

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİVDE KULLANILAN KOMPOZİT SÜRTÜNME Lİ FREN
BALATALARINDA YERLİ UÇUCU KÜL KATKISININ BALATA ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

EMRE GÜMÜŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET TOPUZ**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİVDE KULLANILAN KOMPOZİT SÜRTÜNME Lİ FREN
BALATALARINDA YERLİ UÇUCU KÜL KATKISININ BALATA ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Emre GÜMÜŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 27.06.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet TOPUZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet TOPUZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu alışma, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı'nın 110R012 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Dünyada ve ülkemizde gelişen otomotiv sektörüne paralel olarak yan sanayi yatırımları da giderek artmaktadır. Motorlu taşıtlarda aşınma sonucu en fazla değiştirilen elemanlardan biri fren balatalarıdır. Sektörün büyüklüğü ve tüketimin fazlalığı, balata üreticilerinin yerel ve uluslararası pazarda devamlı birbirleri ile rekabet halinde olmasını da beraberinde getirmektedir. Kompozit fren balatalarının üretim yönteminin kolay olmasına rağmen optimum özellikleri sağlayan bir kompozisyon elde etmek oldukça güçtür. Bu yüzden üreticiler kullandıkları formülasyon ve üretim şartlarını gizli tutmaktadırlar.

Çalışma kapsamında ülkemiz termik santrallerinden elde edilip özellikleri belirlenen uçucu küller, kompozit fren balatası kompozisyonuna maliyet azaltıcı unsur olarak katılmış ve balata özelliklerine etkisi incelenmiştir. Böylece hem düşük maliyetli kompozit fren balatalarının üretimine katkı sağlamak hem de atık bir malzeme olan uçucu küller için yeni bir kullanım alanı yaratmak amaçlanmıştır.

Lisansüstü eğitim süresince bilgisi ve tecrübesiyle bana yol gösterip yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet TOPUZ'a teşekkür eder, en derin saygılarımı sunarım.

Çalışmama 110R012 nolu proje ile maddi olanak sağlayan TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Testlerin gerçekleştirilmesindeki yardımlarından ötürü Uzman Yahya BAYRAK'a ve bölümümüz teknisyenlerinden Mehmet ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca her zaman yanımda olup bana maddi ve manevi destekte bulunan aileme minnetlerimi sunarım.

Haziran, 2012

Emre GÜMÜŞ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
KOMPOZİT FREN BALATALARINDA KULLANILAN MALZEMELER	4
2.1 Takviye Elemanları	5
2.1.1 Cam	6
2.1.2 Metaller	6
2.1.2.1 Çelik	6
2.1.2.2 Pirinç.....	7
2.1.2.3 Bakır	7
2.1.2.4 Alüminyum	8
2.1.3 Aramid	8
2.1.4 Potasyum Titanat.....	8
2.1.5 Kaya Yünü	9
2.2 Bağlayıcılar	9
2.2.1 Fenolik Reçine.....	9
2.2.2 Novalak Reçine	10

2.3 Dolgu Malzemeleri	10
2.3.1 Organik Dolgular	11
2.3.2 İnorganik Dolgular	11
2.4 Sürtünme Katkıları	11
2.4.1 Abrasivler	12
2.4.1.1 $ZrSiO_4$	12
2.4.1.2 Al_2O_3	12
2.4.1.3 SiO_2	12
2.4.1.4 Demir Oksitler	12
2.4.2 Yağlayıcılar	13
2.4.2.1 Grafit	13
2.4.2.2 Sb_2S_3	14
2.4.2.3 MoS_2	14
2.4.2.4 Kok	15
2.4.2.5 ZnS	15
BÖLÜM 3	
UÇUCU KÜLLER	16
3.1 Uçucu Küllerin Özellikleri	17
3.1.1 Görünüş	18
3.1.2 Tane Boyutu	18
3.1.3 Özgül Ağırlık	18
3.1.4 Karbon Miktarı	18
3.1.5 Kimyasal Bileşim	19
3.1.6 Morfolojik Özellikler	19
3.2 Sınıflandırma	20
BÖLÜM 4	
KOMPOZİT FREN BALATALARININ ÜRETİM YÖNTEMLERİ	22
4.1 Karıştırma	22
4.2 Kalıplama	23
4.3 Kürleme	23
BÖLÜM 5	
OTOMOTİVDE KULLANILAN FREN SİSTEMLERİ VE BALATALARDAN İSTENEN ÖZELLİKLER	25
5.1 Fren Sistemleri	25
5.1.1 Kampanalı Fren Sistemleri	26
5.1.2 Disk Fren Sistemleri	26
5.2 Fren Balatlarından İstenen Özellikler	27
5.2.1 Yoğunluk	29
5.2.2 Isıl Özellikler	29
5.2.2.1 Yanma Kaybı	30
5.2.3 Mekanik Özellikler	31

5.2.3.1	Sertlik	31
5.2.3.2	İç Kesme Dayanımı	31
5.2.4	Yüzey Düzgünlüğü ve Çatlaklar	31
5.2.5	Yağ ve Fren Sıvısı, Tuzlu Su ve Suyu Dayanım	34
5.2.6	Sürtünme ve Aşınma Özellikleri	34
5.2.6.1	Sürtünme Katsayısı	34
5.2.6.2	Aşınma	36
 BÖLÜM 6		
UÇUCU KÜLLERİN KOMPOZİT FREN BALATALARINDA KULLANIMIYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR		38
 BÖLÜM 7		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		46
7.1	Uçucu Kül Karakterizasyonu	47
7.1.1	Özgül Ağırlık	47
7.1.2	Partikül Boyut Dağılımı	49
7.1.3	Yüzey Alanı ve Por Hacmi	51
7.1.4	XRF Analizleri	53
7.1.5	TG/DTA Analizleri	56
7.2	Ticari Balataların İncelenmesi	59
7.2.1	SEM-EDS İncelemeleri	60
7.2.2	Fiziksel, Kimyasal, Mekanik ve Tribolojik Testler	61
7.3	Laboratuvar Ölçekli Numune Üretimi	64
7.3.1	Kullanılan Malzemeler	64
7.3.2	Numune Üretim Şartlarının Belirlenmesi	66
7.3.3	Uçucu Kül Seçimi	69
7.3.4	Üretilen Numunelerin Testleri	71
 BÖLÜM 8		
SONUÇ VE ÖNERİLER		84
KAYNAKLAR		86
ÖZGEÇMİŞ		90

SİMGE LİSTESİ

A	Kenar dökölme alanlarının toplamı
A_o	Toplam sürtünme yüzey alanı
b	Kabul edilebilir kenar dökülmesi
d	Yoğunluk
F_s	Sürtünme kuvveti
H	Balata eninin uzunluğu
HRL	Rockwell L sertliği
ℓ	Kabul edilebilir çatlak uzunluğu
L	Kabul edilebilir ayrılma uzunluğu
m	Kütle
N	Normal (dikey) kuvvet
V	Hacim
$^{\circ}\text{C}$	Derece santigrad
μ	Sürtünme katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
SEM	Scanning Electron Microscope
TG/DTA	Thermogravimetry/Differential Thermal Analyzer
TS	Türk Standartları

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Balata kesiti.....	5
Şekil 2. 2 Farklı patentlerden alınan bileşen oranları.....	5
Şekil 2. 3 MoS ₂ ve grafitin yapısı	13
Şekil 2. 4 Yağlayıcıların TGA eğrilerinin karşılaştırılması	14
Şekil 3. 1 Uçucu kül tanelerinin SEM görüntüsü	19
Şekil 4. 1 10-15-20 MPa basınçta kalıplanan numunelerin (P10-P15-P20) aşınma miktarları.....	23
Şekil 5. 1 Kampanalı fren sistemi elemanları	26
Şekil 5. 2 Disk fren sistemi.....	27
Şekil 5. 3 Kampana ve disk fren balataları.....	27
Şekil 5. 4 Frenleme sırasında disk ve balata yüzeylerinde oluşan sıcaklık değişimi....	30
Şekil 5. 5 Çatlak	32
Şekil 5. 6 Kenar dökülmesi	32
Şekil 5. 7 Kapalı çıkıntı ve çukurlar	33
Şekil 5. 8 (1) Ayrılma, (2) yan çatlak	33
Şekil 5. 9 Platoların oluşumu ve parçalanması	36
Şekil 5. 10 Balata malzemesindeki platolar ve gerçek temas alanları	37
Şekil 6. 1 Uçucu kül ilavesinin eğme dayanımına etkisi	38
Şekil 6. 2 Uçucu kül ilavesinin elastisite modülüne etkisi	39
Şekil 6. 3 %20 hacim oranında uçucu kül içeren numunelerin sürtünme davranışı ...	39
Şekil 6. 4 İki farklı ticari fren balata malzemesinin sürtünme testi sonuçları	41
Şekil 6. 5 1 numaralı karışımın sürtünme testi sonuçları	41
Şekil 6. 6 1 numaralı karışımın sürtünme testi sonuçları	42
Şekil 6. 7 3 numaralı karışımın sürtünme testi sonuçları	43
Şekil 7. 1 Çalışmada takip edilen adımlar	46
Şekil 7. 2 Le Chatelier balonu	47
Şekil 7. 3 Mastersizer 2000E.....	49
Şekil 7. 4 Uçucu küllerin partikül boyut dağılımı grafikleri.....	50
Şekil 7. 5 Nova 4000E	52
Şekil 7. 6 Philips PW-2404	53
Şekil 7. 7 Uçucu küllerin CaO ve S+A+F oranları.....	56
Şekil 7. 8 Çatalağzı Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği	57
Şekil 7. 9 Tunçbilek Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği	57
Şekil 7. 10 Yatağan Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği.....	58

Şekil 7. 11	Kemerköy Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği	58
Şekil 7. 12	Afşin Elbistan A Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği.....	59
Şekil 7. 13	SAE J661'e göre CHASE test cihazının şeması	62
Şekil 7. 14	Kompozisyonlarda kullanılan malzemeler	65
Şekil 7. 15	Bıçaklı karıştırıcı.....	66
Şekil 7. 16	Citopress-10 laboratuvar tipi sıcak pres	66
Şekil 7. 17	Post kütleme işleminin yapıldığı Ecocell etüv	67
Şekil 7. 18	Soksilet ekstraksiyon düzeneği	67
Şekil 7. 19	Laboratuvar ölçekli numune	69
Şekil 7. 20	Afşin-Elbistan A Termik Santrali'nin uçucu külü ile üretilen numune yüzeyi	70
Şekil 7. 21	Yeniköy Termik Santrali'nin uçucu külü ile üretilen numune yüzeyi	70
Şekil 7. 22	Çatalağzı Termik Santrali'nin külleri ile üretilmiş numunenin SEM'de çekilmiş kompozisyon görüntüsü.....	70
Şekil 7. 23	Post kürlü ve kürsüz numunelerde aşınma miktarı ve küllerdeki S+A+F oranı ilişkisi	74
Şekil 7. 24	YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 optik mikroskop görüntüsü	76
Şekil 7. 25	YeAK, YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 sürtünme katsayısı değerleri.....	78
Şekil 7. 26	YeAK, YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 kütle ve kalınlıktaki aşınma değerleri.....	78
Şekil 7. 27	YeAK-2 numunesinin sürtünme davranışı.....	79
Şekil 7. 28	YeAK-3 numunesinin sürtünme davranışı.....	79
Şekil 7. 29	YeAK-4 numunesinin sürtünme davranışı.....	79
Şekil 7. 30	YeAK-2 numunesinin yorma ve toparlanma davranışı	80
Şekil 7. 31	YeAK-3 numunesinin yorma ve toparlanma davranışı	80
Şekil 7. 32	YeAK-4 numunesinin yorma ve toparlanma davranışı	81
Şekil 7. 33	YeAK-3 numunesinin aşınma yüzeyi SEM görüntüsü	81
Şekil 7. 34	YeAK-3 numunesinde çelik fiber üzerindeki aşınma izleri	82
Şekil 7. 35	YeAK-3 numunesinin aşınma yüzeyinde oluşan ikincil platolar.....	82
Şekil 7. 36	YeAK-3 numunesinin aşınma yüzeyi	83

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	ASTM C 618'e göre F ve C sınıfı uçucu küllerin özellikleri 20
Çizelge 5. 1	Fren balataları ile ilgili yerli ve yabancı standartlar 28
Çizelge 5. 2	Sürtünme katsayılarına göre balata türleri 36
Çizelge 6. 1	Uçucu külün kimyasal bileşenleri 40
Çizelge 6. 2	Hazırlanan karışımların kompozisyonları 40
Çizelge 6. 3	FA-1, FA-2, CS-1, CS-2 kompozisyonları 45
Çizelge 7. 1	Uçucu küllerin tespit edilen özgül ağırlık değerleri 48
Çizelge 7. 2	Uçucu küllerin ortalama partikül boyutları 51
Çizelge 7. 3	Uçucu küllerin yüzey alanı ve por hacmi değerleri 52
Çizelge 7. 4	Ocak 2011'de temin edilen uçucu kül numunelerinin kimyasal kompozisyonları 54
Çizelge 7. 5	Haziran 2011'de temin edilen uçucu kül numunelerinin kimyasal kompozisyonları 55
Çizelge 7. 6	Ticari balata numunelerinin kullanıldığı araçlar 60
Çizelge 7. 7	SEM-EDS ile incelenen numunelerin muhtemel kompozisyon içerikleri 60
Çizelge 7. 8	İncelenen ticari balata numunelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri 61
Çizelge 7. 9	Chase testinde kullanılan karşı yüzeyin kimyasal kompozisyonu 62
Çizelge 7. 10	SAE J661'e göre Chase test programı 63
Çizelge 7. 11	Ticari balata numunelerinin SAE J661'e göre yapılan sürtünme aşınma testleri 64
Çizelge 7. 12	Laboratuvar ölçekli numunelerin üretiminde kullanılan kompozisyon .. 68
Çizelge 7. 13	Farklı üretim parametrelerinin asetonunda çözünen madde miktarına etkisi 68
Çizelge 7. 14	Balata formülasyonlarında denenmek üzere seçilen uçucu küllerin özellikleri 71
Çizelge 7. 15	Numunelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri 72
Çizelge 7. 16	Chase testi sonuçları 73
Çizelge 7. 17	Yağlayıcı, çelik fiber ve vermikülit içeren kompozisyonlar 75
Çizelge 7. 18	YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 numunelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri 77
Çizelge 7. 19	YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 numunelerinin Chase testi sonuçları 77

OTOMOTİVDE KULLANILAN KOMPOZİT SÜRTÜNME Lİ FREN BALATALARINDA YERLİ UÇUCU KÜL KATKISININ BALATA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Emre GÜMÜŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet TOPUZ

Fren sistemleri, hareket halindeki araç hızının kontrolü açısından en önemli donanımlardan biridir. Bu yüzden fren balatalarının gerek güvenlik gerekse konfor bakımından zor şartlar altında bile yüksek mukavemet, dengeli sürtünme katsayısı, düşük aşınma oranı ve düşük gürültü gibi özelliklerinden ödün vermemesi gerekir. Ticari bir ürün olduğundan uygun maliyetle üretimlerinin gerçekleştirilmesi de söz konusudur.

Kompozit fren balatalarında bağlayıcılar, takviyeler, sürtünme düzenleyiciler ve dolgular olarak kategorize edilen farklı malzemeler kullanılır. Değişik katkı malzemesi ve karışım oranlarına göre çok sayıda deneme yapılmış, balata özelliklerinde farklı özellikler elde edilmiştir. En çok kullanılan malzemeler bağlayıcı olarak fenolik reçineler ve kauçuk; takviye olarak çelik, bakır, pirinç, aramid, potasyum titanat, kaya yünü; abrasiv olarak Fe_2O_3 , $ZrSiO_4$, SiO_2 , Al_2O_3 ; yağlayıcı olarak grafit, petrokok, MoS_2 , Sb_2S_3 ; dolgu olarak $BaSO_4$ ve $CaCO_3$ 'tür.

Özellikle son senelerde termik santrallerin atık bir malzemesi olan uçucu kül bileşimindeki SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 'ün balata formülasyonlarında kullanıldığı dikkate alınarak doğrudan balata malzemesine katılarak çevreye zararlı bir atığın maliyet azaltıcı bir şekilde kullanılmasını sağlayacak çalışmalar yapılmaktadır. Ancak her termik santralde kullanılan kömür aynı olmadığı gibi uçucu kül bileşim ve miktarları da aynı değildir.

Bu alışma kapsamında ilk olarak uçucu kül katkılı fren balatalarının testleri, standartları, formülasyonları ve üretim proses parametreleri konularında detaylı literatür incelemesi yapılmıştır. Ticari olarak kullanılan kompozit fren balatası örnekleri incelenmiştir. Yerli termik santrallerden temin edilen uçucu küllerin karakterizasyonları yapılarak balatalara katılabilecek olan kl cinsleri belirlenmiştir. Yapılan alışmalar ışığında kütlece %40-65 uçucu kül içeren formülasyonlar oluşturularak bunlardan laboratuvar ölçekli numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere fiziksel, kimyasal, mekanik testlerin yanısıra sürtünme-aşınma testleri uygulanarak en uygun formülasyon ve optimum üretim proses parametrelerine sahip balata malzemesi belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda Yeniköy Termik Santrali'nin uçucu küllerinin kütlece %50 oranında dolgu olarak kullanıldığı formülasyonların incelenen ticari balatalara en yakın sürtünme-aşınma özelliklerini sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fren balatası, sürtünme, aşınma, uçucu kül

ABSTRACT

AN INVESTIGATION OF EFFECTS OF FLY ASH ADDITIVE ON THE PROPERTIES OF AUTOMOTIVE COMPOSITE BRAKE FRICTION MATERIALS

Emre GÜMÜŞ

Department of Metallurgical and Materials Science Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet TOPUZ

Brake systems are one of the most important safety parts of vehicles for speed control. Because of this even under extreme conditions brake linings should satisfy a number of requirements such as high strength, stable coefficient of friction, low wear rate and low noise. Also it's a commercial product that can be manufactured with an acceptable price.

In composite brake friction linings, different materials which are categorized as binders, reinforcements, friction modifiers and fillers are used. For composite brake linings, a large number of different additives and mixture ratios were experimented and different properties were obtained. Most common materials used in commercial brake linings are phenolic resin, rubber as binder; steel, copper, brass, aramid, potassium titanate, lapinus as reinforcement; Fe_2O_3 , ZrSiO_4 , SiO_2 , Al_2O_3 as abrasive; graphite, petrocok, MoS_2 , Sb_2S_3 as lubricant and BaSO_4 , CaCO_3 as filler.

Recent years waste fly ash of thermal power plant that contain Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 are used brake lining compositions, studies are undertaken to ensure that adding of environmentally harmful waste to lining material used in a cost reducing way. However every power plant do not use the same coal, so compositions of fly ash are different.

In this study first a detailed literature research was made in the topics of brake linings containing fly ash, characterization, testing, standards, formulation and process

parameters. Commercial composite brake pad samples were investigated. Characterizations of fly ash samples obtained from different local power plants were made and fly ash types which can be used in the production of brake linings were identified. Formulations that contain 40-65 %wt. fly ash were developed and samples were produced in laboratory scale. Physical, mechanical, chemical and tribological tests were applied to determine the optimum formulation and production terms.

Especially formulations which include Yeniköy Power Plant's fly ash 50 %wt. as filler exhibited the closest tribological properties to commercial brake pads.

Key words: Brake lining, friction, wear, fly ash

1.1 Literatür Özeti

Yüksek performanslı frenleme için sürtünme malzemesi dengeli sürtünme katsayısı oluşturabilme, düşük aşınma hızı, çevreye zarar vermeme, hafiflik, sessizlik ve korozyon direnci gibi özellikler göstermesi gerekir. Aynı zamanda ticari bir ürün olduğunda kabul edilebilir bir maliyet dahilinde üretilebilmelidir. Tüm bu özellikler birden çok farklı bileşeni içeren bir kompozit malzeme tarafından sağlanabilir. Bu bileşenler bağlayıcılar, takviyeler, sürtünme düzenleyiciler ve dolgular olarak kategorize edilirler. Bağlayıcılar, diğer bileşenleri bir arada tutarlar. Takviye malzemeleri yapıya mekanik dayanım kazandırır. Sürtünme düzenleyiciler, abrasivler (aşındırıcılar) ve yağlayıcılar olmak üzere ikiye ayrılırlar ve sürtünme özelliklerinde belirleyicidirler. Dolgular ise maliyetin düşürülerek ticari açıdan üretilebilirliği kolaylaştırır [1].

Geçmişten günümüze kadar yüzlerce farklı malzeme ve bunların farklı varyasyonları ticari balatalarda kullanılmıştır ve hala kullanılmaktadır. En çok kullanılan malzemeler: Bağlayıcı olarak fenolik reçineler ve kauçuk; takviye olarak çelik, bakır, pirinç, aramid, potasyum titanat, kaya yünü; abrasiv olarak Fe_2O_3 , $ZrSiO_4$, SiO_2 , Al_2O_3 ; yağlayıcı olarak grafit, petrokok, MoS_2 , Sb_2S_3 ; dolgu olarak $BaSO_4$ ve $CaCO_3$. Kompozit fren balataları bu örneği verilen malzemelerin farklı oranlarda denenip farklı özelliklerin elde edilmesi ile oluşturulurlar. Bileşenlerin herhangi birinin oranındaki % 1-2'lik değişim bile frenleme performansını etkilemektedir [2].

Uçucu kül, kömürün yanması sonucu ortaya çıkan çevre kirletici bir yan üründür. Bu kömür atığı termik santrallerde üretilmektedir. Dünyadaki yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 600 milyon tondur [3].

Uçucu küller genellikle gri renklidir, aşındırıcı özellik taşırlar, ince tanelerden (1-100 μm) oluşurlar, 2-3 g/cm^3 düşük özgül ağırlığa sahiptirler ve içeriklerinde fren balatalarında kullanılan Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 gibi abrasivleri yüksek miktarlarda barındırırlar. Bu özellikler fren balatalarında kullanım için idealdir. Konu ile ilgili önceden bazı çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak Malhotra vd [4] te uçucu kül ve dip külü ilavesinin ortalama sürtünme katsayısını artırdığını bulmuşlardır. Daha sonra Filip ve Hee kütlece % 25'e kadar olan uçucu kül ilavesi ile ürettikleri numunelerin performansının birebir ölçekli testlerde orijinal balatalarinkini geçtiğini göstermişlerdir. Hee ve Filip [5] te, kütlece % 25 oranında uçucu kül içeren fren balatalarının, gerçekleştirilen otomotiv dinamometre testlerinde ticari olarak kullanılan fren balatalarının performanslarının üzerine çıktıklarını belirlemişlerdir. Bunlara dayanarak Mohanty ve Chung [6] da kütlece %50-65 uçucu kül içeren balata kompozisyonları oluşturmuşlardır. Dadkar vd. [7] de uçucu kül-kaya yünü kombinasyonu üzerinde çalışmışlar ve yüksek uçucu kül düşük kaya yünü içeren kompozit sürtünme malzemelerinin yüksek sürtünme katsayısı sağladığını ortaya çıkarmışlardır. Yapılan çalışmalar uçucu küllerin farklı takviye malzemeleri ile birlikte dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu yüksek lisans tez çalışmasında öncelikli olarak termik santrallerimizin atık malzemesi olan uçucu kül katkısı ile otomotivde kullanılan kompozit sürtünmeli fren balatalarının üretilmesi hedeflenmiştir. Üretilen balata malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin incelenmesi ve maliyeti azaltıcı unsur olarak kullanılabilirliğinin saptanması bu tez çalışmasının amacıdır.

1.3 Hipotez

Ülkemiz termik santrallerinin atık malzemesi olan uçucu kompozit sürtünmeli fren balatalarının üretiminde kullanılabilirliğinin saptanması çalışmanın temel amacını

oluşturmaktadır. Buradan hareketle katı yakıtla çalışan yerli termik santrallerden temin edilen uçucu kül örneklerinin karakterizasyon çalışmaları yapılmış, bunlardan fren balatalarında kullanılabilecek özelliklere sahip olanlar belirlenerek ticari olarak kullanılan kompozit fren balatalarınıninkine yakın özellikler sergileyebilen sürtünme malzemesi formülasyonları oluşturulmuştur.

