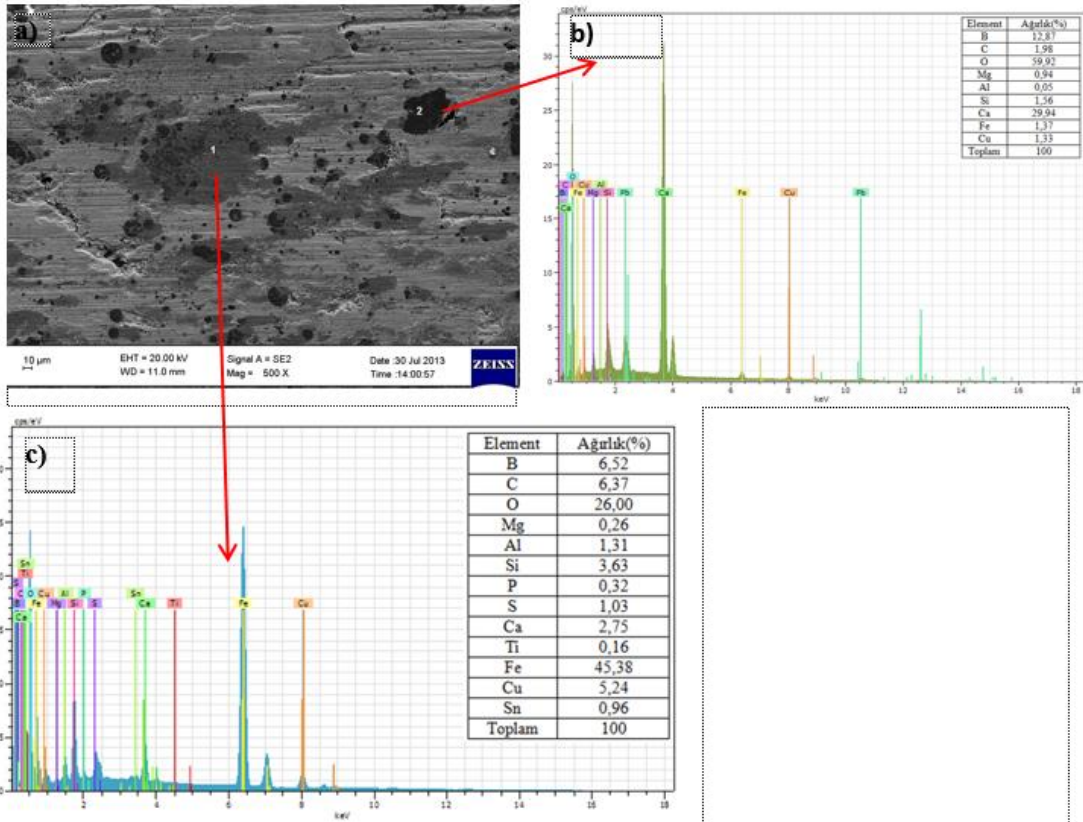
Farklı oranlarda kolemanit katkılı balata malzemelerinin SAE J661 test standardına göre yapılan sürtünme-aşınma deneyleri sonrası aşınma yüzeylerinde meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Farklı oranlarda kolemanit içeren fren balata malzemelerin aşınma yüzeylerinin SEM resimleri a) % 0 ($\times 240$); b) % 0 ($\times 500$); c) % 0,5 ($\times 240$); d) % 1 ($\times 240$); e) % 2 ($\times 240$) f) % 4 ($\times 240$) (SEM micrographs of the worn surfaces of the brake lining materials containing colemanite of different ratios a) 0 % (240 \times); b) 0 % (500 \times); c) 0,5 % (240 \times) d) 1 % (240 \times); e) 2 % (240 \times) f) 4 % (240 \times))