KOMPOZİT FREN BALATALARINDA KULLANILAN MALZEMELER

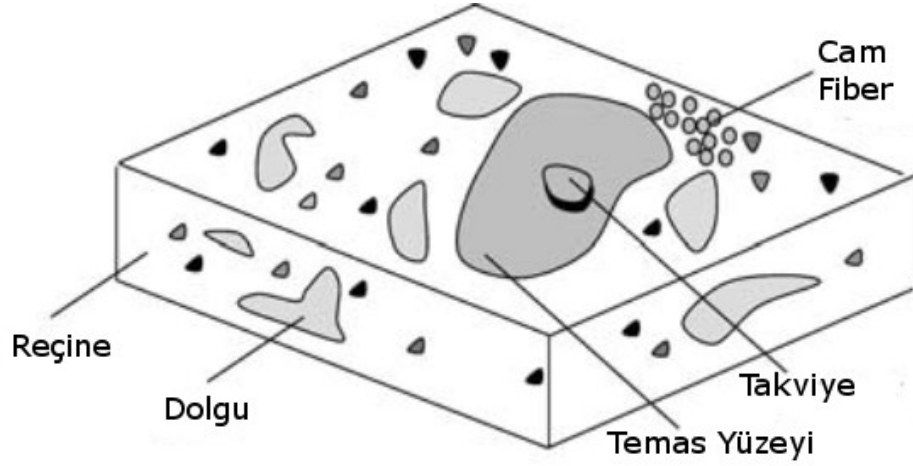
Frenlerin sürtünme ve aşınma karakteristiği seçilen malzeme kompozisyonuna bağlıdır. Çeşitli araç ve uygulamalar için bugüne kadar birçok çalışma yapılmış ve bunlar sonucunda sayısız kompozisyon elde edilmiştir. Otomotiv sektöründeki gelişmelere paralel olarak yeni malzemeler kullanılarak oluşturulan yeni kompozisyonlar ortaya çıkarken, istenilen özelliklere artık cevap veremeyen malzemelerin kullanımı ortadan kalkmaktadır.

Fren balata malzemelerinden temel olarak şu özellikleri sağlaması istenir [1]:

- Yeterli derecede sürtünme katsayısı oluşturabilmesi
- Yüksek sıcaklıklarda herhangi bir dağılma ya da kırılma gibi bir hasara uğramaması
- Sabit ve dengeli bir sürtünme katsayısı sağlaması

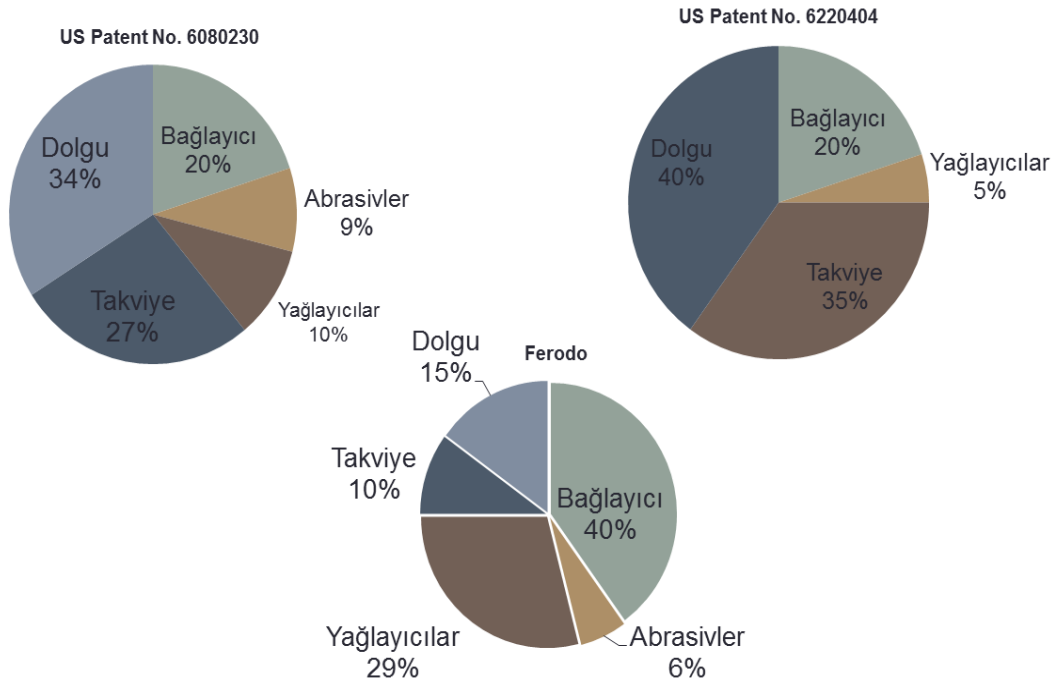
Balatalar tipik olarak 4 bileşenden oluşur.

- Sürtünme katkıları; sürtünme özelliklerinin kazandırılmasını sağlayan abrasiv ve yağlayıcılardır.
- Dolgu malzemeleri; maliyeti düşürüp üretilebilirliği artıran malzemelerdir.
- Bağlayıcılar; balata içerisindeki bileşenleri bir arada tutar.
- Takviye elemanları; mekanik dayanımı sağlar.



Şekil 2. 1 Balata kesiti [1]

Balata malzemesi tasarımları bu bileşenlerin çeşitli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bu kompozisyonlar çok farklı şekillerde olabilmektedir.



Şekil 2. 2 Farklı patentlerden alınan bileşen oranları [1]

2.1 Takviye Elemanları

Takviye elemanları, balataya mekanik dayanım kazandırır. Sürtünme sırasında uygulanan yük, takviye elemanları tarafından taşınır.

1980'lere kadar en fazla kullanılan takviye malzemesi asbestti. Bunun nedeni ucuz olması ve yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilmesidir. Ancak kanserojen etkisinin

keşfedilmesinden sonra üreticiler farklı malzeme arayışına girmişlerdir. Günümüzde asbest yerine cam, metal, aramid, potasyum titanat gibi malzemeler kullanılmaktadır.

2.1.1 Cam

Cam fiberler 1970'lerden beri takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Genellikle ucuz olduğundan E-camı tercih edilir. Reçine bağlayıcılar ile birlikte oldukça güçlü olmaktadır. Aynı zamanda ısı direnç bakımından da oldukça uygundur. Tipik cam 1430 °C ergime noktasına sahiptir ki 800-850 °C olan asbestten daha yüksektir. Fakat iletkenliği 0,04 W/mK gibi oldukça düşük bir değere sahiptir. Asbestin iletkenliği ise 0,15 W/mK'dir. Bakır gibi metalik fiberlerin iletkenliği bunlardan çok daha yüksektir. Cam gevrek olduğundan tek başına takviye malzemesi olarak kullanılamamaktadır [1].

Cam fiberin kullanıldığı balata malzemeleri üretilirken ön şekil verme işlemi sırasında problemler görülmektedir. Bunun nedeni malzemelerin kuru olmasından kaynaklanmaktadır. Problemin giderilmesi için harmanlama sonrası %3 alkollü su püskürtülmesi önerilmektedir. Ayrıca frenleme sırasında ses çıkarma problemi de görülebilmektedir. Bunun için de fenolik reçine miktarının azaltılması tavsiye edilmektedir [8].

2.1.2 Metaller

Genellikle çelik, bakır ve pirinç kullanılmaktadır. Metallerin kullanılması aşınma yüzeyindeki ısıyı emilmesi bakımından oldukça büyük bir avantaj sağlar. Bazı balatalarda okside ya da fosforize olmuş fiberler kullanılarak kırılma tokluğunun ve dayanımının artması sağlanır [8].

2.1.2.1 Çelik

Uzun fiberler takviyeyi güçlendirirken kısa fiberler ise üretim aşamasında kalıplamada kolaylık sağlamaktadır [8].

Çeliğin kullanılmasının dezavantajı korozyon direncinin diğerlerine göre düşük olmasıdır. Özellikle araç denize yakın bir bölgede uzun süre park halinde kalırsa

paslanma etkisi gözlemlenir. Bunun için balataya çinko katılarak anot görevi yapması sağlanır ve yapıdaki çeliği korur [1].

Çeliğin yüksek oranlarda kullanılması disk ya da kampana yüzeyinde aşınmaya yol açar. Sürtünme katsayısının yükselmesi ve dengeli bir sürtünme katsayısı sağlayan sürtünme filmini sıyırması da diğer dezavantajlarıdır. Österle vd. [9] da metal yüzdesinin yüksek olduğu balata malzemeleriyle yaptıkları çalışmalarda sürtünme yüzeylerindeki film oluşumu incelemişler ve metal-metal sürtünme çiftinin yüksek sürtünme katsayısı ve aşınmaya neden olduğu sonucu çıkarmışlardır.

2.1.2.2 Pirinç

Bakır-çinko alaşımı olan pirinç, balatanın ısı iletkenliğini ve yüzey basıncını yükseltmektedir [10]. Genellikle %62 Cu- %38 Zn civarındaki bileşimler kullanılır. Islak sürtünme özelliklerini geliştirir [3]. Balatada abrasiv olarak yer alan pirincin içerisindeki çinko frenleme sonrasında balata yüzeyinde ve sürtünme tabakasında yer almaz. Bunun sebebi çinkonun balata yüzeyinden diske transfer olmasıdır. Disk yüzeyi incelediğinde çinko ve oksijenin homojen bir şekilde dağılmış olduğu görülmektedir. Çinko oksit yüksek sıcaklıklarda katı bir yağlayıcı olarak görev yapar [11].

2.1.2.3 Bakır

Isıl iletkenliğinin yüksek olması nedeniyle ısı akışını kontrol etmek amacıyla tercih edilmektedir Genellikle toz halinde kullanılır. Dökme demir yüzeyinde aşınmaya neden olabilir [2].

Ayrıca bakır yüksek sıcaklıklarda ara yüzeyde bakır oksit oluşturarak sürtünme katsayısını düşük tutar. Bu yüzden, bakır veya bakır alaşımları, balatanın karşıt yüzeye karşı olan agresifliğinden sakınmak ve sürtünme değişimini kontrol etmek için eklenir [12].

Jang vd. [13] de sürtünme malzemesi içindeki metalik liflerin sürtünme karakteristikleri üzerindeki etkisini belirli bir aralıktaki kayma hızı için test etmişlerdir. Disk malzemesi olarak gri dökme demir ve balata malzemesi olarak üç farklı (Cu, çelik, Al) fiber içeren sürtünme malzemesi kullanılmıştır. Cu fiber içeren sürtünme malzemesinde kayma hızı

arttıkça sürtünme katsayısı düşmüştür ve benzer durum çelik fiberleri içeren malzeme için de geçerlidir. Diğer taraftan, Al fiber içeren sürtünme malzemesi kayma hızı ile çok küçük bir değişim göstermiştir.

2.1.2.4 Alüminyum

Alüminyum fiberler, genellikle karşı yüzey olarak alüminyum metal matrisli kompozit malzeme kullanıldığında balataya eklenir. Sürtünme malzemesi alüminyum fiber içerdiğinde bakır ve çelik yününe göre kayma hızından daha az etkilenir [13].

2.1.3 Aramid

Oldukça hafif ve dengeli ısı özellikler sergileyen aramid aynı zamanda çok iyi bir tokluk-ağırlık oranına da sahiptir. Pulp formunda kullanıldığında balata malzemesinin bileşenlerinin homojen dağılımını sağlar. Pulp, birçok ince fiberin oluşturduğu şekle denir. Aramidin diğer önemli özellikleri olarak kopma uzamasını, kolaylıkla eğilebilmesini ve karıştırma gibi yüksek kayma gerektiren işlemler sırasında uzunluğunu muhafaza etmesini gösterebiliriz. Bu da üretim sırasında kolaylık sağlamaktadır [8].

2.1.4 Potasyum Titanat

Potasyum titanat da balatalarda kullanılan bir diğer takviye malzemesidir. Yüksek derecede rafine edilmiş, 1250-1310 °C yüksek ergime noktasına sahip fiberlerdir. Fakat ne yazık ki mesothelioma denilen bir çeşit kanser türüne neden olmaktadır. Bu yüzden toz formda üretimi geliştirilerek vücuda alınması zorlaştırılarak kullanımı mümkün kılınmıştır [1].

Aramid ve potasyum titanat birlikte kullanıldığında etkileşimli olarak sürtünme stabilitesi ve aşınma direnci bakımından balataya üstün özellikler katmaktadır. Bu iki takviye malzemesi, sürtünme filminin yüzeye tutunabilme özelliğini geliştirmektedir [14].

2.1.5 Kaya Yünü

Isıl direnç yönünden oldukça dayanıklı bir malzemedir. 1000 °C'ye kadar katı halini koruyabilir. Lif halinde üretilip bağlayıcı eklenerek yün haline getirilir. Fren sesini absorbe etme yeteneğine sahiptir [12].

SiO₂ içeren, Al₂O₃ içeren ve herhangi bir abrasiv içermeyen kaya yünü takviyeli farklı balata malzemeleri ile yapılan çalışmalarda kuru koşullarda sürtünme katsayısında zamanla düşme eğiliminde olduğu gözlenmiştir [15].

2.2 Bağlayıcılar

Bağlayıcıların katılmasının amacı ısı ve mekanik gerilim altında balatanın yapısal bütünlüğünün korunmasını sağlamaktır. Bağlayıcı seçimi balatada oldukça önemlidir çünkü frenleme sırasında bağlayıcı malzemesi bütünlük sağlayamazsa yağlayıcı ya da takviye fiberleri gibi diğer bileşenler de dağılarak özelliklerini kaybederler. Bu yüzden yüksek ısı direnç göstermelidir [8].

Reçine konsantrasyonunun düşük olması fiziksel özelliklerin zayıf olmasına, yüksek konsantrasyonu ise yüksek sıcaklık dayanımının düşük olmasına neden olur. Dolayısıyla porozite ve sertlik gibi fiziksel özellikler değiştirilmek istendiğinde reçine oranı ile oynanmalıdır [16].

2.2.1 Fenolik Reçine

Fenolik reçine fren balata malzemesi olarak en sık kullanılan balata malzemesidir. Bunun nedeni ucuz ve üretilebilirliğinin kolay olmasıdır. Fenol ve formaldehitin kondensasyon reaksiyonu sonucu oluşan bir polimerdir. Farklı yüzeyleri bir arada tutarak matris malzemesi olarak davranış gösterir. Kondensasyon reaksiyonu asidik ya da alkali katalizörler kullanılarak farklı sınıflarda fenolik reçineler elde edilir. Örneğin fenolik reçine asidik katalizör kullanılarak ve yetersiz formaldehit ile reaksiyona sokularak novalak reçine elde edilir. Bu fenolik reçineler kürlendiğinde, termoplastik halden göreceli yüksek ısı dirence sahip çapraz bağlı yoğun bir termoset matrise dönüşürler. Yüksek enerjili fren uygulamalarında sıcaklık, fenolik reçineyi yüksek sıcaklık oksidasyonu ile dağıtır. Fenolik reçine yaklaşık 450 °C'de karbonize olmaktadır.

Kömürleşerek ve buharlaşarak parçalanır. Bu süreç, sürtünme malzemesinin yoğunluğunu düşürür ve ayrıca gözenekliliği yükselterek yapısal bütünlüğün kaybolmasına neden olur. Parçalanma sırasında ortaya çıkan duman insan sağlığına zararlıdır. Fenolik reçinenin diğer bir dezavantajı ise gevrek olması ve düşük darbe dayanımıdır. Bu yüzden genellikle epoksi reçine gibi tokluğu artırıcı ya da odun tozu gibi esnekliği artırıcı takviyeler yapılır. Fenolik reçinenin yüksek miktarda kullanılması sürtünme katsayısındaki dalgalanmaları artırmaktadır. Bunun nedeni düşük ısı denge göstermesidir [1].

Bağlayıcı olarak kullanılan diğer reçineler fenolik reçinedeki eksiklikleri gidermek amacıyla kullanılmaya çalışılmaktadır. Kimyasal özellikleriyle oynanarak farklı özellikte reçineler elde edilmektedir. Bu sayede raf ömrü, yüksek sıcaklık karşısında dayanım, büzülme gibi problemler ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır [17].

2.2.2 Novalak Reçine

Formaldehitin fazla miktarda fenol ile asidik koşullarda reaksiyonu ile elde edilir. Basit novalaklar, dolgu maddeleriyle birlikte ve diğer gerekli katırlarla karıştırılır ve ticari reçine eldesi için daha fazla formaldehit eklenerek ısıtılır. Bu işlemler sonucunda reçine çok miktarda çapraz bağa sahiptir fakat sıcaklık ve basınç altında halen dağılabilir. Sıcak kalıplama sonrasında ise dağılmayan bir termoset malzeme oluşur. Sert ve gevrek özellik göstermekle birlikte iyi derecede elektrik yalıtkanlığına sahiptir [18].

Sürtünme malzemelerinde genellikle novolak tipte fenolik reçineler kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı tipte olanlar en çok tercih edilenler arasındadır [12].

2.3 Dolgu Malzemeleri

Dolgu malzemeleri, maliyeti azaltmak ve üretilebilirliği artırmak için kullanılır. Diğer bileşenler kadar kritik olmasa da sürtünme malzemesinin karakteristiğinin belirlenmesinde de rol oynamaktadır. Dolgu seçimi sürtünme malzemesine göre yapılır. Örneğin frenleme sesinin yüksek olduğu balatalarda, cashew ve mika gibi ses önleyici malzemelerin oranı, baryum sülfat gibi ısı dengeleyicilerden daha fazladır.

2.3.1 Organik Dolgular

Cashew tozu yaygın olarak kullanılan organik dolgulardır. Benzer özelliklere sahip olan bu malzemeler üstün viskoelastik davranışlarından dolayı ses azaltıcı görevini üstlenirler. Cashew partikülleri yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısındaki kararsızlığı azaltabilme yeteneğine sahiptir. Ancak sürtünme yüzeyinden düşerek, geride çatlaklara dönüşen büyük gözenekler bırakırlar. Bunu önlemek için partiküller uygun bir yapışkanla kaplanır [1].

2.3.2 İnorganik Dolgular

Tipik inorganik dolgulara baryum sülfat (BaSO_4), mika, vermikulit, kalsiyum karbonat (CaCO_3) örnek verilebilir. Bu malzemeler yüksek ergime sıcaklığına sahiptirler.

Baryum sülfat, yüksek sıcaklıkta sürtünme katsayısının stabilitesini sağlar. Kalsiyum karbonat da buna alternatif olarak kullanılabilir ancak yüksek sıcaklıklarda baryum sülfat kadar performanslı değildir [16].

Mika bir diğer yaygın olarak kullanılan dolgulardandır. Düşük frekanslı frenleme sesinin önlenmesinde işe yarar. Vermikülit de aynı işlevi görür. Ancak yüksek sıcaklıktaki aşınma direnci iyi değildir.

Molibden trioksit, ısıl zayıflamayı önler. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda çatlamları da önler. Alkali metal titanatlar, sürtünme katsayısının stabilitesini artırır [1].

$\text{Ca}(\text{OH})_2$, demir katkılı balatalarda korozyon direncini sağlar. ZnO , aşınma direncini artırır ve kampana yüzeyini temizler. MgO , ise aşınmayı ve sürtünme katsayısını artırır [2].

2.4 Sürtünme Katkıları

Sürtünme katkıları balataya sürtünme katsayısını ve aşınma hızını kontrol etmek için katılırlar. Temelde iki kategoride toplanırlar:

- Yağlayıcılar; sürtünme katsayısını ve aşınma hızını düşürür.
- Abrasivler; sürtünme katsayısını ve aşınma hızını yükseltir.

Sürtünme katkıları, balata malzemesinin sürtünme karakteristiğini önemli ölçüde etkiler. Yağlayıcı oranının artması sürtünme katsayısının daha dengeli olmasını sağlar. Abrasiv miktarı arttıkça da sürtünme katsayısı artmasına rağmen dengesizleşmektedir. Bu yüzden istenen özellikleri sağlayan dengeli bir kompozisyon elde etmek son derece önemlidir.

2.4.1 Abrasivler

Abrasivler sürtünme katsayısını artırmasının yanında kaçınılmaz olarak aşınma hızını da artırır. Yüksek abrasiv içeriğine sahip balatalarda sürtünme katsayısı dengesizleşir. Karşı yüzeydeki demir oksitleri koparılır. Abrasivler genelde metal oksit ve silikatlar gibi sert partiküllerdir [3].

2.4.1.1 $ZrSiO_4$

Zirkonyum silikat ($ZrSiO_4$) sürtünme torku üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek miktarlarda kullanılması önceden de bahsedildiği gibi sürtünme katsayısını dengesizleştirir. Bu durum sürtünme tabakasının kalkmasına neden olduğundan istenmez [16].

2.4.1.2 Al_2O_3

Ergime noktası ($2050\text{ }^{\circ}\text{C}$) yüksek olan kararlı bir oksittir. Mohs Sertliği 9 civarındadır. Hidrat formu aşınma direnci sağlarken, anhidrat formu ise aşındırıcı özellik göstermektedir [19].

2.4.1.3 SiO_2

Orta derecede aşındırıcıdır. Ucuz olmasından dolayı sıkça kullanılmaktadır [2].

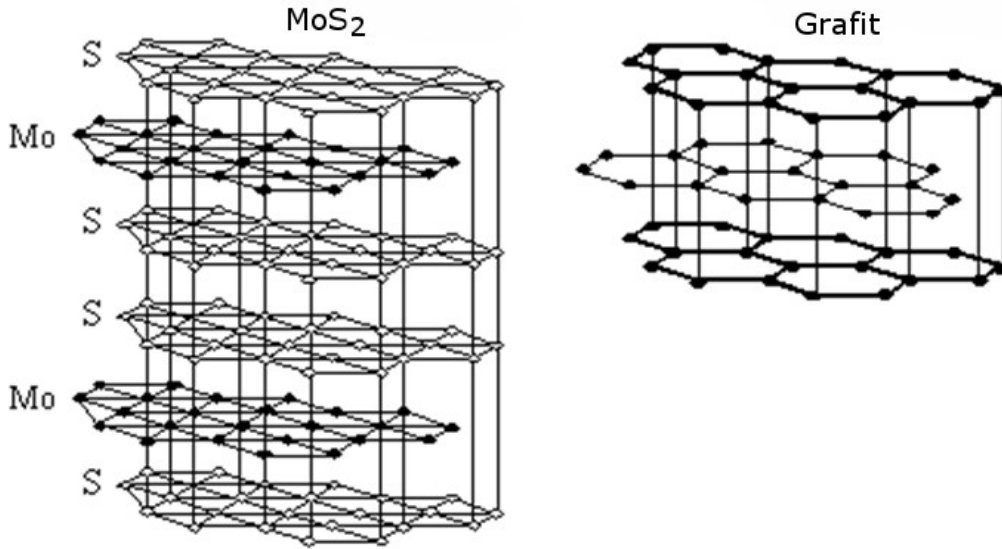
2.4.1.4 Demir Oksitler

Hematit (Fe_2O_3) ve manyetit (Fe_3O_4) az aşındırıcı özellik göstermektedir. Bunun yanında manyetit, sürtünme malzemesinin soğuk sürtünme yeteneğini geliştirdiğinden sürtünme düzenleyici olarak da görev yapar [2].

2.4.2 Yağlayıcılar

Yağlayıcıların temel amacı frenleme süresince sürtünme katsayısının kararlı halde kalmasını sağlamaktır. Grafit, molibden disülfid, antimon trisülfid, bakır sülfid, kalsiyum florit geleneksel fren balatalarında en çok kullanılan katı yağlayıcılardandır. Katı yağlayıcıların sürtünme yüzeyi üzerinde film oluşturarak yüzeyler arası aşınma kontrolünü sağlama, titreşim sönümleme ve sürtünme katsayısını stabilize etme gibi özellikleri vardır.

Tabakalı kafes yapısı sayesinde (Şekil 2.3) kayma özellikleri oldukça gelişmiştir. Bu kayma her bir katı yağlayıcı partikülün birleşip yüzeylere yapışan devamlı, kristalografik olarak yönlenmiş ince bir film oluşturması şeklinde gözlemlenir [20].



Şekil 2. 3 MoS₂ ve grafitin yapısı [20]

2.4.2.1 Grafit

Grafit, yaygın olarak kullanılan yağlayıcılardandır. Doğal ya da sentetik esaslı olarak kullanılan grafit, pul ya da toz halindedir. Pul şeklindekiler gelişmiş yağlayıcı özellik gösterirken, toz halinde olanlar frenleme sırasında oluşan ısıyı daha etkili bir biçimde yayabilme kabiliyetine sahiptirler [1].