Kolemanit takviyesiz fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde sürtünme esnasında kopan aşınma partiküllerinin aşınmaya karşı daha dirençli bileşen etrafında (uçucu kül partikülleri) temas basıncı ve sürtünme yüzeyinde artan ısı etkisi ile mekanik aşınma işlemine maruz kalarak temas platolarına dönüştüğü belirlenmiştir (Şekil 8.a-b). Literatürde temas platolarının oluşumu ile ilgili yapılan çalışmalarda benzer bulgulara ulaşılmıştır [35, 36]. Fren balata malzemesine % 0,5 ve % 1 kolemanit ilave edildiğinde aşınma yüzeyinde oluşan temas platolarının daha da büyüdüğü belirlenmiştir (Şekil 8.c-d). % 0,5 ve % 1 kolemanit katkılı fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde oluşan bu temas platolarının balata malzemelerini aşınmaya karşı koruduğu ve ayrıca sürtünme katsayısı kararlılığına da katkı sağladığı düşünülmektedir. Österle ve Urban yaptıkları çalışmada sürtünme katsayısının kararlılığı üzerine benzer tespitte bulunmuşlardır [31]. % 2 ve % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemelerinin aşınma yüzeyleri incelendiğinde yüzeylerde fren balata malzemelerini aşınmaya karşı

koruyacak yeterli temas platolarının oluşmadığı ve diğer balata numunelerine göre daha derin abrasif aşınma izlerinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 8.e-f). Aşınma yüzeyinde oluşan bu aşınma izlerinin muhtemelen aşınma yüzeyinde oluşan sert ve kırılğan Fe₂B fazının sürtünme esnasında kırılarak aşınma yüzeyinde kesme türü bir aşınma mekanizması oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 9.a'da verilen % 4 kolemanit ilaveli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi incelendiğinde 1 rakamı ile gösterilen noktanın ağırlıkça % 45,38 oranında demir ve ağırlıkça % 6,52 oranında bor elementi içerdiği 2 rakamı ile gösterilen noktanın ise % 59,92 oksijen, 29,94 kalsiyum, % 12,87 bor ve düşük miktarda karbon, magnezyum, alüminyum, silisyum, demir ve bakır elementleri içerdiği tespit edilmiştir (Şekil 9.b-c). 1 noktasında tespit edilen demir ve bor elementinin varlığı bu noktada Fe₂B fazının oluştuğunun bir göstergesi olarak düşünülebilir. 2 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analiz sonucu da bu noktadaki fazın kolemanit partikülü olduğunu göstermektedir.

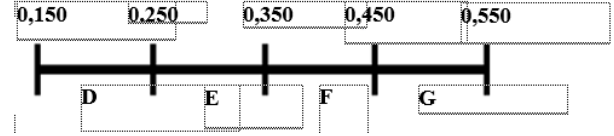


Şekil 9. % 4 kolemanit katkılı fren balata numunesinin aşınma yüzeyinin a) SEM resmi (×500) b) 1 numara ile gösterilen noktadan alınan c) 2 numara ile gösterilen noktadan alınan EDS analiz sonucu (Worn surface of brake lining material containing 4 % colemanite a) SEM micrograph (500×) a) EDS elemental analysis result taken from the point labeled 1 b) EDS elemental analysis result taken from the point labeled 2)

3.5. Değerlendirme

Şekil 10'da SAE-J661 test standardına göre, test edilen numunelerin soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarına karşılık gelen harf değerleri görülmektedir. Bu skalada fren ve debriyaj balataları için sürtünme katsayısı

değerleri 0,150-0,550 arasında değerler kabul edilmiş ve her bir balata malzemesinin soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri skalada belirtilen sürtünme katsayısı aralığına karşılık gelen harf değeri ile kodlanmıştır.



Şekil 10. SAE-J661 test standardına göre sürtünme katsayılarına karşılık gelen harf değerleri (The letter equivalents of friction coefficient values according to the SAE-J661 test standard)

Balata imalatçıları skalada DD koduna karşılık gelen ve 0,150-0,250 aralığında sürtünme katsayısı değerlerine sahip balataların debriyaj balataları ve ağır iş makinelerinin fren balataları için uygun olduğunu ancak binek türü araçların fren balatalarından beklenen performans yönünden ihtiyaçlara cevap veremediklerini

Çizelge 6. SAE-J661 test standardına göre balata malzemelerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin harf karşılığı (The letter equivalents of frictional coefficient values obtained from brake lining materials according to the SAE-J661 test standard)

Numune kodu	Skalada okunan değer
Ana Malzeme	FF
Ana Malzeme+% 0,5 Kolemanit	FF
Ana Malzeme+% 1 Kolemanit	FF
Ana Malzeme+% 2 Kolemanit	FF
Ana Malzeme+% 4 Kolemanit	EF

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada değişik oranlarda kolemanit tozu ilave edilerek sıcak presleme yöntemi ile bronz esaslı balata üretilmiş ve üretilen balataların sürtünme-aşınma özellikleri incelenerek aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir.