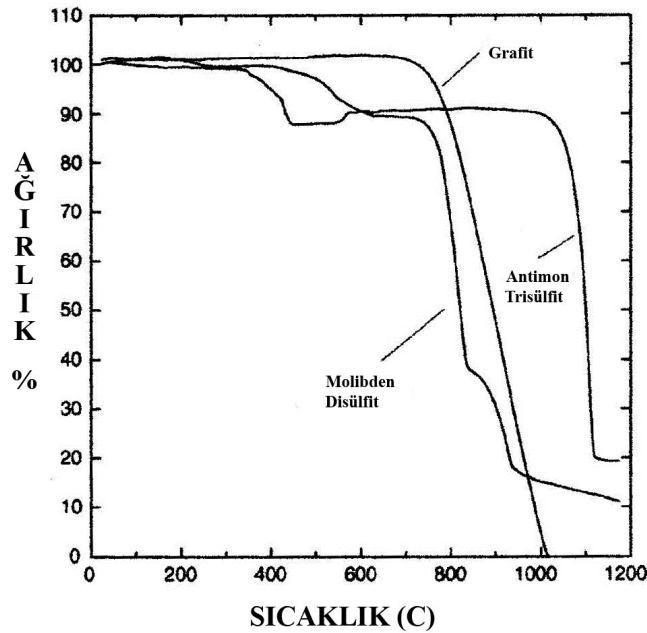
2.4.2.2 Sb_2S_3

Antimon trisülfid gibi metal sülfidler grafit kadar iyi yağlayıcılar olması ve daha düşük ısı iletkenlik özellikleri nedeniyle popüler olmuşlardır. Ancak antimon trisülfid ergime noktası olan 550 °C'ye çıkıldığında malzemenin gözenekliliğinde artışa ve kayma dayanımında düşüşe neden olmaktadır. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalarda antimon trisülfidin kanserojen olduğu yönünde bulgular elde edilmiştir. Frenleme sırasında antimon yapıdan ayrılarak ince toz zerrecikleri halinde havaya karışırken bunun bir kısmı da oksijenle birleşerek Sb_2O_3 oluşturmaktadır. Sb_2O_3 'ün fizyolojik sıvılarda çözünmediği saptanmıştır [16].

2.4.2.3 MoS_2

MoS_2 de yaygın olarak kullanılan bir diğer yağlayıcıdır. İnsan sağlığına herhangi bir negatif etkisi bulunmamıştır. Üstün yağlayıcı özelliklere sahip olmasının en büyük nedeni sürtünme yüzeyinde kararlı ve devamlı bir film oluşturabilmesidir. Frenleme performansında gösterdiği optimum özellikler nedeniyle fren balatalarında kullanılabilmeyi mümkün kılmaktadır [21].

Yağlayıcılar, yüksek sıcaklıklarda da bozulmadan görevlerini yerine getirebilmeleri gerekir.



Şekil 2. 4 Yağlayıcıların TGA eğrilerinin karşılaştırılması [22]

Şekil 2.4'teki TGA eğrileri katı yağlayıcıların ağırlığını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Eğrilerden görüldüğü gibi MoS₂ iki farklı sıcaklık değerinde keskin düşüşler göstermektedir. 540 °C'de MoS₂ oksitlenerek MoO₃ formuna dönüşmektedir. Yaklaşık 700 °C'ye gelindiğinde ise oksitlenme devam ederek ağırlıkta ani azalmalara neden olmaktadır. Eğriler bize katı yağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda beklenmedik davranışlar sergilediğinin bir göstergesidir. Bu durum esas frenleme koşullarında farklı sıcaklıklarda da ortaya çıkabilir. Nedeni ise yukarıda belirtildiği gibi bölgesel olarak anlık sıcaklık değerlerinin daha yüksek olmasıdır [22].

2.4.2.4 Kok

Genellikle balatalarda petrokok türü kullanılmaktadır. Balatanın aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi ve sürtünme katsayısının kontrolü açısından önemli bir bileşendir. %5-10 oranında balata bileşimlerine katılır. Grafit ile birlikte kullanıldığında düşük maliyette yüksek tribolojik özellikler elde edilebilmektedir. Kok oranı yüksek değerlerde olursa sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı kararsız bir değişim sergileyerek aşınmanın artmasına neden olabilir [12].

2.4.2.5 ZnS

Yüksek yük ve sıcaklık şartları için kullanımı tercih edilen düşük fiyatlı bir katı yağlayıcı malzemedir [2].

BÖLÜM 3

UÇUCU KÜLLER

Uçucu kül termik santrallerde baca gazı filtrasyonu sonucunda elde edilen temel yapısını hafif metal oksitlerin oluşturduğu bir endüstriyel atıktır. Özellikle büyük termik santrallerde çok fazla miktarlarda elde edilmektedir [23]. Dünya genelinde yıllık üretimi 600 milyon tonu bulmaktadır [3].

Uçucu kül, düşük kalorili ve endüstride yakıt olarak kullanılmayan kömürlerin, toz haline getirilerek yakılması sonucu, bacadan çıkan gazla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Çok hafif olan bu uçucu küller, bacanın üst kısmında elektrofiltre veya siklon adı verilen toz tutucularda elektrostatik tutucuların alt kısmında bunkerlerde biriktirilir ve periyodik olarak santral dışına alınırlar. Baca gazları ile sürüklenen ve hava ile temas ederek ani soğuma ile puzolanik özellik kazanan uçucu küllerin boyutları yaklaşık 1-100 μm arasında olup, aglomere ve küresel tanecikler şeklinde yapıya sahiptir. Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Zamanla biriken küller geniş alanları kapsamaya başlar ve santral idaresi için bir problem olur [24].

Türkiye'de halen Afşin-Elbistan A ve B, Çan, Çatalağzı, Çayırhan, Çolakoğlu 2, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma A ve B, Sugözü - İskenderun, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 15 termik santral faaliyet göstermektedir. Çatalağzı, Çolakoğlu, ve Sugözü-İskenderun termik santralleri haricindeki bütün santraller linyit kömürü ile çalışmaktadır [25].

2006 yılı verilerine termik santraller yıllık 16 milyon tonluk uçucu kül üretilmektedir [26]. Uçucu kül, çeşitli alanlarda kullanılarak üreticiler ve kullanıcılar için ekonomik avantaj sağlamaktadır. Böylelikle çevreye zararlı olan atık bir madde değerlendirilmiş olur.

Aşağıdaki maddelerde verilen alanlarda yeniden değerlendirilmeleri gerçekleşmektedir.

- Tuğla üretiminde,
- Çimento ve beton üretiminde,
- Seramik ve cam üretiminde,
- Hafif agrega üretiminde,
- Yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda,
- Gaz beton üretiminde,
- Harç yapımında,
- Çözeltilerden fosfatın uzaklaştırılmasında,
- Döküm kumu olarak,
- Maden ocaklarında filtre olarak,
- Yalıtım malzemesi olarak,
- Metal yüzeylerinin püskürtme ile temizlenmesinde,
- Metal ya da plastik matrisli kompozit malzeme üretiminde.

3.1 Uçucu Küllerin Özellikleri

Yeniden değerlendirme bakımından oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan uçucu küllerin başta morfolojik ve kimyasal özellikleri olmak üzere tane boyutu, özgül ağırlık, karbon miktarı gibi değerleri tespit edilerek karakterizasyonları yapılmalıdır.

3.1.1 Görünüş

Uçucu küller, açık ve koyu gri ile siyah arasındaki renklere sahiptir. Külün karbon, demir ve nem miktarı küllerin renklerini etkilemektedir. Linyit kömürü uçucu külleri, taş kömürü uçucu küllerinden daha koyudur. İyi yanmış uçucu küller, iyi yanmamış küllerden daha açık renktedir. İyi yanmamış küllerin koyu rengi, yapılarında mevcut yanmamış karbondan ileri gelmektedir [24].

3.1.2 Tane Boyutu

Genel olarak tane boyutları 1-100 μm , özgül yüzeyleri ise 0,1 – 0,5 m^2/gr arasındadır [24]. Uçucu külün tane boyutu termik santralde kullanılan kömürün öğütölme derecesi belirler. Ayrıca bacadan kaçan ince kül miktarı arttıkça doğal olarak toplanan kömürün de inceliği artar. Taş kömürü uçucu külü linyit uçucu külünden, elektrofiltrelerde toplanan uçucu küller de siklonlarda toplananlardan daha incedir [27].

3.1.3 Özgül Ağırlık

Yoğunluk, tane boyutu ve külün minerolojik yapısına bağlı olarak değişmektedir. İçi dolu küresel taneler içeren uçucu küller, süngerimsi yapıda olanlardan daha yüksek yoğunluğa sahiptir [27].

Uçucu küllerin ortalama özgül ağırlıkları 2,15 g/cm^3 'tür. Ancak küldeki kuvars, alumina, demir ve karbon miktarları özgül ağırlığı değiştirmektedir. Örneğin, uçucu külün demir miktarı arttıkça özgül ağırlığı artmaktadır. Ayrıca, uçucu küllerin içerisinde değişik özgül ağırlıklara sahip farklı tanelerde bulunabilmektedir [24].

3.1.4 Karbon Miktarı

Uçucu küllerdeki karbon, yanıcı olmayan tanelerin yüzeyi üzerinde ince karbon tabakası veya taneler olarak bulunmaktadır. Uçucu küllerdeki karbon tanelerinin tane boyutu çoğu zaman diğer tanelerden daha büyüktür. Genellikle yüksek verimle yanmanın gerçekleştiği termik santrallerde oluşan uçucu küllerin karbon miktarı düşüktür. Eski santrallerde %10 iken, yeni santrallerde %3'e kadar düşmüştür [24].

3.1.5 Kimyasal Bileşim

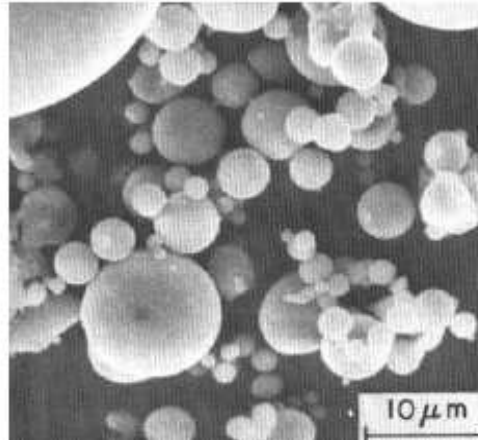
Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, diğerleri SO_3 , MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon ve bunun yanısıra titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir. Genelde bir taş kömürü uçucu külü, linyit uçucu külünden daha fazla toprak alkali metalleri içermektedir [24].

3.1.6 Morfolojik Özellikler

Santralde kullanılan kömürün özelliklerine göre uçucu külün tane şekli ve boyut dağılımı da değişiklik göstermektedir. Bunun yanında yanmanın olabildiğince uniform olması ve toz toplama sistemi de etkili olmaktadır.

Uçucu külün tane şekli, yuvarlaktır ve çapları, 1-200 μm arasında değişir. Taneciklerin yaklaşık % 75'inin çapı 45 μm 'den, % 50'den çoğu ise 20 μm 'den daha küçüktür [25].

Yüksek kireçli küllerde, mikroyapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir [24].



Şekil 3. 1 Uçucu kül tanelerinin SEM görüntüsü [25]

3.2 Sınıflandırma

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, ülkemizde genellikle ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır. Birçok ülke standardında uçucu küllerin sınıflandırılması yer almamakla birlikte, ASTM C 618 [28] nolu standard, uçucu külleri N, F ve C olarak sınıflandırmaktadır.

F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanısıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler. N sınıfı küllerin F sınıfı küllerden farkı SO_3 miktarının en yüksek %5 yerine %3 olmasıdır [29], [28].

Çizelge 3. 1 ASTM C 618'e göre F ve C sınıfı uçucu küllerin özellikleri [28]

Sınıf	Özellik
F Sınıfı	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$; Antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmekte; Puzolanik özeliğe sahip
C Sınıfı	$\%70 > \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$; Linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilmekte; Puzolanik özeliğin yanısıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özeliğe sahip.

TS EN 197-I [51] a göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar:

V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.

W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir.

KOMPOZİT FREN BALATALARININ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kompozit fren balatalarının üretimi karıştırma, kalıplama ve kütleme işlemleri ile gerçekleştirilir.

4.1 Karıştırma

Kompozit balata malzemesi farklı bileşenler içerdiğinden, bunların yapıya olabildiğince homojen dağıtılarak istenen özelliklerin sürtünme malzemesinin her yanında sağlanması gerekir. Ancak etkili bir karıştırma işlemi sayesinde farklı özelliklere sahip malzemeler bu özelliklerini yitirmeden balata malzemesi üretilebilir.

Kompozit üretiminde karşılaşılan en büyük problem, takviye elemanının matris içerisindeki homojen dağılımını sağlamak ve takviye malzemesi ile matris ara yüzey bağını artırmaktır. Karıştırma şekli ve süresi, takviye elemanının matris içerisindeki dağılımını, tozların boyutunu ve diğer bazı özelliklerini belirlemede etkili olmaktadır. Karıştırma işlemi segregasyonu önlemek açısından çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Segregasyonu önlemek için karışıma genellikle yağlayıcı (grafit gibi) eklenir ve düşük viskoziteye sahip olan toz veya sıvı (sıvı reçine gibi) komponentlerin homojen karışması için karıştırıcı kollar ile kesici bıçakların birlikte karıştırma işlemini gerçekleştirmesi gerekir [30].

Karıştırma işleminde performansa etki eden en önemli parametrelerden biri de karıştırma süresidir. Sugözü ve Mutlu [30] da karıştırma süresi ile ilgili yaptıkları çalışmada polimer matrisli fren balata malzemelerinin içeriğini oluşturan bileşenlerin toz karıştırma süresinin sürtünme performansı bakımından önemli olduğu sonucunu ortaya çıkarmışlardır. Gereğinden az karıştırma süresi homojen yapı oluşturmada

yetersiz kalıp sürtünme katsayısı ve aşınma miktarında olumsuz sonuçlara yol açmaktadır.

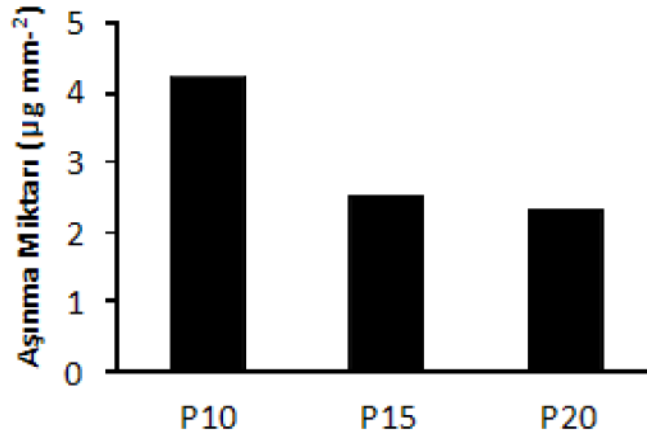
4.2 Kalıplama

Karıştırma sonrası homojen bir dağılım kazandırılan toz karışımı, hidrolik ya da mekanik bir pres yardımıyla kalıp içerisinde sıkıştırılarak yoğunluk kazandırılır. Tek yönlü sıkıştırma söz konusudur.

Kalıplama işlemi sürtünme malzemesinin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden kullanılan basınç ve sıcaklık malzemeye göre ayarlanmalıdır.

Genellikle 140-250 °C sıcaklık aralığında yapılan işlem balata malzemesine esas olarak yoğunluğunun kazandırıldığı aşamadır. Son boyutlara yakın hatlar oluşmaktadır [32].

Sugözü vd. [31] de yaptıkları çalışmada, sıcak şekillendirme sırasında uygulanan basıncın, balata malzemesinin sürtünme özelliklerine etkisini araştırmışlardır. 10-15-20 MPa basınç değerlerinin uygulandığı numunelerde en yüksek yoğunluk değerine 20 MPa basınç değeri ile ulaşılmıştır. Bunun yanında 10 MPa basınç uygulanan numunenin aşınma değeri diğer iki numuneye göre oldukça fazladır.



Şekil 4. 1 10-15-20 MPa basınçta kalıplanan numunelerin (P10-P15-P20) aşınma miktarları [31]

4.3 Kurlleme

Genellikle, fren balatalarında kullanılan reçineler için kür koşulları reçine üreticileri tarafından verilir. Bununla birlikte kalıplama ve ısı davranışı fren balatasının içindeki

bileşenlerin miktarı ve tipini içeren uygun tribolojik ve fiziksel özellikler meydana getirecek şekilde düzenlenmiştir. Çünkü bir balatanın fiziksel ve tribolojik özellikleri balatada bulunan bağlayıcı reçine ve diğer bileşenler arasındaki reaksiyonlar sonucunda değişmektedir [32].

OTOMOTİVDE KULLANILAN FREN SİSTEMLERİ VE BALATALARDAN İSTENEN ÖZELLİKLER

Hareket halindeki araç gerektiğinde durdurulamazsa can ve mal kayıplarına yol açabilecek kazalar gerçekleşebilir. Bu nedenle fren sistemi aracın güvenli bir şekilde kullanılması için en önemli donanımdır. Frenleme sırasında aracın kinetik enerjisi sürtünmeden dolayı ısı enerjisine çevrilir. Bu malzemelerde, ısıya iyi dayanım, aşınmaya karşı direnç ve sürekli sürtünme katsayısı özellikleri aranır.

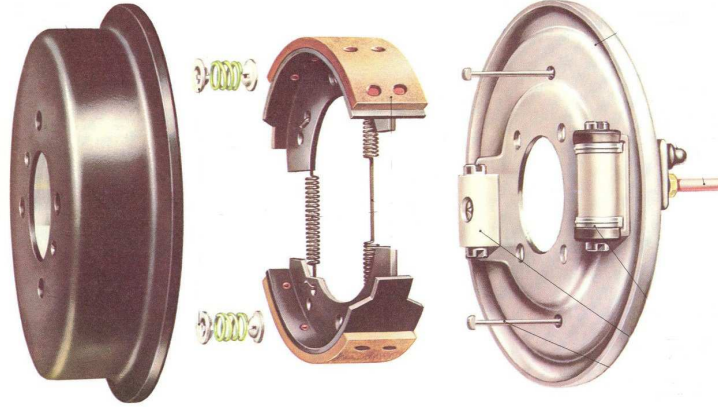
5.1 Fren Sistemleri

Sürtünmeli fren sistemleri, sürtünen yüzeylere sahip sabit ve dönen elemandan oluşmaktadır. Sabit kısmın sürtünen yüzey malzemesi genellikle balata olup çok çeşitli malzemelerin bileşiminden yapılmaktadır. Döner kısım ise günümüz araçlarında tekerlekle bağlantılıdır ve balatayla istenen değerde sürtünme katsayısı oluşturacak malzemeden seçilir. Bu iki kısmın oluşturduğu malzeme çiftinin sürtünme katsayısı, frenlemede önemli rol oynamaktadır.

Sürtünmeli fren sistemi iki farklı tipte geliştirilmiştir. Bunlar iç yüzeyde sürtünme ile frenlemeyi sağlayan kampanalı frenler ve dış yüzeyde sürtünme ile frenlemeyi sağlayan disk frenlerdir.

5.1.1 Kampanalı Fren Sistemleri

Fren kampanası üstü düz olan bir silindir şeklindedir. Fren yapıldığında pabuç tarafından desteklenen balatalar kampananın iç yüzeyine sürtünerek tekerleklerin dönüşünü yavaşlatarak frenlemeyi sağlar.



Şekil 5. 1 Kampanalı fren sistemi elemanları [33]

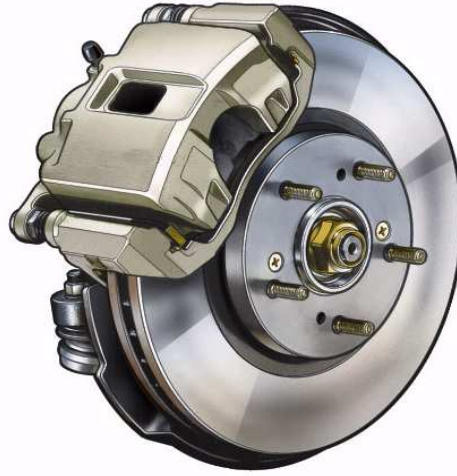
Şekil 5.1’de görülen kampanalı fren düzeneğine baktığımızda sistem birçok parçadan oluşmaktadır. Sabit duran fren tablasına fren pabuçları ile fren sistemine bağlı olarak bir veya iki tekerlek silindiri monte edilmektedir. Fren pedalının tesiri ile merkez pompasında meydana getirilen hidrolik basınç tekerlek silindiri üzerinden fren pabuçlarına iletilir. Tekerlek silindirindeki basınç ile pabuçlar üzerindeki balatalar tekerleğe bağlı bulunan dönen tamburun içine sürtünmeye başlar. Meydana gelen sürtünme ile hareket durumuna bağlı olarak aracın frenlenmesi sağlanır. Fren olayının bitiminde geri çekme yayları fren pabuçlarını ve tekerlek silindirleri pistonlarını geriye başlangıç durumuna getirirler.

Kampanalı fren sisteminin en büyük dezavantajlarından biri, uzun süreli frenleme sonrasında ısınma nedeniyle balataların kampanaya yeterince temas edememesi sonucunda fren performansının azalmasıdır. Zira kampanada ısı oluşumu nedeniyle genleşme olmaktadır. Bu durum frenlemenin azalması anlamına gelmektedir. Kampananın soğutulması ile fren performansı düzelmektedir [34].

5.1.2 Disk Fren Sistemleri

Fren pedalına basıldığında merkez silindirinden gelen basınçlı hidrolik kalipere geçerek silindirin içerisine dolar. Pistonlara itme kuvveti uygulayarak pistonları açar. Pistonlar

pabuçları ve üzerlerindeki balataları diske doğru iterler ve diski sıkmaya çalışır. Böylece disk iki pabuç arasında sıkıştırılarak frenleme sağlanır.



Şekil 5. 2 Disk fren sistemi [52]

Tasarım olarak daha basittirler. Tasarımları gereği kampanalara göre daha çabuk soğumalar ve böylece aşırı ısınmaya karşı daha toleranslı sistemlerdir. Çabuk soğumalarının sebebi havalandırma kanallarının olmasıdır. Kampanalarda ise havalandırma kanalları yoktur.



Şekil 5. 3 Kampana ve disk fren balataları

5.2 Fren Balatalarından İstenen Özellikler

Frenlemenin yüksek verimle gerçekleştirilebilmesi için balata malzemesinin belirli şartları sağlaması gerekir. Bu yüzden malzeme seçimi ve üretim koşulları büyük önem arz etmektedir. Belirli standartlar dahilinde balatalar testlere tabi tutularak üretilen balataların servis şartlarına uygun olup olmadığı anlaşılabilmektedir.

Fren balataları temel olarak şu gereksinimleri sağlamalıdır [35]:

- Maksimum sürtünme katsayısı
- Dengeli bir sürtünme katsayısı
- Balatada minimum aşınma
- Diskte minimum aşınma
- Titreşimlere karşı dengeli olabilme
- Düşük üretim maliyeti

Karayolu taşıtlarının fren sistemleri için üretilmiş sürtünmeli fren balatalarının ısı özellikleri, mekanik özellikleri, korozyon özellikleri, yoğunluğu, sürtünme ve aşınma özellikleri frenleme performansını etkileyen en önemli unsurlardır. Bu unsurların testi ve hangi değer aralıklarında olması gerektiği Çizelge 5.1’de gösterilen standartlarda verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Fren balataları ile ilgili bazı yerli ve yabancı standartlar

Standart No	Standart Adı
TS 555	Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri- Balatalar- Sürtünmeli Frenler İçin
TS 7963	Karayolu Taşıtları-Sürtünmeli Frenler-Balatalar-Deney Metotları- Sıkıştırılabilirlik
TS 7964	Karayolu Taşıtları-Sürtünmeli Frenler - Balatalar - Deney Metotları - Kesme Deneyi
TS 7965	Karayolu Taşıtları-Sürtünmeli Frenler-Balatalar-Deney Metotları- Korozyon Sebebiyle Demir Yüzeylere Tutunma
TS 9073	Karayolu Taşıtları- Fren Sistemleri- Fren Balataları- İç Kesme Mukavemeti Deneyi
TS 9074	Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Fren Balataları-Disk Balataların Biçim ve Boyutları Üzerindeki Isı Etkisinin Tayini Deneyi
TS 9075	Karayolu Taşıtları- Fren Sistemleri- Fren Balataları- Su, Tuzlu Su, Yağ ve Fren Sıvısına Dayanım Deneyi
TS 9076	Karayolu Taşıtları- Fren Sistemleri- Fren Balataları- Malzeme Sürtünme Özelliklerinin Küçük Deney Parçaları ile Değerlendirilmesi
TS 9077	Karayolu Taşıtları- Fren Sistemleri- Fren Balataları- Isıl İletkenliğinin Tayini- Korumalı Sıcak Plaka Cihazları İle
GB 5763	Otomobiller İçin Fren Balataları
SAE J661	Fren Balata Kalite Kontrol Test Prosedürü

5.2.1 Yoğunluk

Yoğunluk, özellikle toz metalurjisi ile üretilen parçalarda yapısal bütünlüğün sağlanması açısından üretimde kontrol edilmesi gereken en önemli parametredir. Üretim sırasındaki presleme basıncı ve malzemeyi oluşturan bileşenlerin partikül özellikleri yoğunluğa doğrudan etki etmektedir. Yoğunluğun yüksek olması, yapısal bütünlüğü sağladığından balatanın fiziksel dayanımını da artırmaktadır [20].