- 1) Balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarındaki artışa bağlı olarak sinterleme yoğunluğunun düştüğü görülmüştür.
- 2) Sürtünme ile ara yüzey sıcaklığının artmasına bağlı olarak en az değişim gösteren sürtünme katsayımı % 0,5 kolemanit ilave edilmiş balata malzemesi vermiştir. En yüksek aşınma % 4 kolemanit ilave edilmiş malzemede olurken, en düşük aşınmanın kolemanit ilavesiz balata malzemesinde olduğu tespit edilmiştir.
- 3) SAE-J661 standardına göre üretilen bütün numunelerin otomobil fren sistemlerinde balata malzemesi olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir.
- 4) Termik santrallerden atık bir ürün olarak elde edilen uçucu külün ve ülkemizin önemli bir yeraltı zenginliği olan kolemanitin bronz matrisli balata malzemelerinde fiyat artışına neden olmaksızın rahatlıkla takviye elemanı olarak kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar 07/2010-28 kodlu proje kapsamında çalışmaya destek veren Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimine teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Mohanty, S. and Chugh, P., Y., "Development of fly ash-based automotive brake lining", *Tribology International*, 40: 1217-1224, (2007)
- 2) Sugözü, İ., "Bor Katkılı Asbetsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi", *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009)
- 3) Mutlu, İ., "Seramik katkılı asbetsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel

- incelenmesi", *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002)
- 4) Jaafar, R., T., Selamat, S., M. and Kasiran, R., "Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development", *Powder Metallurgy*, *InTech*, (2012)
- 5) Han, Y., Tian, X. and Yin, Y., "Effects of Ceramic Fiber on the Friction Performance of Automotive Brake Lining Materials", *Tribology Transactions*, 51(6): 779-783, (2008)
- 6) Bijwe, J., "Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials-A Review", *Polymer Composites*, 18(3): 378-396, (1997)
- 7) Jang, H., Ko, K., Kim, J. S. and Basch, H. R., "The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials", *Wear*, 256(3-4): 406-414, (2004)
- 8) Bijwe, J., Majumdar, N. N. and Satapathy, K. B., "Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials", *Wear*, 259(7-12): 1068-1078, (2005)
- 9) Eriksson, M., Bergman, F. and Jacobson, S., "On the nature of tribological contact in automotive brakes", *Wear*, 252(1-2): 26-36, (2002)
- 10) Anderson, E. A., "Friction and Wear of Automotive Brakes", *Friction Lubrication and Wear Technology*, *ASM Handbook*, (1992)
- 11) Junior, E. L. A. J., Arrieche, E. F. and Schaeffer, L., "Analysis of Wear in Organic and Sintered Friction Materials Used in Small Wind Energy Converters", *Materials Research*, 11(3): 269-273, (2008)
- 12) Popescu, N.I., Ghita, C., Bratu, V. and Navarro, P.G., "Tribological behaviour and statistical experiential desing of sintered iron-copper based composites", *Applied Surface Science*, 285: 72-85, (2013)
- 13) Yazıcı, H., "Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi", *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2004)
- 14) Malhotra, M. V., Valimbe, S. P. and Wright, A. M., "Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites", *Fuel*, 81(2): 235-244, (2002)
- 15) Dadkar, N., Tomar, S. B., and Satapathy, K. B., "Evaluation of flyash-filled and aramid fibre reinforced hybrid polymer matrix composites (PMC) for friction braking applications", *Materials and Desing*, 30(10): 4369-4376, (2009)
- 16) Rohatgi, P.K., Guo, R.Q., Huang, P. and Ray, S., "Friction and abrasion resistance of cast aluminum alloy-fly ash composite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28(1): 245-250, (1997)
- 17) Sudarshan and Surappa, M.K., "Dry sliding wear of fly ash particle reinforced A356 Al composites", *Wear*, 265: 349-360, (2008)
- 18) Sai, N.V., Komaraiah, M. and Raju, A.V.S.R., "Preparation and properties of sintered copper-tin composites containing copper coated or uncoated fly ash", *Materials and Manufacturing Processes*, 23(7): 651-657, (2008)
- 19) Boz, M., and Kurt, A., "The effect of Al₂O₃ on the friction performance of automotive brake friction materials", *Tribology International*, 40(7): 1161-1169, (2007)
- 20) Boz, M., Kurt, A., "The Effect of SiO₂ on the Friction Performance of Automotive Brake Friction", *Metallofiz. Noveshie Tekhnology*, 33(3): 389-405, (2011)