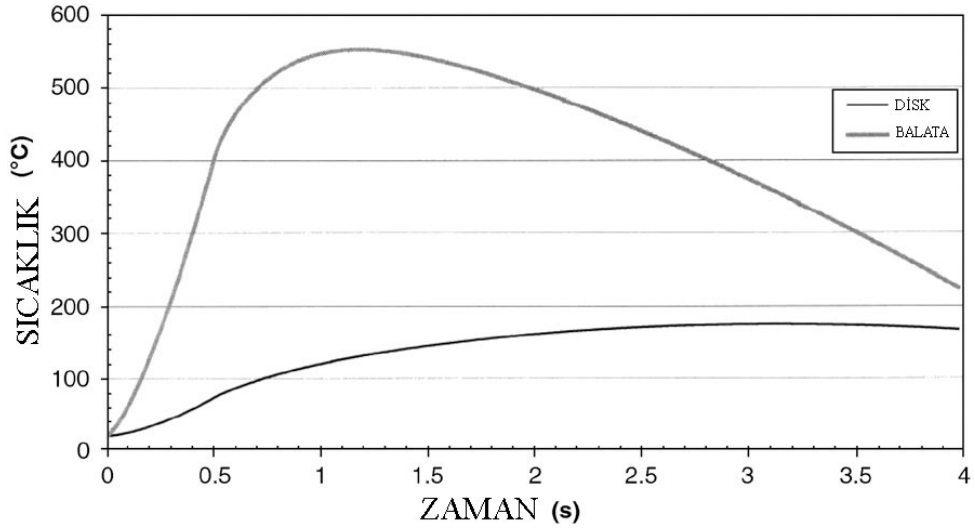
Yoğunluk ve gözeneklilik birbiri ile doğrudan ilişkilidir. Toz metalurjik parçaların yoğunluğunun artırılması, gözenekliliği azaltır. Genel olarak fren malzemelerinde %5-10 arasındaki porozite değerleri normaldir [2].

5.2.2 Isıl Özellikler

Balataların ısıl özellikleri ve frenleme sırasında yükselen sıcaklık karşısında malzeme davranışları, üzerinde en fazla çalışılan konulardan biridir.

Yüksek sıcaklıklarda balata malzemelerin aşınma oranında önemli artışlar olduğu görülmüştür. Bu artışın sebebi ilk oksit tabakasından sonra, temiz yüzeyin yeniden oksitlenmesi ve yüzeyden oksit tabakasının yeniden kalkması sebebiyledir. Sıcaklık ve dönme hızının artması ile yüksek aşınmadan düşük aşınmaya ve arkasından yüksek aşınmaya gidip geldiği gözlemlenmiştir.

Frenleme sırasında sürtünme yoluyla hareket enerjisinden dönüştürülen ısı enerjisi olabildiğince hızlı olarak tüm yapıya dağıtılmalı ve dışarı atılabilmelidir. Sıcaklığın yükselmesi balata bileşenlerine bağlı olarak sürtünme katsayısını dengesizleştirir ve frenleme performansını düşürür. Bu yüzden balata malzemesinin sıcaklığı kolay kolay yükselmemeli ve kararlı kalabildiği sıcaklık aralığı geniş olmalıdır [36].



Şekil 5. 4 Frenleme sırasında disk ve balata yüzeylerinde oluşan sıcaklık değişimi [37]

Isıl iletkenlik katsayısı, frenleme sırasında ortaya çıkan ısıнын atmosfere yayılması bakımından oldukça önemlidir. Arabalarda frenleme sırasında oluşan güç 500 W/cm²'ye kadar çıkabilmektedir. Sürtünme ara yüzeyinde meydana gelen kütleel sıcaklık 300 °C olmasına rağmen anlık sıcaklık yükselmeleri 1200 °C'yi bulabilmektedir [38].

Ara yüzeydeki ısı birikimin önlenerek balatanın tamamına yayılması ve oradan da atmosfere iletilmesi gerekir. Aksi taktirde ara yüzeydeki ısı birikimi sonucu yükselen sıcaklık, balata bileşenlerini olumsuz yönde etkileyerek kimyasal dönüşümlere neden olmakta ve bu da sürtünme malzemesinin görevini yapamaz hale gelmesine neden olur. Bu durum frenleme işlemini olumsuz yönde etkiler ve zayıflamaya neden olur. Buna yorulma ya da zayıflama (fade) denir. Ayrıca frenleme sırasında yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi disk ve balatalarda sıcaklık gradyanı da meydana gelmektedir. Balata sıcaklığı diskten daha fazladır. Bu durumda balata ve diskte ısı yorulma söz konusudur [37].

5.2.2.1 Yanma Kaybı

Balata malzemesinin yüksek sıcaklığa maruz kaldığında, kütleindeki değişim yanma kaybı ile ifade edilir. 825 ± 24 °C'de 2 saat bekletme şartlarına göre kütle kaybı belirlenir. Organik içerik ile doğru orantılıdır. TS 555 [39] de belirtilen koşullar dahilinde deney yapılır.

5.2.3 Mekanik Özellikler

Servis koşullarında balatalar, basma ve kesme zorlamalarına maruz kalmaktadır. Bu yüzden parçalanarak hasara uğramadan bütünlüğünü korumaları açısından kullanım yerine göre belli mukavemet değerlerini sağlamalıdır.

5.2.3.1 Sertlik

Sertlik, balata bileşenleri ile doğrudan ilişkilidir. Balatayı oluşturan bileşenlerin sertliği ile doğru orantılı olarak artmaktadır ancak üretim sırasında ulaşılan yoğunluk da sertliği etkileyen önemli parametreler arasındadır. Yoğunluk artışı sertliği de beraberinde getirir.

Yumuşak sürtünme malzemesi, beraberinde iyi bir sürtünme katsayısı getirmesine rağmen kısa ömürlü olur. Sert seramik ya da metalik balatalarda nispeten düşük sürtünme katsayısına rağmen yüksek aşınma direnci bir avantajdır. Sertliğin artması balatanın aşınma değerini düşürür fakat burada karşı sürtünme malzemesinin de aşınma değerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Aksi taktirde çok yüksek sertlik değerlerinde üretilen balatalar fren diskinin ya da kampananın aşınmasına neden olur [37]. Sertlik ölçümü TS 555'e göre Brinell (A, B ve C skalaları) ya da Rockwell (R, L, M, P ve K skalaları) metodlarıyla yapılır.

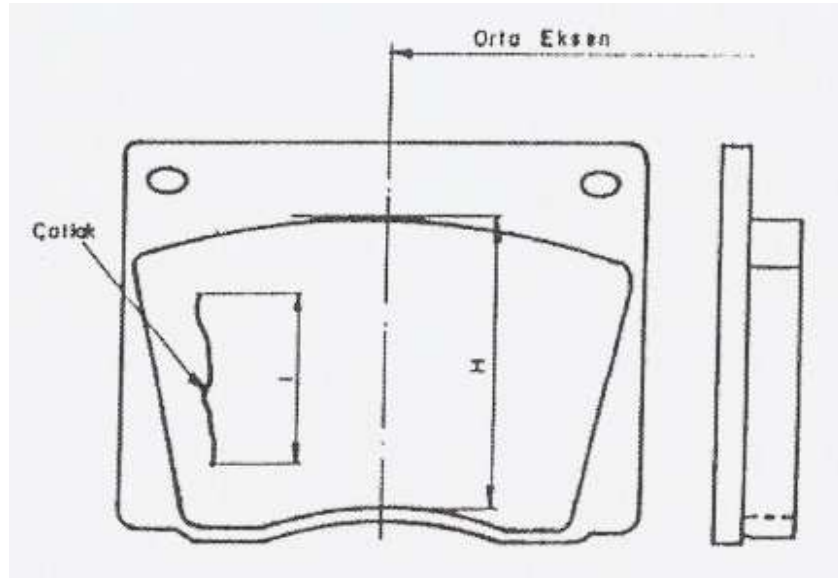
5.2.3.2 İç Kesme Dayanımı

İç kesme dayanımı, kesme kuvvetinin gerilmeye maruz kalmış alana oranıdır. TS 9073 [40] a göre yapılan deney sonuçları önceden belirtilen değer ve toleranslara uygun olmalıdır.

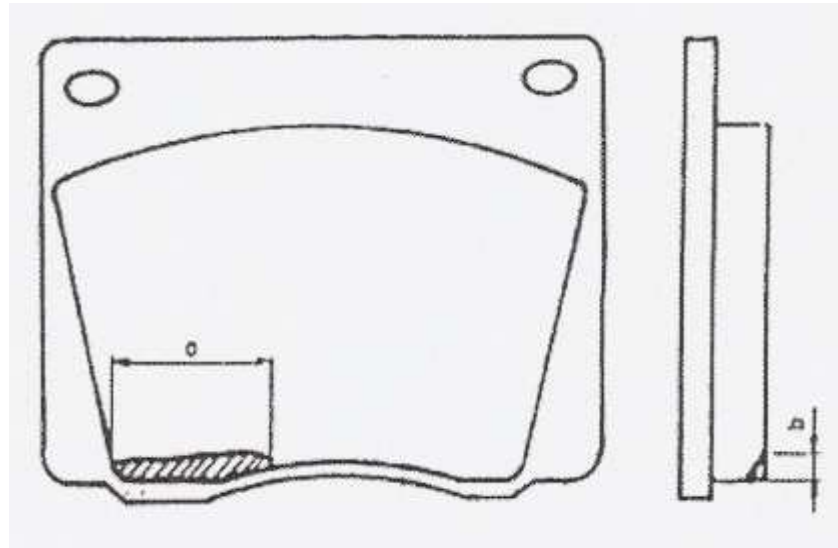
5.2.4 Yüzey Düzgünlüğü ve Çatlaklar

Disk balatalarının yüzey düzgünlüğü, TS 555 'te belirtilen şekildeki değerlerde olması istenir. Gözle muayene sonucunda belirlenen kusurlar dört grupta toplanmıştır.

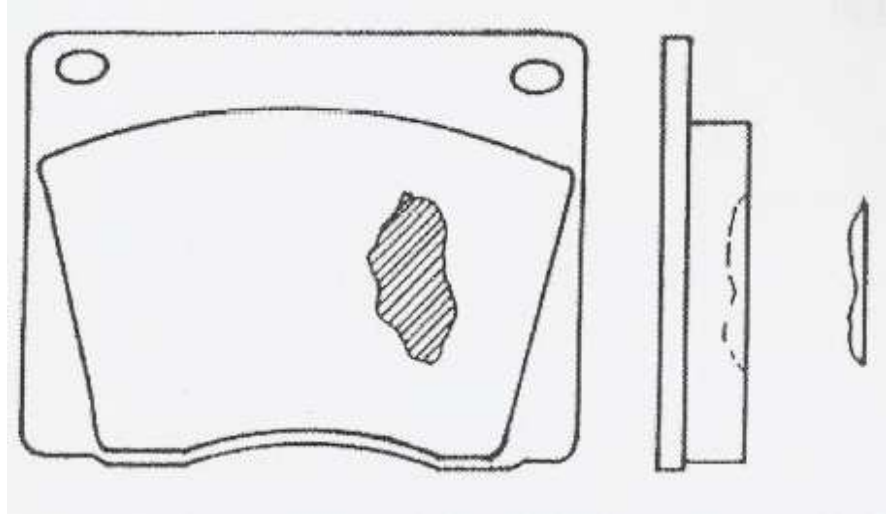
- Çatlaklar (Şekil 5.5)
- Kenar dökülmesi (Şekil 5.6)
- Kapalı, çıkıntı ve çukurlar (Şekil 5.7)
- Ayrılma ve yan çatlak (Şekil 5.8)



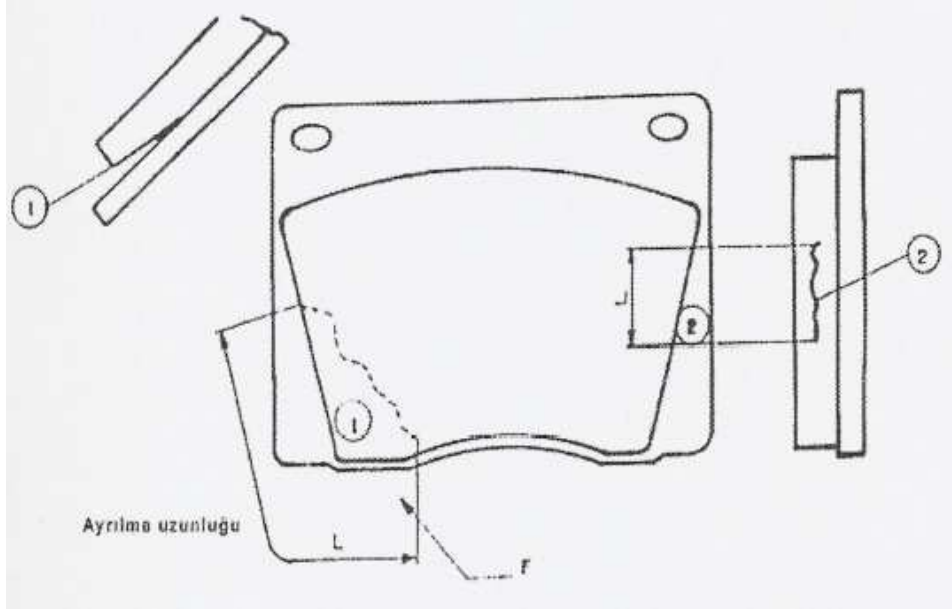
Şekil 5. 5 Çatlak [39]



Şekil 5. 6 Kenar dökülmesi [39]



Şekil 5. 7 Kapalı çıkıntı ve çukurlar [39]



Şekil 5. 8 (1) Ayrılma, (2) yan çatlak [39]

Belirtilen kusurların TS 555'e göre kabul-red şartları ise şu şekildedir:

- Kabul edilebilir çatlak uzunluğu $\ell < 0,02 H$ olmalı ve 100 mm^2 'de 2'den fazla bulunmamalıdır.
- Kabul edilebilir kenar dökülmesi $b < 1 \text{ mm}$ olmak üzere $(axb) < 8 \text{ mm}^2$ olmalı ve bütün kenar dökülme alanlarının toplamı (A), toplam sürtünme yüzeyi alanının (A_0) yüzde birine eşit veya küçük olmalıdır.
- Kabul edilebilir en büyük çıkıntı veya çukurluk derinliği 2 mm 'yi aşmamak üzere bunların toplam alanı $A < 0,01 A_0$ olmalıdır.

Kabul edilebilir ayrılma uzunluğu $L < 8$ mm olup her yan yüzeyde birden fazla olmamalıdır.

5.2.5 Yağ ve Fren Sıvısı, Tuzlu Su ve Suyu Dayanım

Balatanın kirlenmeden dolayı kalınlık ve kesme mukavemetindeki değişmeye karşı koyma özelliğidir. Zararlı ortama maruz bırakılan balatalardaki dayanım ve biçim değişikliği ölçülür. Sonuçlar kirlenmemiş numunelerin sonuçları ile karşılaştırılır.

TS 9075 [41] standardına göre zararlı ortama maruz bırakılan numunelerin kesme kuvvetine dayanım ve iç kesme dayanımı değerlerindeki değişim belirlenir.

5.2.6 Sürtünme ve Aşınma Özellikleri

Sürtünme ve aşınma özellikleri fren balatalarında üzerinde en fazla durulması gereken konudur. Balata kompozisyonun hazırlanmasından üretime kadar birçok aşamanın birincil amacı sürtünme ve aşınma özelliklerinin istenilen düzeyde elde edilmesini amaçlamaktadır.

5.2.6.1 Sürtünme Katsayısı

Disk/kampana yüzeyi ile fren balatası arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı, normal sürtünme katsayısını (soğuk sürtünme katsayısı) verir. Frenlemenin etkin bir şekilde yapılabilmesi için kontrol edilmesi gereken en önemli unsurdur.

$$\mu = \frac{F_s}{N} \quad (5.1)$$

Bir araçtaki fren sisteminin performansı temel olarak disk ve balatadan oluşan çiftin sürtünme özelliklerine bağlıdır. Aracın en kısa sürede durdurulması frenleme performansının göstergesidir ancak bunun dengeli bir şekilde yapılması sağlanmalıdır. Balata ve disk arasında oluşan sürtünme, yüzeyler arasında olabildiğince homojen olarak dağılmalıdır. Sürtünme katsayısının çok yüksek olması frenleme sırasında sarsıntı oluşumu ve sese neden olmaktadır. Bu da hem fren sistemine zarar vermekte hem de yolcular açısından rahatsız edici bir durum yaratmaktadır. Ayrıca yüksek aşınma

değerleri de söz konusudur. Sürtünme katsayısının çok düşük olması da frenlemenin gerçekleştirilmesi açısından olumsuz durum yaratmaktadır [20].

Balata, diskle birlikte yeteri kadar sürtünme sağlamalı, yüksek sıcaklıklarda dağılma ya da çatlama yapmadan özelliklerini korumalı, sabit bir sürtünme katsayısı oluşturmalıdır [1].

Sürtünme katsayısı aynı zamanda sürtünme hızı ile de yakından ilişkilidir. Sürtünme hızı değiştikçe sürtünme katsayısında da değişimler gözlenmektedir. Bu değişim doğrusal ya da parabolik olmakla birlikte artma ya da azalma eğiliminde de olabilir. Burada belirleyici krater yine sürtünme malzemesidir. Örneğin EL-Tayeb ve Liew [42] de çelik fiberli takviyeli organik balatalar ile yaptığı çalışmalarda sürtünme katsayısının hız ile birlikte arttığını gözlemlemiştir.

Sürtünme katsayısının kontrolü, balatada kullanılan sürtünme bileşenlerine ve üretim parametrelerine bağlıdır. Sürtünmeyle birlikte aşınma da söz konusu olduğundan Kuzey Amerika ve Asya pazarlarında düşük aşınma hızı ve düşük fren sesi istendiğinden sürtünme katsayısı yaklaşık olarak 0,35 değerinde tutulmaktadır. Bu yüzden kompozisyonlarda hemen hemen hiç çelik yer almaz. Ancak bu durumda frenleme performansı düşmektedir. Avrupa'da ise 0,40 gibi nispeten yüksek değerler kullanılarak daha iyi bir frenleme performansı istenmektedir. Bunun sağlanması için de balata bileşimlerinde %10-30 arasında bakır ve çelik kullanılır [35].

Yukarıda belirtilen nedenler doğrultusunda kullanılan fren sisteminin dizaynına ve servis koşullarına göre optimum sürtünme katsayısı değerleri belirlenmelidir. TS 555'e göre standart kapsamındaki balatalar normal sürtünme katsayılarına göre dört türde sınıflandırılmıştır (Çizelge 5.2).

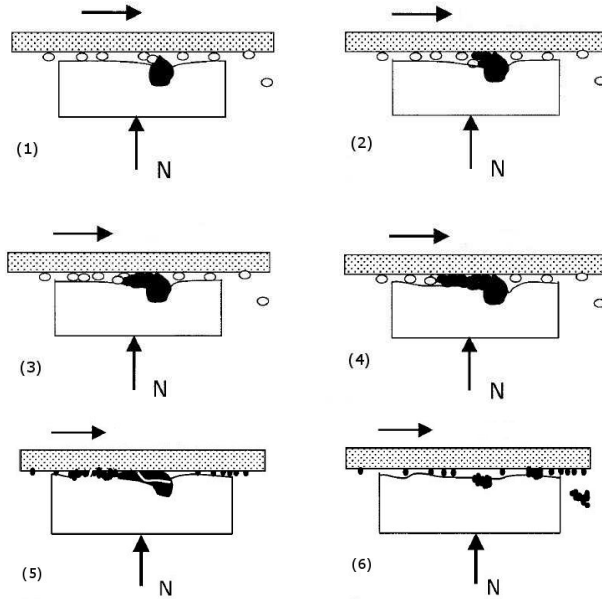
Bu standarda göre soğuk ve sıcak sürtünme katsayıları için alt sınır 0,25 değeridir. 0,25'ten daha az sürtünme katsayısına sahip balatalar kabul edilmez.

Çizelge 5. 2 Sürtünme katsayılarına göre balata türleri [39]

Tür	Sürtünme Katsayısı (μ)
E	0,25 – 0,34
F	0,35 – 0,44
G	0,45 – 0,54
H	0,55 – yukarısı

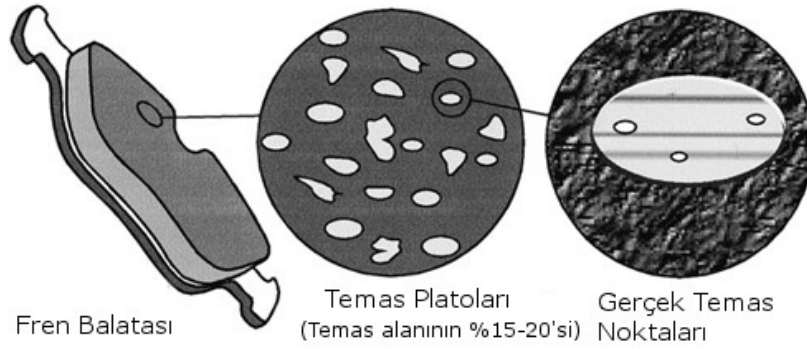
5.2.6.2 Aşınma

Farklı özelliklere sahip bileşenlerin bir arada kullanılması disk-balata ara yüzeyinde karmaşık bir temas durumunu da beraberinde getirir. Yumuşak matris içerisinde bulunan sert partiküller matrisin aşınmasıyla sürtünme ara yüzeyine dağılırlar ve kayma kuvvetinin etkisiyle sıkışarak “plato” adı verilen temas yüzeylerinin oluştururlar. Bunlar birincil ve ikincil platolar olarak iki aşamada oluşurlar. Birincil platolar aşınmaya dayanıklı ve mekanik olarak kararlı alanlardır, ikincil platoların oluşması için elverişli alanlar oluştururlar. İkincil platolar bunların arkasında sıkışarak birikmesi ile oluşur. Buralarda kayma kuvveti, normal kuvvet ve sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı etkilidir. Aynı etmenler bir süre sonra temas yüzeylerinin yapısını bozarak parçalanmalarına neden olur [38].



Şekil 5. 9 Platoların oluşumu ve parçalanması [38]

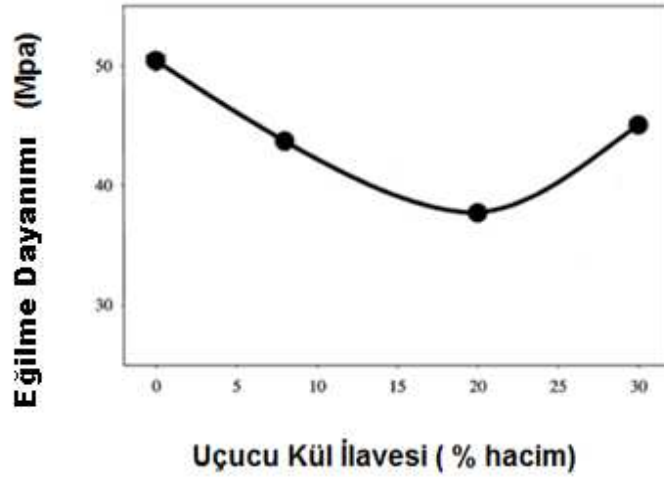
Platolar sürtünme yüzeyinin yaklaşık %15-20'sini kapsamaktadır. Ancak gerçek temas alanları bu platoların üzerinde yer alırlar ve daha küçük bir alan oluştururlar [43].



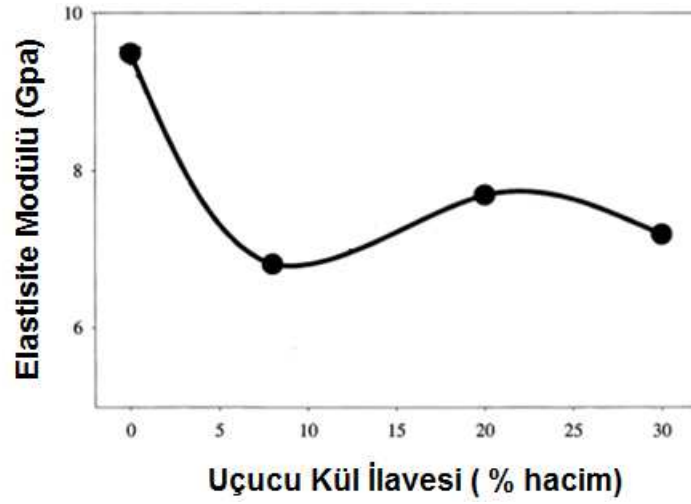
Şekil 5. 10 Balata malzemesindeki platolar ve gerçek temas alanları [43]

UÇUCU KÜLLERİN KOMPOZİT FREN BALATALARINDA KULLANIMIYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

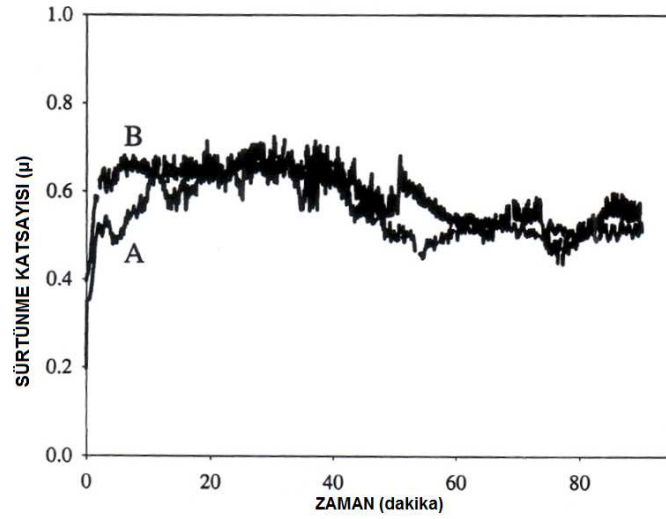
Malhotra vd. [4] te sürtünme elemanı olarak kullanılan kompozit bileşimlerine uçucu kül ilavesinin etkilerini incelemişlerdir. %8-30 arası hacim oranında hazırlamış oldukları karışımlar ile üretilen kompozitler üzerinde mekanik testler gerçekleştirmişlerdir. Şekil 6.1’de kül ilavesi ile eğme dayanımının değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde kütlece % 20 uçucu kül ilavesinin burulma dayanımını düşürdüğü, ancak sonrasında uçucu kül oranının artırılması ile dayanımın iyileştiği görülmektedir. Şekil 6.2’de uçucu kül oranının elastisite modülüne etkisi verilmiştir. Karışım içerisindeki uçucu kül oranındaki değişiminin, elastisite modülünde de benzer bir etkiye neden olduğu görülmektedir. Şekil 6.3’de sürtünme katsayısının zamana göre değişimini göstermektedir.



Şekil 6. 1 Uçucu kül ilavesinin eğme dayanımına etkisi [4]



Şekil 6. 2 Uçucu kül ilavesinin elastisite modülüne etkisi [4]



Şekil 6. 3 %20 hacim oranında uçucu kül içeren numunelerin sürtünme davranışı [4]

Uçucu kül kullanımının kompozit fren balatalarında sürtünme değerlerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca yaptıkları çalışmalarda, uçucu küllerin yapı içerisinde, Al_2O_3 , Cr_2O_3 ve SiC gibi diğer aşındırıcı partiküllere benzer karakterde davranış gösterdiklerini saptamışlardır.

Mohanty ve Chugh [6] da %50'nin üzerinde uçucu kül içeren fren balatası karışımları hazırlamışlardır. Ürettikleri kompozit fren balatalarının yüksek homojenite ve buna bağlı olarak iyi frenleme performansı göstermesini amaçlamışlardır. Çizelge 6.1'de kullandıkları uçucu külün bileşimi, Çizelge 6.2'de ise balata kompozisyonları verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Uçucu külün kimyasal bileşenleri [6]

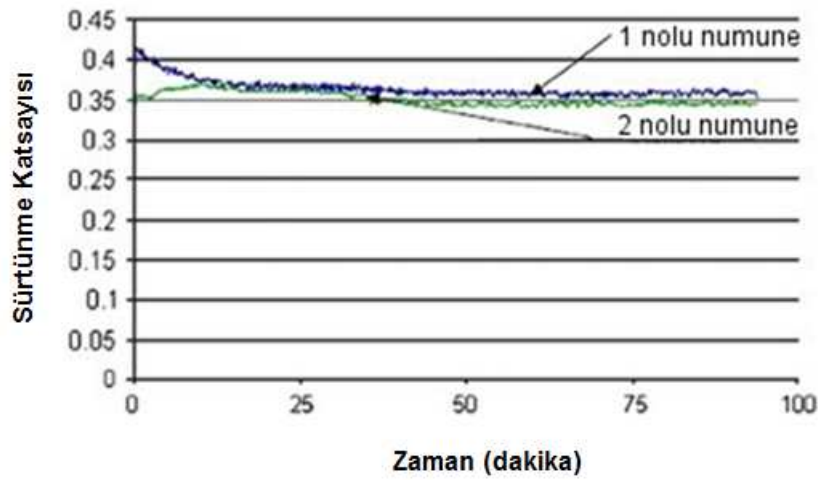
Kimyasal Bileşim	Ağırlık %
SiO ₂	31.3
Al ₂ O ₃	10.6
Fe ₂ O ₃	8.3
SO ₃	12.8
CaO	20.9
MgO	0.4
Yanmamış karbon	12.55
Nem	0.11
Hidratlama suyu	0.71
Toplam Na ₂ O	0.4
Toplam K ₂ O	1.1
Diğerleri (TiO ₂ +P ₂ O ₅ +SrO+BaO)	0.83

Çizelge 6. 2 1,2 ve 3 nolu karışımların kompozisyonları [6]

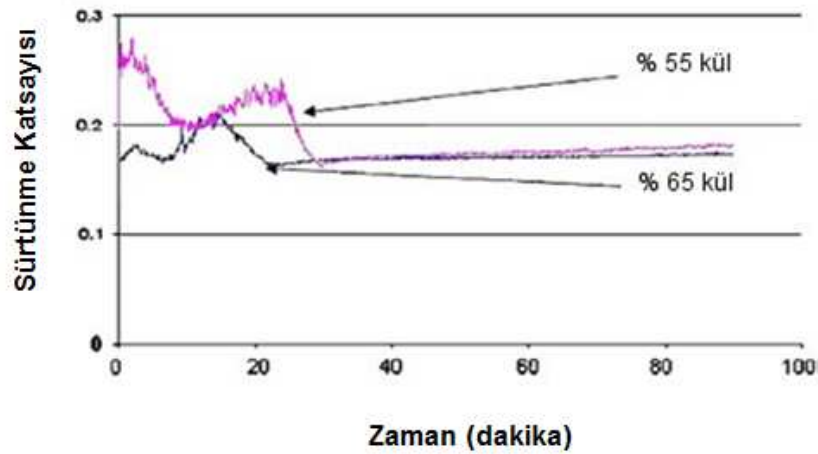
İçerik	Kütlece %
1 nolu karışım	
Uçucu Kül	55-65
Fenolik Reçine	20
Cam Fiber	15-25
Aluminyum Fiber	0-10
2 nolu karışım	
Uçucu Kül	52-60
Fenolik Reçine	20
Aramid Pulp	3-8
Potasyum Titanat	4-10
Grafit	0-10
3 nolu karışım	
Uçucu Kül	50-60
Fenolik Reçine	20
Aramid Pulp	3-8
Potasyum Titanat	4-10
Grafit	5-10
Fiber Bakır / Toz Bakır	5-10

Hazırlanan karışımların sürtünme katsayılarının değişimleri analiz edilmiştir. Numuneler 90 dakika süresince 7 m/s hızda dönen perlitik gri dökme demir diskler üzerinde normal yükler uygulanarak test edilmiştir. Numunelerin sürtünme katsayıları, normal ve kayma gerilmelerinin deney süresince her 5 saniyede bir ölçülmesiyle

hesaplanmıştır. Şekil 6.4'te ticari olarak kullanılan fren balata malzemelerinin sürtünme test sonuçları verilmiştir.

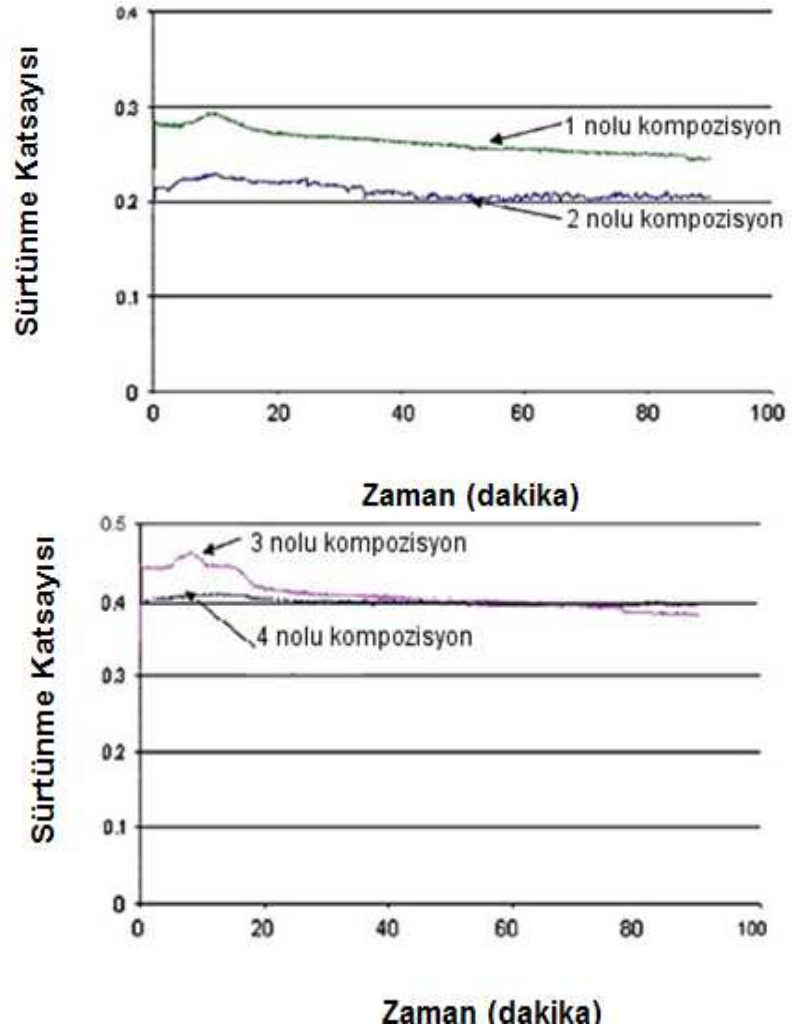


Şekil 6. 4 İki farklı ticari fren balata malzemesinin sürtünme testi sonuçları [6]



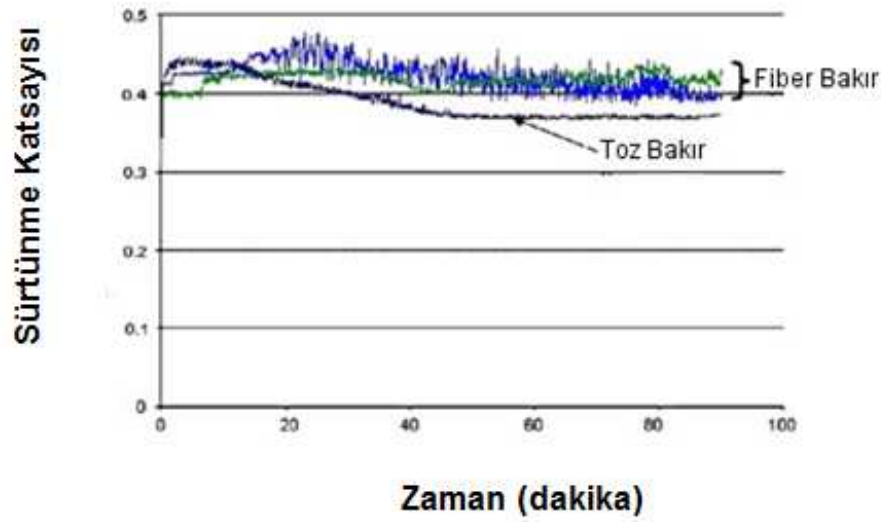
Şekil 6. 5 1 numaralı karışımın sürtünme testi sonuçları [6]

Şekil 6.5'de 1 nolu karışımın sürtünme test sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde, % 55 uçucu kül içeren karışımın daha iyi performans gösterdiği görülmüştür ve bu karışımın ileride gerçekleştirilecek modifikasyonlar için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki kompozit için 90 dakikalık test sonrasında toplam aşınmanın çok yüksek olduğu belirlenmiştir (%52 kütlece). Düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma oranı 1 numaralı karışım içeriğinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 6. 6 1 numaralı karışımın sürtünme testi sonuçları [6]

Şekil 6.6'da 2 numaralı karışımdan elde edilen dört farklı kompozisyonun sürtünme test sonuçları verilmiştir. Aşınma oranları %12-%17 aralığındadır. 1 numaralı karışım ile kıyaslandığında bu karışımın daha iyi bir performans gösterdiği söylenebilir.



Şekil 6. 7 3 numaralı karışımın sürtünme testi sonuçları [6]

Şekil 6.7’de üç numaralı karışımın sonuçları görülmektedir. Sürtünme katsayısının 0.4 olduğu ve çok fazla değişmediği belirlenmiştir. Toplam aşınma oranının ise %5-9 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir.

Mohanty ve Chugh gerçekleştirmiş oldukları tüm bu çalışmalar sonucunda;

- 1.)Uçucu küllerin termal dayanımlarının oldukça yüksek olduğu ve böylece frenleme sıcaklıklarında yapının ayrışmasına yol açmadıklarını,
- 2.)Cam fiber ve alüminyum fiber içeren karışımların, istenilen sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarını sağlayamadığını,
- 3.)Aramid pulp ve potasyum titanat kullanımı ile yüksek oranda uçucu kül içeren karışımda istenilen dayanımın sağlanabildiğini,
- 4.)Karışım içerisine grafit ilavesinin stabil sürtünme performansının sağlanmasına katkıda bulunduğunu, ancak grafit nedeniyle oluşan yağlayıcı tabakanın yapıdan uzaklaştırılması için bakır fiber veya toz bir bileşenin karışım içerisine ilave edilmesi gerektiği,
- 5.)Bakır tozu içeren karışımda, bakır fiber içeren karışıma nazaran daha düşük titreşim görüldüğü belirlenmiştir.

Üç numaralı karışımın ticari olarak kullanılan balata malzemeleri ile aynı aşınma özellikleri göstermesinin yanında, bu malzemelere göre %50-60 daha hafif olduğu

görülmüştür. Bu durum konu ile ilgili yoğun bir şekilde çalışılması gerektiğini göstermektedir. Ancak yapılacak çalışmalarda kullanılacak olan uçucu küllerin karakteristiği büyük önem taşımaktadır.

Bu konuda yapılan diğer çalışmalar ana hatlarıyla aşağıda verilmiştir.

Hee ve Filip [5] te, kütlece % 25 oranında uçucu kül içeren fren balatalarının, gerçekleştirilen otomotiv dinamometre testlerinde ticari olarak kullanılan fren balatalarının performanslarının üzerine çıktıklarını belirlemişlerdir.

Dadkar vd. [7] da, %65 - %80 uçucu kül içerikli novalak tipi fenolik reçine ve aramid fiber kullanarak 4 tip balata malzemesi üretmişlerdir. % 70'in üzerinde uçucu kül içerenlerde sürtünme kat sayısı 0,34-0,36, %70'in altında uçucu kül içerenlerde 0,45-0,46 bulunmuştur. %60 SiO₂, %30 Al₂O₃, %6,35 Fe₂O₃ ve %1 CaO içeren uçucu kül kullanılmıştır.

Satapathy vd. [44] de, %55 ve %75 uçucu kül içeren 8 değişik formülasyonlu kompozit fren balatası üretmiştir. 0,269 ila 0,386 arasında sürtünme katsayısı elde etmişlerdir. Bu çalışmada %60 SiO₂, %30 Al₂O₃, %6,35 Fe₂O₃ ve %1 CaO içeren uçucu kül kullanılmıştır. Diğer bileşenler değişik oranda fenolik reçine, kevlar ve lapinus fiberlerdir.

Dadkar vd. [45] de, uçucu kül ve kaya yünü kombinasyonlu 5 tip kompozit sürtünmeli fren balatasının performans özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda yüksek uçucu kül (%55-70) ve düşük kaya yünü (%10-25) kombinasyonunun sürtünme katsayısı performansını artırdığı ve aşınma direncini yükselttiği gözlemlenmiştir.

Bhabani vd. [46] da uçucu kül katkılı kompozit sürtünme malzemelerinde vermikülitin sürtünme performansına etkisini incelemiştir. Özet olarak mekanik özelliklerde sertliğin vermikülit ilavesiyle birlikte azaldığı, sıkıştırılabilirlik ve kesme dayanımının ise hemen hemen etkilenmediği söylenebilir. Vermikülitin ağırlıkça %5-10 ve uçucu külün ağırlıkça %60-65 gibi değerlerde olması optimum yorulma performansını sağlamaktadır.

Bhabani vd. [47] de, ham uçucu kül kullanımının yanında "Cenosphere" adı verilen uçucu külün yanmamış karbon esaslı kalıntılardan arındırılmış formu olan içi boş silikat

küreler içeren kompozisyonlar da test edilerek ham uçucu kül katkı malzeme özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan kompozisyonlar Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6. 3 FA-1, FA-2, CS-1, CS-2 kompozisyonları [47]

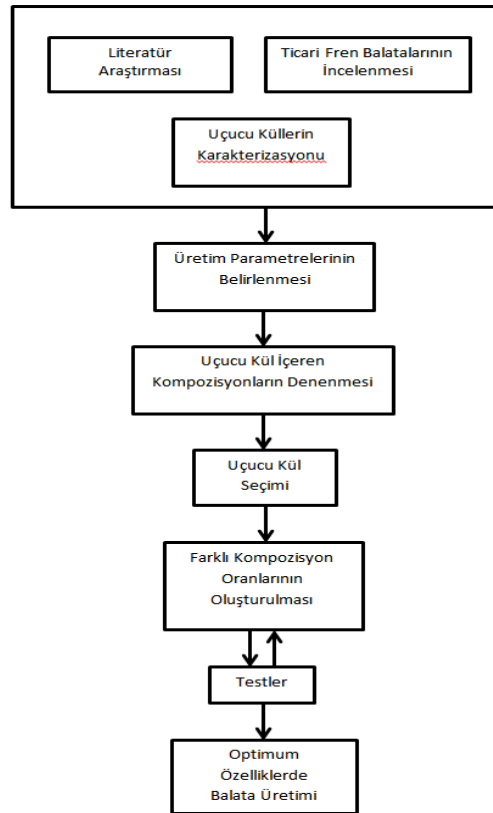
Kompozisyon (% Kütle)				
Bileşen	FA-1	FA-2	CS-1	CS-2
Fenolik Reçine	15	22,5	15	22,5
Uçucu Kül	72	72,5	-	-
Cenosphere	-	-	72	72,5
Aramid (Kevlar)	5	5	5	5
Kaya Yünü	8	-	8	-

Farklı uçucu kül partiküllerinin kullanıldığı bu iki çeşit kompozit sürtünme malzemeleri karşılaştırıldığında cenosphere partiküllerinin gelişmiş bir yorma-toparlanma (fade-recovery) performansı sunduğu görülmektedir. Genel performans ve dayanıklılık açısından lapinus ile birlikte etkileşim içerisinde.

Ham uçucu kül katkısının sürtünme katsayısını, yorulma sürtünme katsayısını ve toparlanma sürtünme katsayısını cenosphere partiküllerininkine göre artırdığı, $\mu_{\max}$ - $\mu_{\min}$ değerinin ise benzer kaldığı söylenebilir. Ayrıca cenosphere katkısı etkili bir aşınma azaltıcı etkiye yol açmaktadır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında otomotiv sektöründe kullanılan uçucu kül katkılı kompozit sürtünmeli fren balatasının üretimi ve deneysel optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada takip edilen adımlar (Şekil 7.1) genel olarak literatür araştırması, ticari fren balatalarının incelenmesi, uçucu kül karakterizasyonu, uçucu kül katkılı laboratuvar ölçekli numunelerin üretimi ve bu numunelerin testlerinin yapıp kompozisyon oranlarının optimize edilmesi olarak sıralanabilir.



Şekil 7. 1 Çalışmada takip edilen adımlar

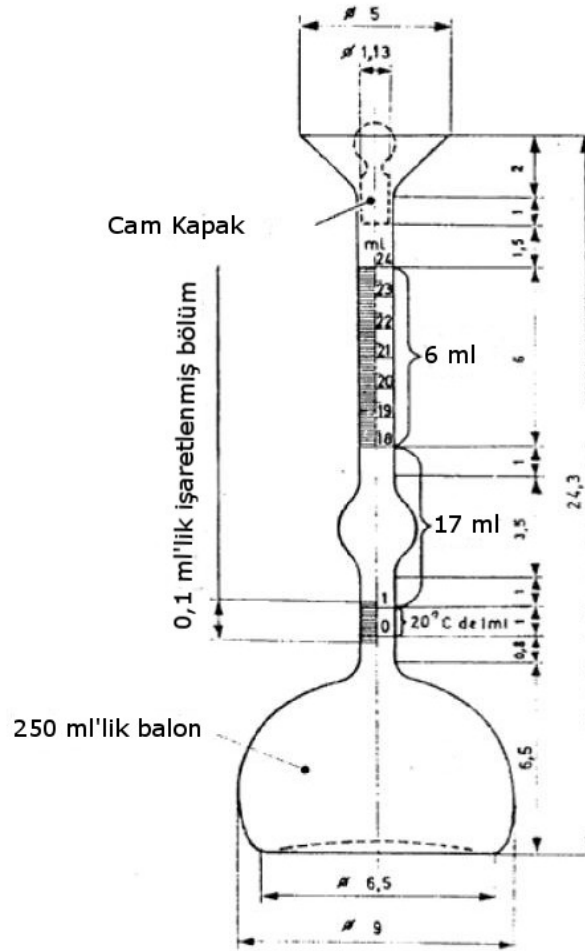
7.1 Uçucu Kül Karakterizasyonu

Fren balatalarında kullanımının uygun olup olmadığının belirlenmesi için denenecek uçucu kül numuneleri Tunçbilek, Yatağan, Çatalağzı, Seyitömer, Orhaneli, Çayırhan, Kemerköy, Afşin-Elbistan, Soma ve Yeniköy termik santrallerinden temin edilmiştir.

Temin edilen numunelerin özgül ağırlık, partikül boyut dağılımı, yüzey alanı, por boyut hacmi gibi fiziksel özellikleri tespit edilmiş, bazı küllerin SEM görüntüleri çekilerek tane şekilleri incelenmiştir. Bunlara ek olarak XRF ve TG/DTA analizleri yapılarak kimyasal özellikleri de belirlenmiştir.

7.1.1 Özgül Ağırlık

Özgül ağırlık tayini, uçucu küller ile ilgili olan TS 639 [48] standardına göre Le Chatelier balonu (Şekil 7.2) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 7. 2 Le Chatelier balonu [48]

Şişe, 0-1 ml çizgilerinin arasına kadar benzin ile doldurulmuştur. Benzin kullanılmasının nedeni, normal şartlar altında benzinin uçucu kül ile herhangi bir reaksiyon oluşturmamasıdır. Ayrıca şişe, benzin ve uçucu küller aynı ortamda bekletilerek sıcaklıklarının eşit olmasına dikkat edilmiştir.

0-1 ml çizgilerinin arasına kadar doldurulan şişeye 0,001 g hassasiyetle tartılan 45-50 g'lık uçucu kül numunesi huni yardımıyla akıtılarak benzin seviyesinin 18-24 ml çizgileri arasına gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra şişenin kapağı kapatılıp ters çevrilerek hava kabarcıkları sıvı yüzeyine çıkartılmıştır.

0-1 ml çizgileri arasındaki sıvı seviyesi ve kül numunelerinin eklenmesinden sonra okunana sıvı seviyesi kaydedilerek aşağıdaki formül (7.1) yardımıyla özgül ağırlık değerleri hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (7.1)$$

Bütün uçucu kül numuneleri ile aynı şekilde tekrarlanan özgül ağırlık testinin sonuçları Çizelge 7.1'de verilmiştir.