- 21) Boz, M. and Kurt, A., "Effect of ZrSiO₄ on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials", *J. Mater. Sci. Technol.*, 23(6): 843-850, (2007)
- 22) Boz, M. and Kurt, A., "Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Özelliklerine Sepiyolit'in Etkisi", *Politeknik Dergisi*, 9(4): 303-310, (2006)
- 23) Junior, E. L. A. J., Arrieche, E. F., and Schaeffer, L., "Analysis of Wear in Organic and Sintered Friction Materials Used in Small Wind Energy Converters", *Materials Research*, 11(3): 269-273, (2008)
- 24) Yao, P., Sheng, H., Xiong, X. and Huang, B., "Worn surface characteristics of Cu-based powder metallurgy brake materials for aircraft", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(1): 99-10, (2007)
- 25) Celik, A.G., Depci, T. and Kılıc, A.M., "New lightweight colemanite-added perlite brick and comparison of its physicomechanical properties with other commercial lightweight materials", *Construction and Building Materials*, 62: 59-66, (2014)
- 26) Sugözü, I., Mutlu, I. and Keskin, A., "Friction and wear behaviour of ulexite and cashew in automotive brake pads", *Materials and Technology*, 49(5): 751-758, (2015)
- 27) Sugözü, İ., Can, İ. and Öner, C., "Investigation of using Calabrian pine cone dust and borax in brake pads", *Industrial Lubrication and Tribology*, 6(6): 678-684, (2014)
- 28) Mutlu, I., Oner, C., Cevik, I. and Findik, F., "Wear performance of some phenolic composites with boric acid", *Industrial Lubrication and Tribology*, 59(1): 38-45, (2007)
- 29) Mutlu, I., Oner, C. and Findik, F., "Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings", *Materials and Design*, 28(2): 480-487, (2007)
- 30) Vijaya Sai, N., Komaraiah, M. and Sita Ramu Raju, A.V., "Preparation and properties of sintered copper-tin composites containing copper coated or uncoated fly ash", *Materials and Manufacturing Processes*, 23(7): 651-657, (2008)
- 31) Österle, W. and Urban, I., "Third Body formation on brake pads and rotors", *Tribology International*, 39: 401-408, (2006)
- 32) Eriksson, M. and Jacobson, S., "Tribological surface of organic brake pads", *Tribology International*, 33(12): 817-827, (2000)
- 33) Ostermeyer, P., G., "Friction and wear of brake systems", *Forschung im Ingenieurwesen*, 66(6): 267-272, (2001)
- 34) Wirth, A., Whitaker, R., Turner, S. and Fixter, G., "An energy dispersive x-ray and imaging x-ray photoelectronic spectroscopical study of transfer film chemistry and its influence on friction coefficient", *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 68: 675-683, (1994)
- 35) Hee, W., K., and Filip, P., "Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings", *Wear*, 259(7-12): 1088-1096, (2005)
- 36) Kim, S. S., Hwang, H. J., Shin, M. W., Jang, H., "Friction and vibration of automotive brake pads containing different abrasive particles", *Wear*, 271: 1194-1202, (2011)
- 37) Ertan, R., ve Yavuz, N., "Balata Malzemelerinde Kullanılan Yapısalarda Balatanın Tribolojik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1): 169-177, (2010)
- 38) Boz, M. ve Kurt, A., "Antimon Trisülfid'in Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Özelliklerine Etkisi", *Teknoloji*, 2(9): 79-90, (2006)