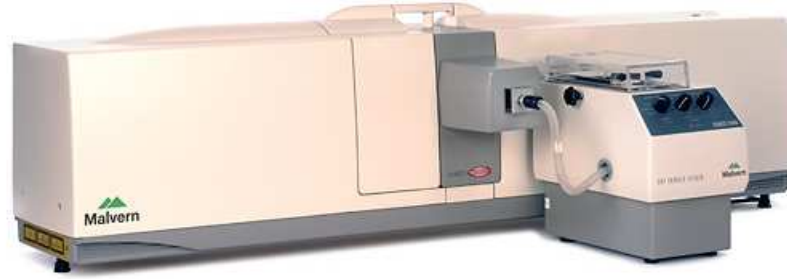
Çizelge 7. 1 Uçucu küllerin tespit edilen özgül ağırlık değerleri

Termik Santral	Özgül Ağırlık g/cm ³
Tunçbilek	2,17
Yatağan	2,94
Çatalağzı	2,13
Seyitömer	1,69
Orhaneli	1,69
Çayırhan	2,56
Kemerköy	2,63
Afşin-Elbistan A	2,38
Soma	2,44
Yeniköy	3,03

Genel olarak bakıldığında ülkemiz termik santrallerinin ürettiği uçucu küllerin özgül ağırlıklarının 1,69-3,03 g/cm³ aralığında olduğu söylenebilir.

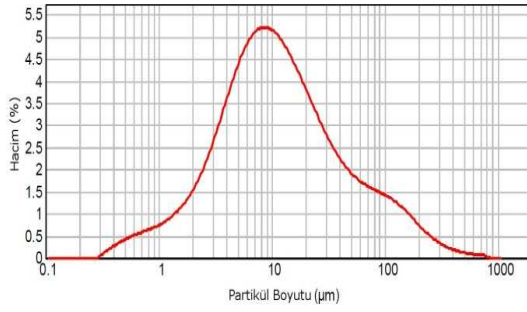
7.1.2 Partikül Boyut Dağılımı

Partikül boyut dağılımının belirlenmesinde Mastersizer 2000E cihazı kullanılmıştır.

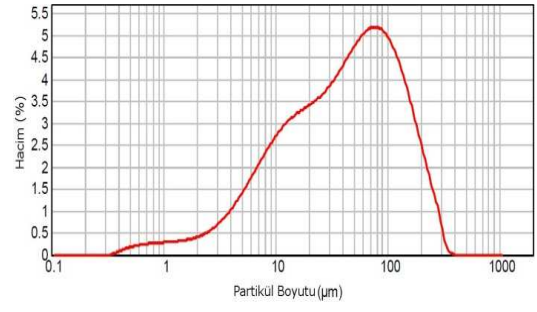


Şekil 7. 3 Mastersizer 2000E

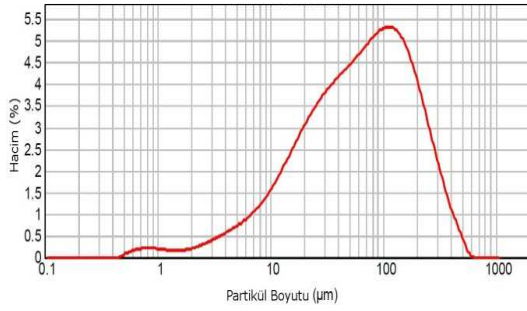
Uçucu küllere ait partikül boyut dağılımı grafikleri Şekil 7.4’te verilmiştir. Boyut dağılımı açısından oldukça geniş bir aralık söz konusudur.



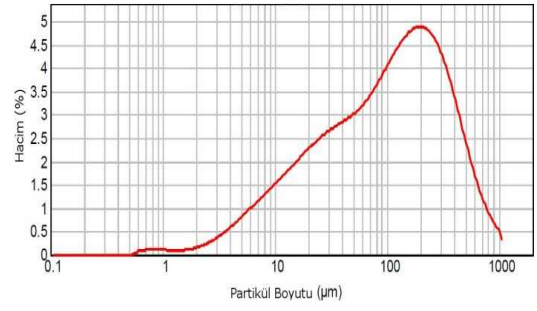
Tunçbilek



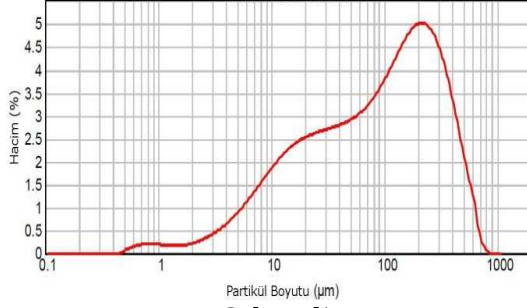
Çatalağzı



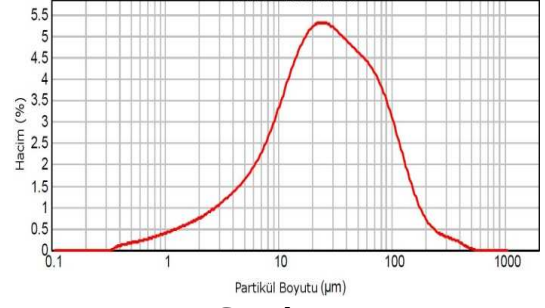
Yatağan



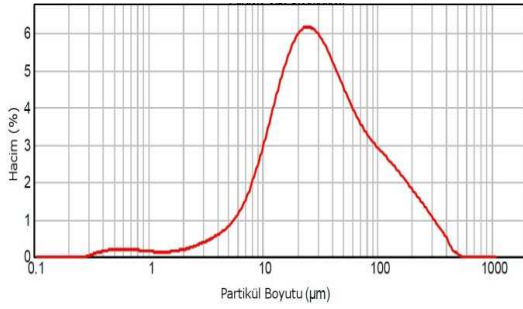
Seyitömer



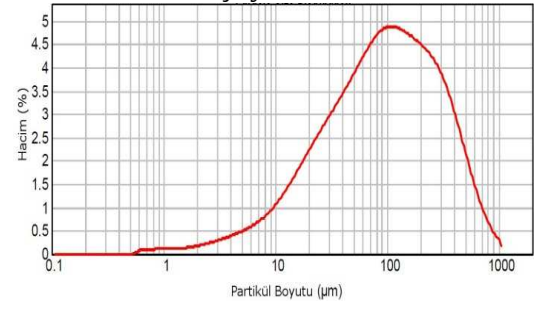
Orhaneli



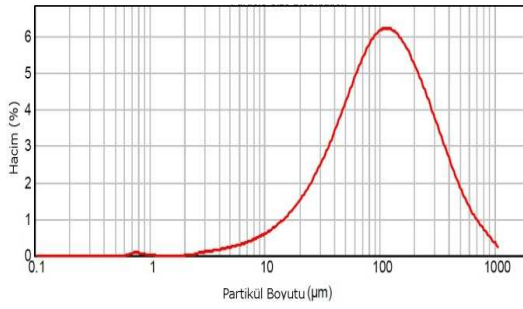
Çayırhan



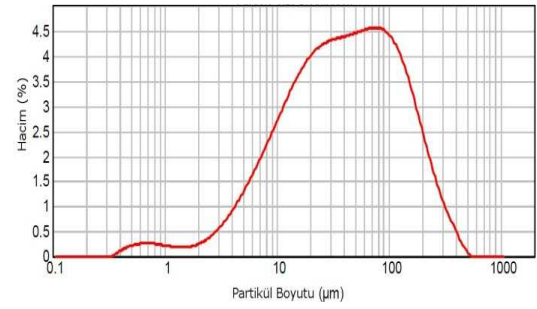
Kemerköy



Afşin-Elbistan A



Soma



Yeniköy

Şekil 7. 4 Uçucu küllerin partikül boyut dağılımı grafikleri

Bu grafiklerden hesaplanan ortalama partikül boyutları ise Çizelge 7.2’dedir.

Çizelge 7. 2 Uçucu küllerin ortalama partikül boyutları

Termik Santral	Ortalama Tane Boyutu μm
Tunçbilek	31
Yatağan	96
Çatalağzı	64
Seyitömer	166
Orhaneli	143
Çayırhan	43
Kemerköy	58
Afşin-Elbistan A	155
Soma	160
Yeniköy	68

Çizelge 7.2’deki sonuçlardan özellikle Seyitömer, Afşin-Elbistan A ve Soma ve Orhaneli termik santrallerinin küllerinin ortalama partikül boyutlarının diğerlerine göre büyük olduğu görülmektedir.

7.1.3 Yüzey Alanı ve Por Hacmi

Quantachrome Instruments marka Nova 4000E model yüzey alanı cihazında, multipoint BET yüzey alanı ve por boyutu ölçümü yapılmıştır.



Şekil 7. 5 Nova 4000E

Ön hazırlık aşamasında numune etüvde 150 °C’de 16 saat, cihazın degas bölümünde ise 300 °C’de yaklaşık 5 saat azot gazı altında kurutularak analizi yapılmıştır. Yüzey alanı ve por boyut sonuçları Çizelge 7.3’tedir.

Çizelge 7. 3 Uçucu küllerin yüzey alanı ve por hacmi değerleri

Termik Santral	Yüzey Alanı m ² /g	Por Hacmi cm ³ /g
Tunçbilek	2,022	0,001
Yatağan	1,655	0,001
Çatalağzı	1,706	0,001
Seyitömer	11,985	0,013
Orhaneli	6,709	0,005
Çayırhan	1,988	0,002
Kemerköy	0,694	0,001
Afşin-Elbistan A	4,638	0,004
Soma	3,731	0,004
Yeniköy	1,308	0,004

Seyitömer Termik Santrali’nin uçucu kül partiküllerinin yüzey alanı ve por hacim değerleri, diğerlerinininkilere göre yüksektir. Buradan hareketle diğer küllere göre

partiküllerin daha fazla por içerdiği ve şekillerinin daha düzensiz olduğu yorumu yapılabilir.

Diğer küllerin yüzey alanı değerleri 0,694-6,709 m²/g; por hacim değerlerinin ise 0,001-0,005 cm³/g aralığında değiştiği görülmektedir.

7.1.4 XRF Analizleri

XRF analizleri, Philips marka PW-2404 model dalga boyu dağılımlı X-Işını Floresan Spektrometre cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 7. 6 Philips PW-2404

Belli bir termik santral için küllerin kimyasal kompozisyonunun zamanla değişip değişmediği ya da değişiyorsa ne kadar değiştiğinin tespiti amacıyla Tunçbilek, Çatalağzı, Yatağan, Seyitömer ve Orhaneli termik santrallerden hem Ocak 2011 hem de Haziran 2011 dönemlerinde örnekler temin edilmiştir. Ocak ayında temin edilen küllerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 7.4'te, haziran ayında temin edilenlerinki ise Çizelge 7.5'te gösterilmiştir. Aralarında önemli bir farklılık gözlenmemiştir.

Çizelge 7. 4 Ocak 2011'de temin edilen uçucu kül numunelerinin kimyasal kompozisyonları

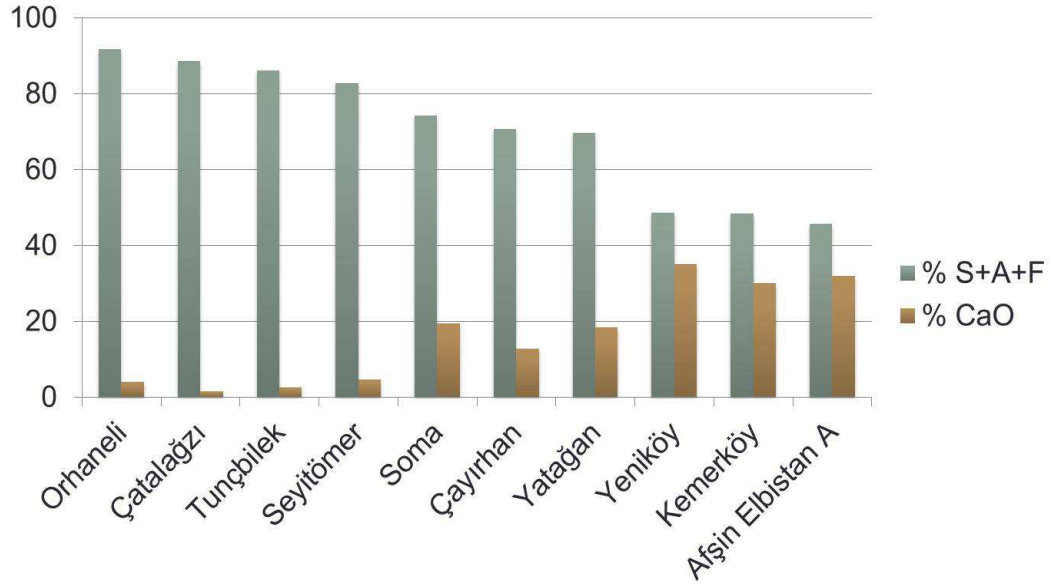
Bileşen	Tunçbilek	Yatağan	Çatalağzı	Seyitömer	Orhaneli
SiO₂	59	48,8	56,3	58,1	51,7
Al₂O₃	22	22,8	27,3	19	26,5
Fe₂O₃	9,51	7	6,91	10,56	10,34
CaO	2,52	14,3	2,13	3,46	4,15
MgO	3,5	2	2	4,2	2,5
K₂O	1,47	2,06	3,8	1,2	2,07
Na₂O	-	-	-	1	1
TiO₂	0,86	0,81	1,14	0,74	0,68
SO₃	0,52	1,6	0,22	0,59	0,54
PbO	-	0,2	-	0,2	0,3
ZnO	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02
CuO	0,03	0,02	0,03	0,036	0,03
Cr₂O₃	0,13	0,052	0,05	0,16	0,084
NiO	0,19	-	0,02	0,24	0,093
MnO	0,15	0,06	0,085	0,05	0,065
S+A+F	90,51	78,6	90,51	87,66	88,54

Çizelge 7. 5 Haziran 2011'de temin edilen uçucu kül numunelerinin kimyasal kompozisyonları

Bileşen	Tunçbilek	Yatağan	Çatalağzı	Seyitömer	Orhaneli	Çayırhan	Kemerköy	Afşin-El. A	Soma	Yeniköy
SiO₂	55,01	42,77	53,84	52,26	54	49,68	27,39	26,27	46	29
Al₂O₃	20,99	19,9	28,66	20,33	28,7	14,09	15,57	12,87	24,4	15,5
Fe₂O₃	10,23	6,97	6,09	10,12	9,05	6,99	5,39	6,55	3,83	4,1
CaO	2,63	18,53	1,6	4,69	4,04	12,73	30,04	32,04	19,5	35,2
MgO	5,02	3,45	2,69	6,01	-	6,52	2,43	3,25	-	-
K₂O	1,79	2,28	4,21	1,97	2,1	2,38	1,9	0,85	1	1,03
Na₂O	0,14	0,36	0,31	0,42	-	1,8	0,42	0,17		
TiO₂	0,59	0,55	0,86	0,51	0,55	0,38	0,46	0,56	0,55	0,52
SO₃	2,06	4,32	0,69	2,7	1,1	3,77	15,51	16,23	2,5	12,5
PbO	0,01	0,12	0,02	0,01	-	0,02	0,02	-	-	-
ZnO	0,03	0,02	0,02	0,02	-	0,01	0,02	0,02	-	-
CuO	0,03	0,02	0,02	0,02	-	0,05	0,01	0,01	-	-
Cr₂O₃	0,13	0,03	0,02	0,1	0,049	0,04	0,03	0,08	0,03	0,049
NiO	0,24	0,02	0,02	0,19	0,03	0,05	0,02	0,03	-	-
MnO	0,18	0,06	0,08	0,09	0,04	0,09	0,03	0,04	0,04	0,106
S+A+F	86,23	69,64	88,59	82,71	91,75	70,76	48,35	45,69	74,23	48,6

S+A+F olarak gösterilen değerler SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oranlarının toplamıdır. S+A+F miktarı Tunçbilek, Çatalağzı, Seyitömer ve Orhaneli termik santrallerinin küllerinde %80'in üzerindedir. Bunların CaO miktarları ise %5'i geçmemektedir. Yatağan, Çayırhan ve Soma küllerinde ise S+A+F miktarı %70-75; CaO miktarı ise %12-20 arasındadır. Kemerköy, Afşin-Elbistan A ve Yeniköy küllerindeki CaO içeriği % 30'u geçmektedir. CaO miktarının yüksek olması S+A+F oranını %40-50 aralığına çekmiştir.

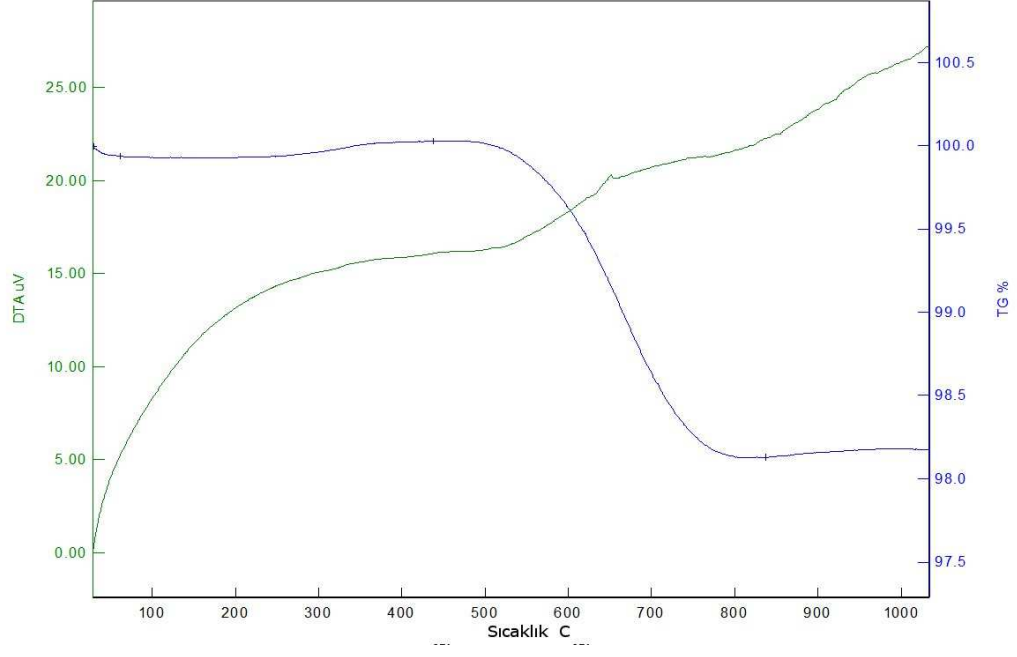
SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'in abrasiv olarak fren balatalarında kullanımı göz önüne alınarak incelenen uçucu küllerin S+A+F oranı en düşük %48,35 (Af.-El. A), en yüksek %91,75 (Orhaneli) olarak tespit edilmiştir (Şekil 7.7). Bu oranlar kimyasal kompozisyon bakımından fren balatalarında hem abrasiv hem de dolgu olarak kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir.



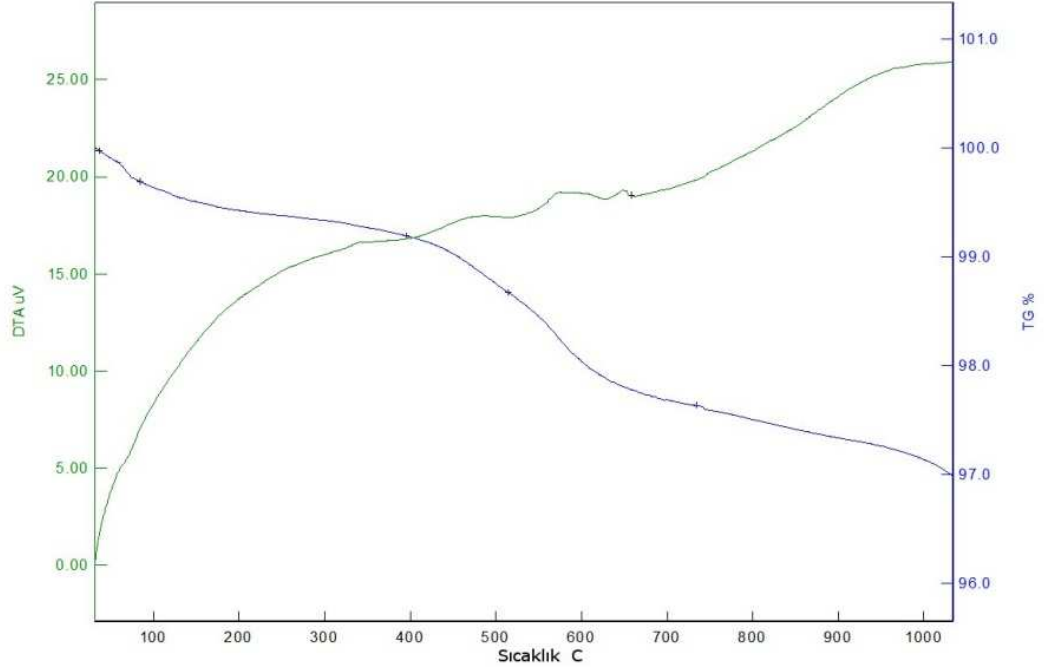
Şekil 7. 7 Uçucu küllerin CaO ve S+A+F oranları

7.1.5 TG/DTA Analizleri

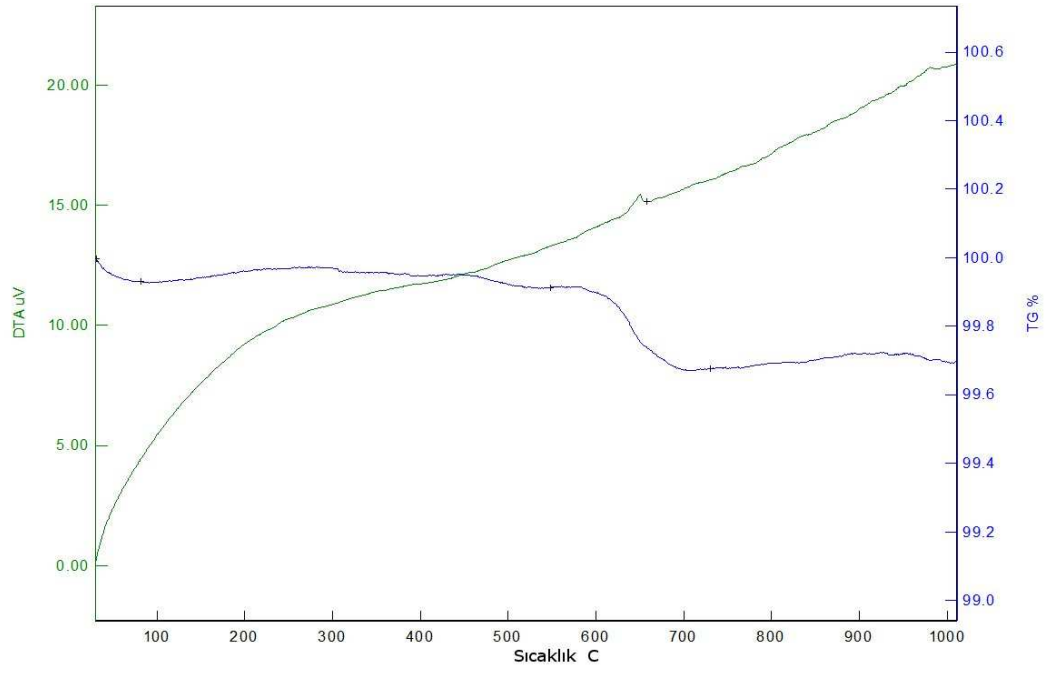
TG/DTA analizleri Seiko Instruments Inc.-EXSTAR6000 cihazıyla Yatağan, Tunçbilek, Kemerköy, Çatalağzı, Afşin Elbistan A, külleri üzerinde yapılmıştır. Bu küllerin seçilme nedeni Çatalağzı'nın taşkömürü kullanması, Kemerköy ve Afşin Elbistan A'nın yüksek CaO içermesi, Tunçbilek ve Yatağan'ın da yüksek S+A+F içerikli uçucu küllere örnek teşkil etmesidir.



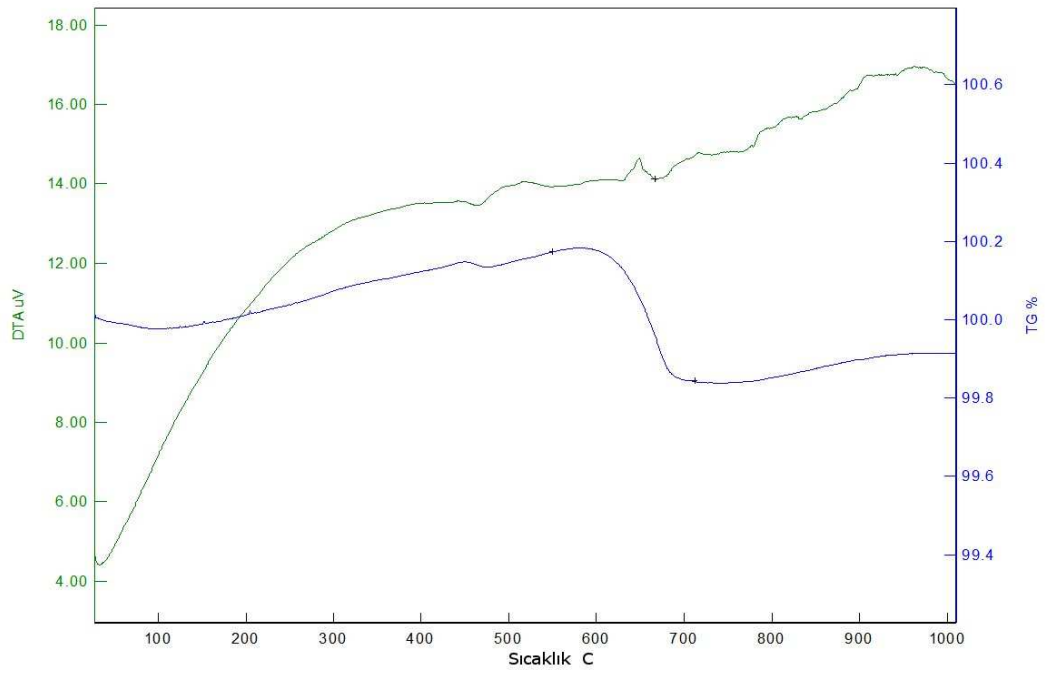
Şekil 7. 8 Çatalağzı Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği



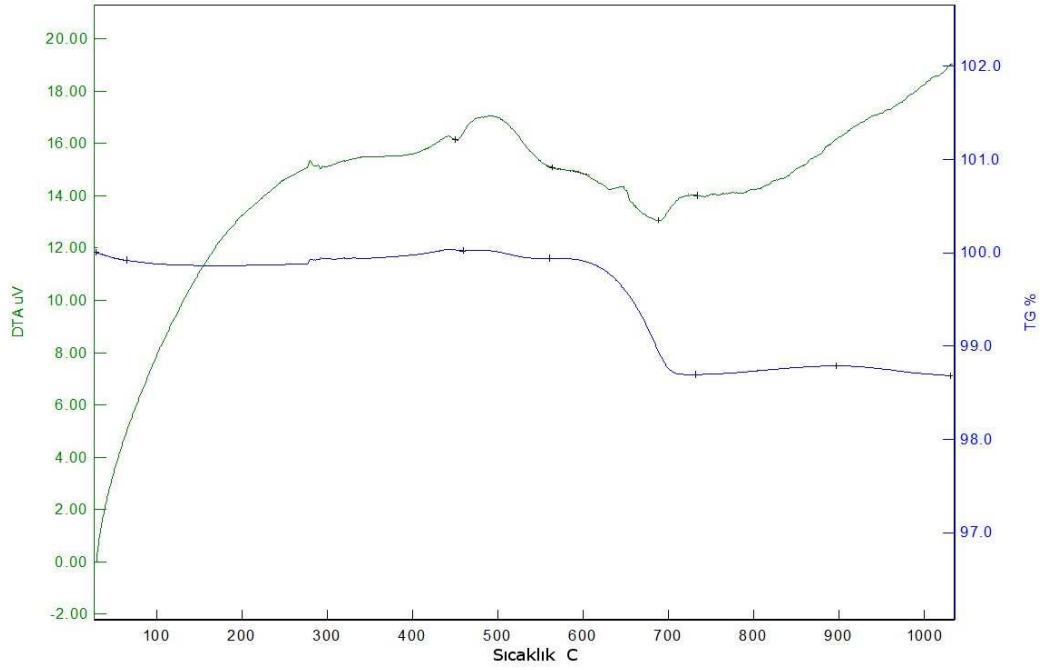
Şekil 7. 9 Tunçbilek Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği



Şekil 7. 10 Yatağan Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği



Şekil 7. 11 Kemerköy Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği



Şekil 7. 12 Afşin Elbistan A Termik Santrali uçucu küllerinin TG/DTA grafiği

Organik esaslı kompozit fren balatalarının kullanım sıcaklığı en fazla 400-450 °C olarak verilmektedir. DTA eğrilerinden 400 °C'nin altında herhangi bir egzotermik ya da endotermik reaksiyon görülmemektedir. Benzer şekilde TG eğrilerinde de önemli bir kütle kaybı yoktur. TG/DTA grafikleri, küllerin balatalarda 450 °C'ye kadar kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir.

7.2 Ticari Balataların İncelenmesi

İncelenen standartlarda az sayıda birkaç özellik dışında formülasyon ve üretim şartları gibi özellikler üreticiye bırakılmıştır. Otomotiv sektöründe ticari olarak kullanılan balatalar, üreticilerin belirlediği formülasyon ve üretim şartlarına göre üretilmektedir. Bu yüzden piyasada yüzlerce farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özellik kombinasyonuna sahip balatalar bulunmaktadır. Piyasa araştırması yapılarak satıcı ve tüketici yönünden tercih edilen markalara ait ticari kompozit fren balataları temin edilerek incelenmiştir. Bunların kullanıldığı araçlar Çizelge 7.6'dadır.

Çizelge 7. 6 Ticari balata numunelerinin kullanıldığı araçlar

Rumuz	Kullanıldığı Araç	Fren Sistemi
OTO 1	Binek Otomobil	Disk
OTO 2	Minibüs	Disk
OTO 3	Arazi Aracı	Disk
OTO 4	Kamyon	Kampana
OTO 5	Kamyon-Çekici	Disk
OTO 6	Kamyon-Çekici	Disk
OTO 7	Kamyon-Çekici	Disk

7.2.1 SEM-EDS İncelemeleri

SEM-EDS incelemeleri ile Çizelge 7.7’de verilen kompozit fren balatalarının bileşenleri belirlenmiştir. Bu analiz sonuçları ve tarama yaptığımız literatür bilgileri ile ticari balataların hangi bileşenlerden oluşabilecekleri tespit edilmiştir.

Çizelge 7. 7 SEM-EDS ile incelenen numunelerin muhtemel kompozisyon içerikleri

Balata	Çelik Fiber	BaSO ₄	Pirinç	Karbon	CaCO ₃	ZrSiO ₄	Sb ₂ S ₃	ZnS
OTO 1	X	X		X	X			
OTO 2	X	X		X	X			
OTO 3	X	X		X				
OTO 4	X	X		X			X	
OTO 5	X	X	X	X		X	X	X
OTO 6	X	X		X			X	
OTO 7	X	X		X	X		X	

Böylece bu ticari balatalarda kullanılan dolgu, takviye ve sürtünme düzenleyici malzemelerin neler oldukları belirlenmiştir. Görünen şudur ki incelenen ticari balataların tamamında çelik fiber, BaSO₄ ve karbon mevcuttur. Karbon, grafit, reçine, aramid gibi bileşenlerden gelmektedir. Uçucu kül katkısına rastlanmamıştır.

7.2.2 Fiziksel, Kimyasal, Mekanik ve Tribolojik Testler

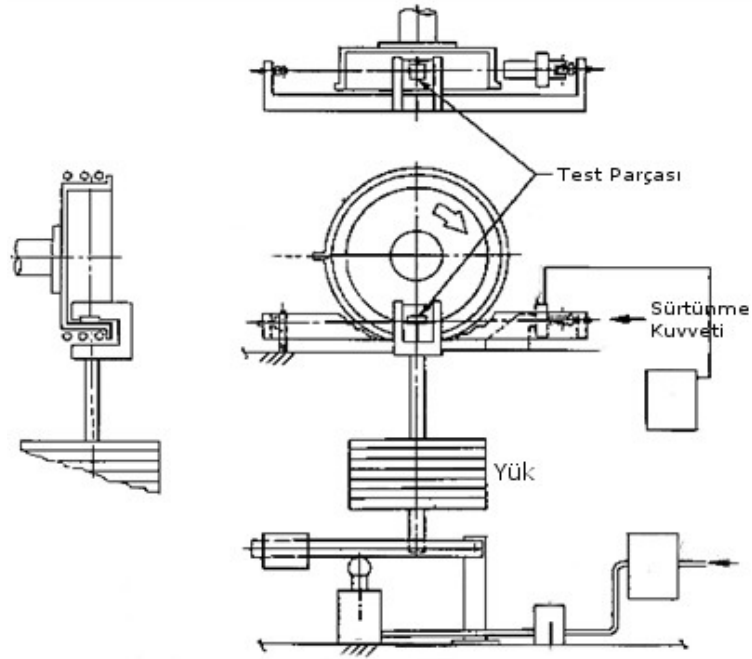
Bu ticari balatalar üzerinde, Çizelge 5.1’de tarandığı belirtilen standartlar baz alınarak yapılan test sonuçları toplu halde Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7. 8 İncelenen ticari balata numunelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Balata	Yoğunluk g/cm ³	Sertlik HRL	Basma Elastisite Modülü MPa	İç Kesme Dayanımı MPa				Eğilme Dayanımı MPa	Yanma Kaybı %	Asetonda Çözünen Madde Miktarı %
				Sıvılara Dayanım						
				Normal	Su	Tuzlu Su	Yağ			
OTO 1	2,33	44	376	22	18	20	13	-	18,11	1,1
OTO 2	2	45	384	15	21	20	21	-	19,78	1,4
OTO 3	2,66	46	389	26	21	22	19	-	21,59	1,1
OTO 4	2	67	-	14	22	18	15	23	35,41	5,4
OTO 5	3	45	354	19	18	19	16	-	14,18	-
OTO 6	2,75	57	442	-	-	-	-	-	6,09	-
OTO 7	2,75	31	321	16	21	19	21	-	12,78	-

Yoğunluk değerleri genel olarak 2-3 g/cm³ arasında değişmektedir. Aynı tip araca ait farklı marka üretimi olan OTO 5, OTO 6 ve OTO 7 numunelerinin sertlik değerlerinin birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. İç kesme dayanımı, numunelerin farklı sıvı ortamlarında bekletilmesi ile fazla değişmemektedir. Yanma kaybı değerleri organik içerikli bileşenleri işaret ettiğinden kompozisyona göre farklılık göstermektedir.

Fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenen numuneler SAE J661 [49] standardına göre sürtünme ve aşınma testine tabi tutulmuştur. Testler Chase cihazında yapılmıştır.



Şekil 7. 13 SAE J661'e göre Chase test cihazının şeması [49]

Şekil 7.13'te teknik şeması görülen cihazda karşı yüzey olarak standardın belirlediği perlitik dökme demirden (Çizelge 7.9) yapılmış tambur parça kullanılmaktadır.

Çizelge 7. 9 Chase testinde kullanılan karşı yüzeyin kimyasal kompozisyonu [49]

Element	%
Toplam Karbon	3,30-3,50
Mangan	0,55-0,75
Silisyum	1,80-2,10
Kükürt	0,20 maksimum
Fosfor	0,20 maksimum
Nikel	0,60-0,70
Krom	0,15-0,25
Molibden	0,20-0,30

Fren balatalarına uygulanan sürtünme ve aşınma testleri, deney parçasının karşı yüzeyle teması sırasında belirlenen bir program dahilinde süre, fren uygulaması, basınç, sıcaklık ve devir gibi parametrelerin değiştirilmesi ve buna bağlı olarak sürtünme katsayısı, aşınma ve yorulma değerlerindeki değişimlerin ölçülmesi esasına dayanır.

Çizelge 7. 10 SAE J661'e göre Chase test programı [49]

Amaç	Fren Uygulaması		Devir Sayısı	Kuvvet N	Sıcaklık °C	Süre
	Tip	Sayı	Devir/Dak.			
Alıştırma	Aralıklı	20	417	667	82-104 °C arasında	10 s yüklü 20 s yüksüz
1.Yorma	Sürekli	-	417	667	93 °C'den 288 °C'ye kadar	En fazla 10 dak.
1.Toparlanma	Aralıklı	4	417	667	260 °C 204 °C 149 °C 93 °C	10 s
2.Yorma	Sürekli	-	417	667	93 °C'den 343 °C'ye kadar	En fazla 10 dak.
2.Toparlanma	Aralıklı	5	417	667	316 °C 260 °C 204 °C 149 °C 93 °C	10 s

Çizelge 7. 11 Ticari balata numunelerinin SAE J661'e göre yapılan sürtünme aşınma testleri

Balata	Sürtünme Katsayısı		Tür		Aşınma %	
	Normal	Sıcak	Normal	Sıcak	Kütle	Kalınlık
OTO 1	0,544	0,475	G	G	2,5	4,7
OTO 2	0,551	0,543	G	G	3,1	6,2
OTO 3	0,57	0,494	H	G	2,8	5,7
OTO 4	0,467	0,497	G	G	4,3	7
OTO 5	0,36	0,325	F	E	0,6	2
OTO 6	0,401	0,418	F	F	-	3,56
OTO 7	0,577	0,547	H	G	-	-

Mekanik, fiziksel, kimyasal ve tribolojik testler ticari olarak kullanılan balataların oldukça farklı özellikler sergileyebildiklerini göstermektedir. Bu farklılıklar kompozisyon ve üretim şartları nedeniyle oluşmaktadır. Kompozisyonu oluşturan bilşenlerin farklı şartlarda karıştırılıp preslenmesi fiziksel ve mekanik özelliklere etki etmektedir.

7.3 Laboratuvar Ölçekli Numune Üretimi

7.3.1 Kullanılan Malzemeler

Literatür araştırması sırasında incelenen farklı fren balatası kompozisyonlarının test sonuçları dikkate alınarak, uçucu küllerle birlikte kullanılabilecek malzemeler belirlenmiştir.

Bağlayıcı olarak fenolik reçine; takviye malzemesi olarak aramid pulp, kaya yünü, çelik fiber; sürtünme düzenleyici olarak grafit tozu, petrokok ve dolgu olarak da vermikülit kullanılmıştır (Şekil 7.14).



Toz Fenolik Reçine



Aramid Pulp



Kaya Yünü



Çelik Fiber



Toz Grafit



Petrokok



Vermikülit

Şekil 7. 14 Kompozisyonlarda kullanılan malzemeler

Takviye olarak kullanılan aramid pulp 0,5-1 mm, kaya yünü 0,4-0,8 mm ve çelik fiber 1-3 mm fiber boylarına sahiptir. Vermikülitin partikül boyutları 0,6-1,1 mm arasında değişmektedir.

7.3.2 Numune Üretim Şartlarının Belirlenmesi

Laboratuvar ölçekli numune üretimi, ticari fren balatalarının üretiminde olduğu gibi karıştırma, sıcak kalıplama ve post kürlleme aşamalarından oluşmaktadır.

Karıştırma işlemi, bıçaklı karıştırıcıda sıralı olarak yapılmıştır. Fiber malzemeler ve diğer toz bileşenler öncelikle kendi aralarında karıştırılmıştır. Daha sonra fiber karışımına toz karışımı kademeli olarak eklenerek homojen bir karıştırma işleminin gerçekleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 7. 15 Bıçaklı karıştırıcı

Sıcak kalıplama işlemi için Struers marka Citopress-10 laboratuvar tipi pres cihazı kullanılmıştır. 50 mm çapında silindir şeklinde numuneler üretilebilmektedir. 125-180 °C sıcaklıkları arasında ve 25-35 MPa basınç değerlerinde denemeler yapılarak kullanılan reçine için en uygun şartlar belirlenmiştir.



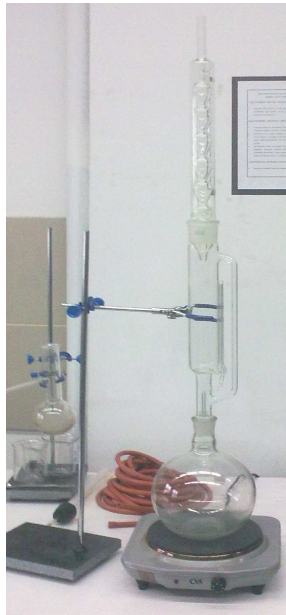
Şekil 7. 16 Citopress-10 laboratuvar tipi sıcak pres

Numuneler Şekil 7.17’de gösterilen Ecocell marka etüvde post kürlenmiştir. Post kürleme işlemleri 180 °C sıcaklıkta 4 saat süre ile yapılmıştır.



Şekil 7. 17 Post kürleme işleminin yapıldığı Ecocell etüv

Numune üretim şartlarının belirlenmesinde sertleşmemiş reçine miktarı esas alınmıştır. Bunun tespiti için de TS 12464 [50] nolu standarda göre balata numunesindeki asetonda çözünen madde miktarı belirlenmiştir. Bunun için soksilet ekstraksiyon düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 7. 18 Soksilet ekstraksiyon düzeneği

Toz haline getirilen numuneden 3 g $\pm$ 0,001 g tartılır ve toz kaçmayacak şekilde süzgeç kağıdına koyularak ekstraksiyon cihazının sifonuna yerleştirilir. En az 6 saat devam ettirilen ekstraksiyon işlemi sonrasında sifonun altındaki şişedeki aseton önceden tartımı alınmış bir kaba konularak sıcaklığın en fazla 50 °C olduğu bir ortamda

buharlaştırılır. Asetonun buharlaştığı kap etüvde 50 ± 2 °C sıcaklıkta 30 dakika bekletilerek tartımı alınır. Kararlı bir kütle elde edilinceye kadar tekrar eden işlem sonrası kabın ilk ve son ağırlığı arasındaki fark yüzde olarak hesaplanır. Hesaplanan sonuç asetonda çözünen madde miktarıdır.

Kütlece %65 Tunçbilek Termik Santrali'nin uçucu külü kullanılarak oluşturulan sabit kompozisyon Çizelge 7.12'de ve farklı üretim şartlarında üretilen numunelerin asetonda çözünen madde miktarları Çizelge 7.13'tedir.

Çizelge 7. 12 Laboratuvar ölçekli numunelerin üretiminde kullanılan kompozisyon

Bileşen	Kütle Oranı
Bağlayıcı Fenolik reçine	%15
Fiber Kaya yünü, aramid pulp	%20
Dolgu Uçucu kül	%65

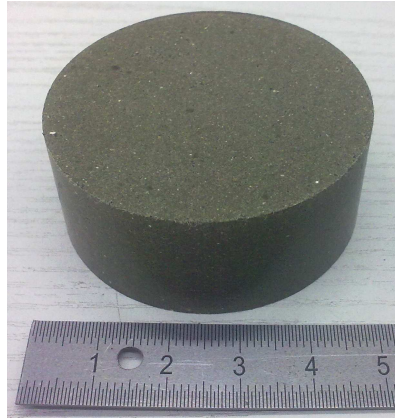
Çizelge 7. 13 Farklı üretim parametrelerinin asetonda çözünen madde miktarına etkisi

Sıcaklık °C	Basınç MPa	Kalıplama Süresi	Post Kürleme	Asetonda Çözünen Madde Miktarı %
180	35	10 dak.	-	1,38
180	25		-	1,97
180	25		180 °C, 4 saat	1,43
125	35		-	2,84
125	35		180 °C, 4 saat	1,30

Asetonda çözünen madde miktarının azalması bağlayıcı olarak kullanılan fenolik reçinenin sertleşme reaksiyonun daha verimli gerçekleştiğini göstermektedir. Buna göre tablodan yüksek sıcaklık-düşük basınç ya da düşük sıcaklık-yüksek basınç ve sonrasında post kütleme işlemlerinin en iyi sonucu verdiği söylenebilir. Bu proses şartından seri ve ekonomik olması nedeniyle 180 °C, 25 MPa basınçta 10 dakika kalıplama ve ardından (bazı numunelerde) 180 °C sıcaklıkta 4 saat post kütleme seçilmiştir.

7.3.3 Uçucu Kül Seçimi

Laboratuvar ölçekli numuneler, 50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde silindir şeklindedir. Üretilebilirlik açısından değerlendirme yapmak amacıyla farklı termik santrallerden elde edilen uçucu küller kullanılarak Çizelge 7.12'deki kompozisyon ile deneme yapılmıştır. Bu deneme sonucunda kütlece %65 oranında uçucu kül içeren kompozit fren balata üretimi için küçük tane boyutunun üretilebilirlik açısından daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.



Şekil 7. 19 Laboratuvar ölçekli numune

Seyitömer (166 μm), Afşin-Elbistan A (155 μm) ve Soma (160 μm) termik santrallerinden elde edilen uçucu küller ortalama tane boyutu büyüklüğünün fazla olması nedeniyle diğer balata bileşenleri ile homojen olarak karıştırılamamaktadır ve numune yüzeyinde yüksek oranda gözenek oluşturmaktadır.

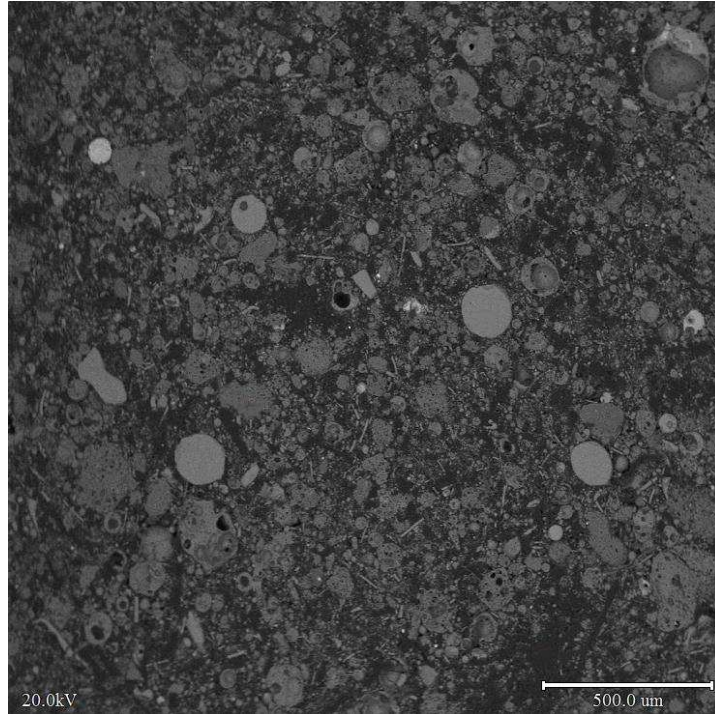


Şekil 7. 20 Afşin-Elbistan A Termik Santrali'nin uçucu külü ile üretilen numune yüzeyi



Şekil 7. 21 Yeniköy Termik Santrali'nin uçucu külü ile üretilen numune yüzeyi

Yeniköy, Tunçbilek, Yatağan, Çatalağzı gibi ortalama tane boyutu 100 μm 'nin altında olan küllerden daha homojen numuneler üretilebilmiştir.



Şekil 7. 22 Çatalağzı Termik Santrali'nin külleri ile üretilmiş numunenin SEM'de çekilmiş kompozisyon görüntüsü

Şekil 7.22'deki tarama elektron mikroskopunda çekilen kompozisyon görüntüsü incelendiğinde küresel olan küçük ve büyük kül tanelerinin homojen olarak dağıldığı görülebilmektedir.

Uçucu küllere uygulanan fiziksel, kimyasal analizler ve yukarıda yapılan denemeler sonucunda balatalarda kullanılabilecek uçucu kül tipleri belirlenip aşağıdaki gibi gruplandırılmıştır. Bundan sonra oluşturulacak kompozisyonlarda Çatalağzı, Tunçbilek, Yatağan, Çayırhan, Yeniköy ve Kemerköy termik santrallerinden elde edilen küller kullanılmıştır.

Çizelge 7. 14 Balata formülasyonlarında denenmek üzere seçilen uçucu küllerin özellikleri

Çatalağzı	Taş Kömürü, Düşük CaO içeriği (%1,6)	Çayırhan	Linyit, Orta CaO içeriği (%12,73)
Tunçbilek	Linyit, Düşük CaO içeriği (%2,63)	Yeniköy	Linyit, Yüksek CaO içeriği (%35,2)
Yatağan	Linyit, Orta CaO içeriği (%18,53)	Kemerköy	Linyit, Yüksek CaO içeriği (%30,04)

7.3.4 Üretilen Numunelerin Testleri

Seçilen Çatalağzı, Tunçbilek, Yatağan, Çayırhan, Yeniköy ve Kemerköy termik santrali küllerinden Çizelge 7.12'deki kompozisyona uyularak 180 °C sıcaklık 25 MPa basınç ve 10 dakika süre ile sıcak kalıplama şartları dahilinde numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler post kürlü ve kürsüz olarak test edilmiştir. Post kürlenme şartları 180 °C sıcaklıkta 4 saat süredir. Bunlara sertlik, basma elastisite modülü, iç kesme dayanımı, sıvılara dayanım, yoğunluk ve yanma kaybı testleri uygulanmıştır. Sertlik, yanma kaybı ve yoğunluk TS 555'e; iç kesme dayanımı TS 9073'e; su, tuzlu su, yağ sıvılarına dayanım TS 9075'e, asetonda çözünen madde miktarı ve basma elastisite modülü testleri TS 12464'e göre yapılmıştır. Çizelge 7.15'te bu testlerin sonuçları toplu olarak gösterilmektedir. Rumuzunun sonunda "X" olan numunelere post kürlenme işlemi yapılmıştır.

Çizelge 7. 15 Numunelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Numune Rumuzu	Külün Temin Edildiği Termik Santral	Yoğunluk g/cm ³	Sertlik HRL	Basma Elastisite Modülü MPa	İç Kesme Dayanımı ve Sıvılara Dayanım MPa				Yanma Kaybı %
					Normal	Su	Tuzlu Su	Yağ	
CAK	Çatalağzı	1,64	106	442	34	28	36	31	23
CAK-X		1,63	108	430	44	42	36	47	22
TAK	Tunçbilek	1,77	96	411	32	20	39	49	24
TAK-X		1,78	108	421	38	34	31	38	25
YAK	Yatağan	1,77	106	442	50	27	27	39	22
YAK-X		1,78	105	411	30	42	43	45	21
CaAK	Çayırhan	1,77	106	421	36	34	37	39	23
CaAK-X		1,76	110	421	42	30	46	40	23
KAK	Kemerköy	1,84	105	491	45	34	30	63	24
KAK-X		1,83	110	505	45	37	45	41	24
YeAK	Yeniköy	1,9	106	442	39	39	27	50	21
YeAK-X		1,89	111	389	44	45	22	59	21

Yoğunluk değerlerinin 1,63-1,9 g/cm³ aralığında olduğu görülmektedir. Numuneler, ticari balatalara oranla daha hafiftir. Sertlik değerleri ise 96-111 HRL aralığındadır. Ticari balata örnekleri karşılaştırıldığında daha sert oldukları söylenebilir. Buna bağlı olarak da iç kesme dayanımları ve basma elastisite modülleri daha yüksektir. Yanma kaybının %21-25 gibi nispeten yüksek değerlerde olması (reçine ve aramid pulp) karbon içeriği ile alakalıdır. Su, tuzlu su ve yağda bekletilmiş numunelerin iç kesme dayanımlarında değişimler göze çarpmaktadır.

Çizelge 7.16’da gösterilen numunelere uygulanan Chase testinin sonuçlarına bakıldığında sürtünme katsayısı ve aşınma değerlerinin yüksek olduğu söylenebilir.

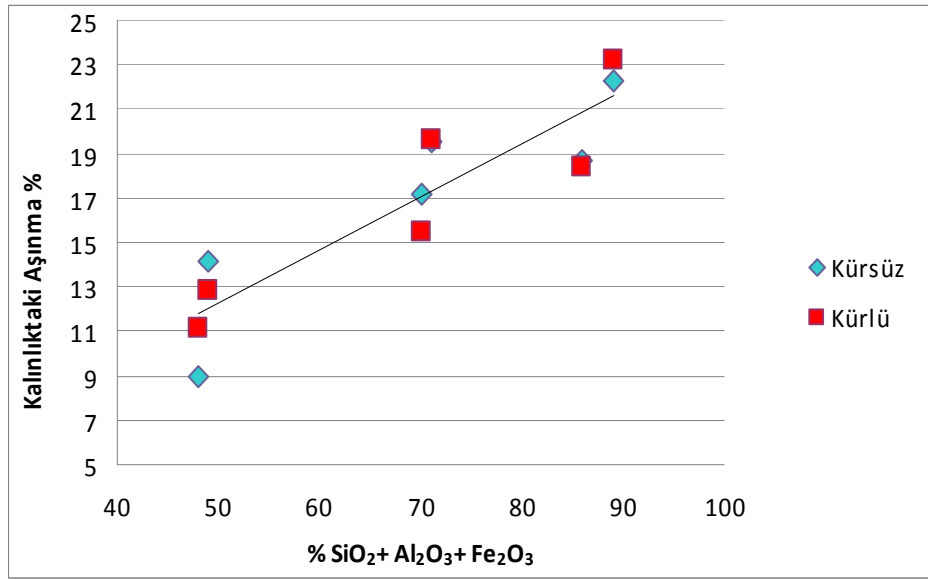
Çizelge 7. 16 Chase testi sonuçları

Balata	Külün Temin Edildiği Termik Santral	Sürtünme Katsayısı		Tür		Aşınma %	
		Normal	Sıcak	Normal	Sıcak	Kütle	Kalınlık
CAK	Çatalağzı	0,57	0,535	H	G	23,59	22,31
CAK-X		0,566	0,512	H	G	24,96	23,19
TAK	Tunçbilek	0,625	0,547	H	G	19,85	18,66
TAK-X		0,665	0,569	H	H	19,88	18,35
YAK	Yatağan	0,592	0,459	H	G	18,23	17,19
YAK-X		0,592	0,471	H	G	15,97	15,45
CaAK	Çayırhan	0,596	0,441	H	F	21,97	19,51
CaAK-X		0,639	0,468	H	G	20,91	19,59
KAK	Kemerköy	0,596	0,585	H	H	13,36	14,13
KAK-X		0,629	0,574	H	H	13,53	12,83
YeAK	Yeniköy	0,588	0,535	H	G	9,50	8,98
YeAK-X		0,577	0,566	H	H	11,73	11,15

Uçucu kül dolgusunun %65 gibi yüksek oranda olması ve bunların %50-90 arasında S+A+F ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$) içermesi abrasiv olarak davranmasını sağlamaktadır. Abrasiv içeriğinin yüksek oranlarda kullanılması sürtünme katsayısı değerlerini artırdığı bilinmektedir. Ayrıca kompozisyonda yağlayıcı kullanılmaması da bu değerleri artırmaktadır.

Post kürlü ve kürsüz numuneler arasında sürtünme ve aşınma özellikleri bakımından büyük bir fark görülmemektedir. Küller kendi aralarında karşılaştırıldığında Çatalağzı

(CAK ve CAK-X) ve Çayırhan (CaAK ve CaAK-X) termik santrallerinin külleri ile üretilen numunelerin en yüksek aşınma miktarına sahiptir. Buna karşın Kemerköy (KAK ve KAK-X) ve Yeniköy (YeAK ve YeAK-X) numuneleri en düşük aşınma değerlerini göstermiştir. Balata kompozisyonları sabit olduğundan küllerin morfolojik özellikleri bir kenara bırakılırsa S+A+F içeriği ile aşınma değerleri arasında bir ilişki kurulmak istendiğinde Şekil 7.23'teki grafik ortaya çıkmaktadır. Grafikten hareketle kullanılan kompozisyon dahilinde S+A+F içeriği ile aşınma miktarı arasında lineer bir ilişki vardır denebilir, nedeni de küllerin abrasiv olarak davranmasıdır.



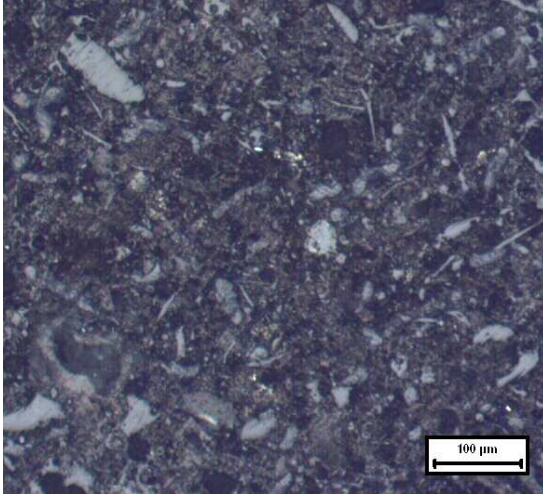
Şekil 7. 23 Post kürlü ve kürsüz numunelerde aşınma miktarı ve küllerdeki S+A+F oranı ilişkisi

Sürtünme katsayısı değerlerinin düşürülmesi için kompozisyona yağlayıcı görevi gören grafit ve petrokok eklenerek yeni numuneler (Çizelge 7.17) üretilmiştir. Buna ek olarak çelik fiber takviyesi ve vermikülit ilavesinin etkisi de araştırılmıştır.

Çizelge 7. 17 Yağlayıcı, çelik fiber ve vermikülit içeren kompozisyonlar

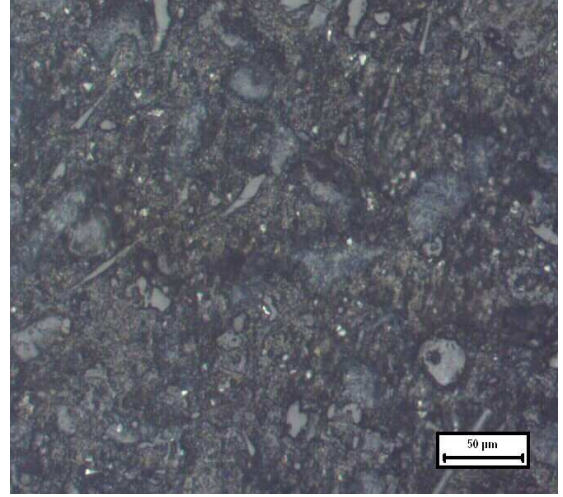
YeAK-2	Kütle Oranı %	YeAK-3	Kütle Oranı %	YeAK-4	Kütle Oranı %
Bağlayıcı Fenolik reçine	15	Bağlayıcı Fenolik reçine	15	Bağlayıcı Fenolik reçine	15
Fiber Kaya yünü, Aramid pulp	20	Fiber Kaya yünü, Aramid pulp, Çelik fiber	20	Fiber Kaya yünü, Aramid pulp	20
Dolgu Uçucu kül	50	Dolgu Uçucu kül	50	Dolgu Uçucu kül, Vermikülit	50
Sürtünme Düzenleyici Grafit, Petrokok	15	Sürtünme Düzenleyici Grafit, Petrokok	15	Sürtünme Düzenleyici Grafit, Petrokok	15

Üretim şartları önceki kompozisyonla aynıdır ancak pratiklik açısından post kürleme işlemi yapılmamıştır. Aşınma değerlerinin düşürülmesi amacıyla da Yeniköy Termik Santrali'nin külleri kullanılmıştır. Yeni bileşenler eklendiğinden uçucu kül miktarı YeAK-2 ve YeAK-3'te %50'ye, YeAK-4'te ise %40'a düşürülmüştür.



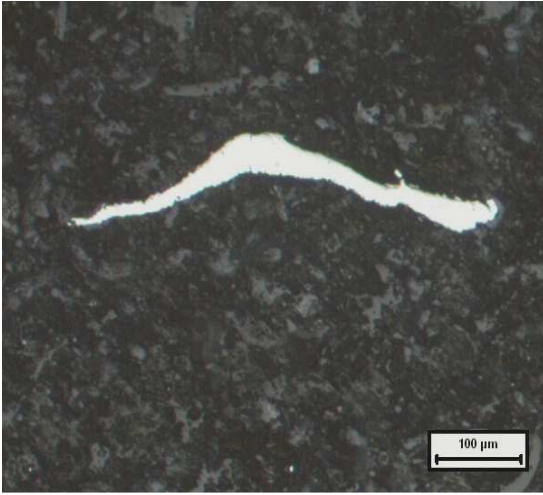
YeAK-2

X100



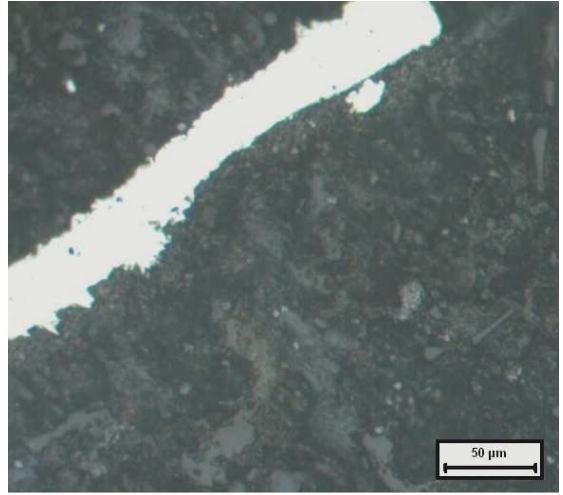
YeAK-2

X200



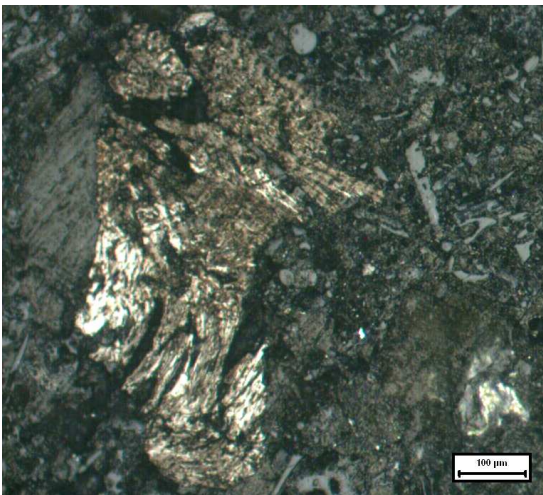
YeAK-3

X100



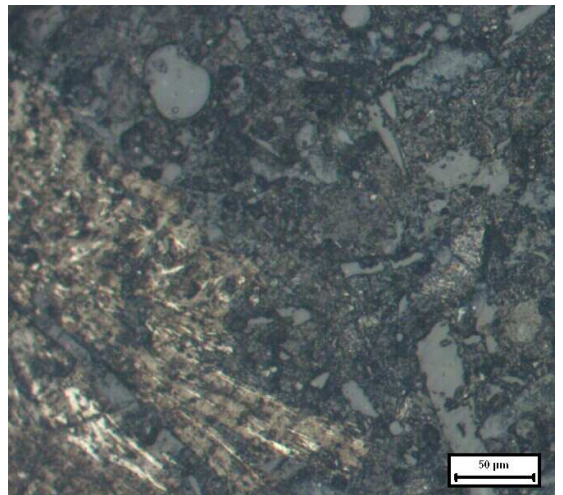
YeAK-3

X200



YeAK-4

X100



YeAK-4

X200

Şekil 7. 24 YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 optik mikroskop görüntüsü

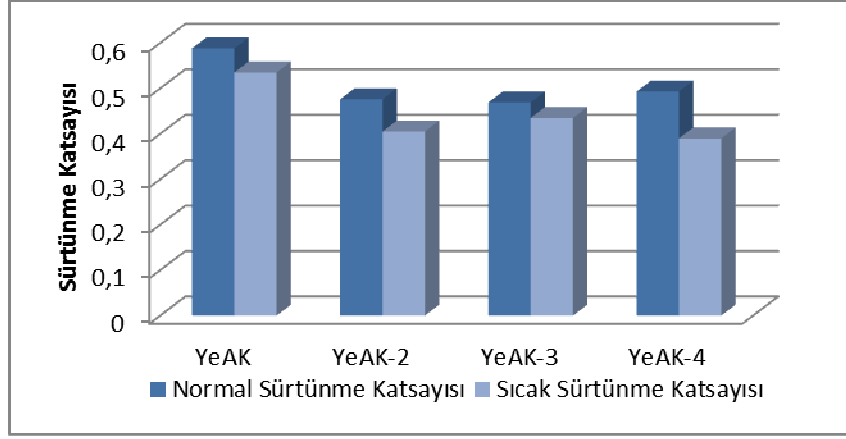
Çizelge 7.18 incelendiğinde grafit ve petrokok ilavesinin yanma kaybında artışı da beraberinde getirdiği anlaşılmaktadır. Yoğunluk değerleri 2 g/cm³'e yaklaşmıştır. Sertlikte YeAK'a kıyasla önemli bir artış yoktur ancak basma elastisite modülleri yükselmiştir.

Çizelge 7. 18 YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 numunelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Balata	Yoğunluk g/cm3	Sertlik HRL	Basma Elastisite Modülü MPa	İç Kesme Dayanımı MPa				Yanma Kaybı %
				Normal	Su	Tuzlu Su	Yağ	
YeAK-2	1,96	107	505	49	48	47	53	35,47
YeAK-3	2,01	109	532	46	48	41	53	34,32
YeAK-4	2,00	110	509	26	33	37	36	34,96

Çizelge 7. 19 YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 numunelerinin Chase testi sonuçları

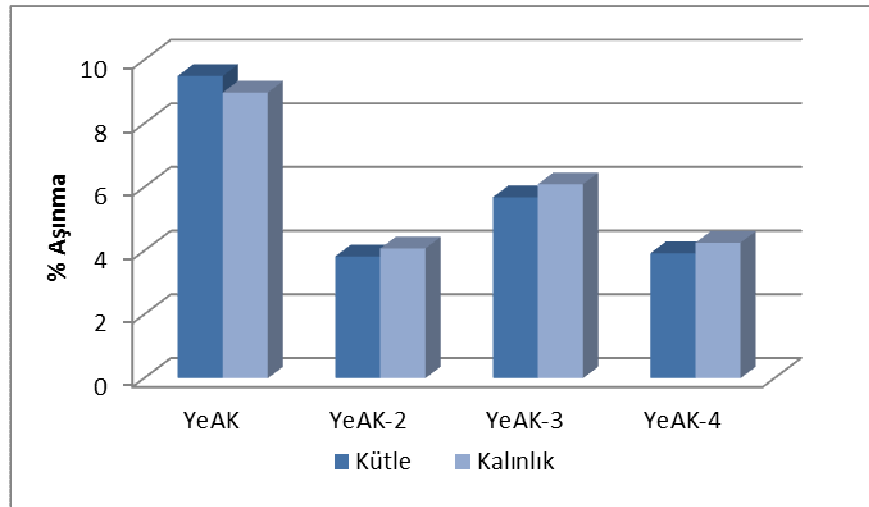
Balata	Sürtünme Katsayısı		Tür		Aşınma %	
	Normal	Sıcak	Normal	Sıcak	Kütle	Kalınlık
YeAK-2	0,476	0,405	G	F	3,83	4,08
YeAK-3	0,469	0,435	G	F	5,69	6,1
YeAK-4	0,493	0,390	G	F	3,93	4,26



Şekil 7. 25 YeAK, YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 sürtünme katsayısı değerleri

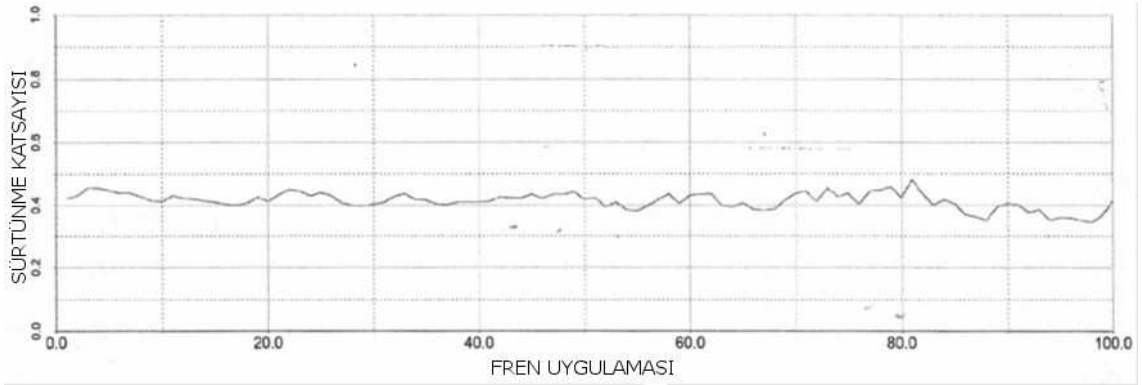
Chase testi sonuçları (Çizelge 7.19) bize toplamda kütlece %15’lik grafit ve petrokok ilavesinin normal ve sıcak sürtünme katsayılarını düşürdüğü göstermiştir. Herhangi bir yağlayıcı içermeyen YeAK numunesinin sürtünme katsayısı 0,588 iken, yağlayıcı ilavesi ile 0,476 değerine çekilmiş; bu bileşime çelik fiber takviyesinin yapılması (YeAK-3) da sürtünme katsayısını 0,469’a kadar düşürmüştür. Ayrıca normal ve sıcak sürtünme katsayısı arasındaki fark da en az YeAK-3 numunesindedir (Şekil 7.25), sıcaklık karşısında mevcut sürtünme özelliklerini koruması bakımından önemlidir. Ancak aşınma değerleri YeAK-2 ve YeAK-4’e göre yüksektir (Şekil 7.26).

YeAK-2’nin kompozisyonuna vermikülit ilavesi ile oluşturulan YeAK-4’ün normal sürtünme katsayısı yükselirken sıcak sürtünme katsayısında ise düşme vardır. Bu da sıcaklık karşısında sürtünme özelliklerinin korunması bakımından olumsuz yönde etki etmektedir (Şekil 7.25).

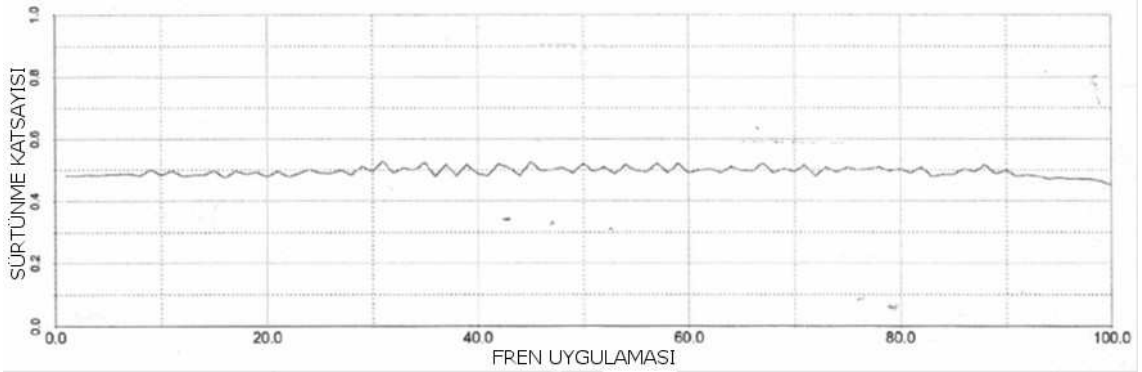


Şekil 7. 26 YeAK, YeAK-2, YeAK-3, YeAK-4 kütle ve kalınlıktaki aşınma değerleri

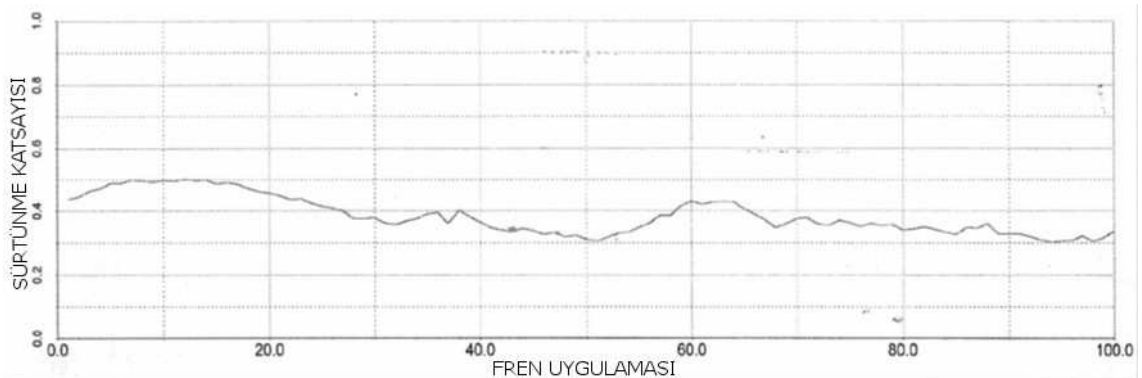
Numunelerin fren uygulamasına bağı olarak sürtünme katsayısı değişimlerini gösteren grafikler incelendiğinde en düzgün eğrinin çelik fiber takviyesinin yapıldığı YeAK-3 kodlu numunede olduğu görülmektedir. Çelik fiber ısı iletkenliğinin yüksek olması nedeniyle sürtünme ara yüzeyinde oluşan ısıyı absorbe etmektedir ve böylece ısı etkisiyle oluşan sürtünme katsayısındaki değişimler azalmıştır. Sürtünme katsayısının en düzensiz olduğu numune ise vermikülit ilavesi yapılan YeAK-4 numunesidir.



Şekil 7. 27 YeAK-2 numunesinin sürtünme davranışı

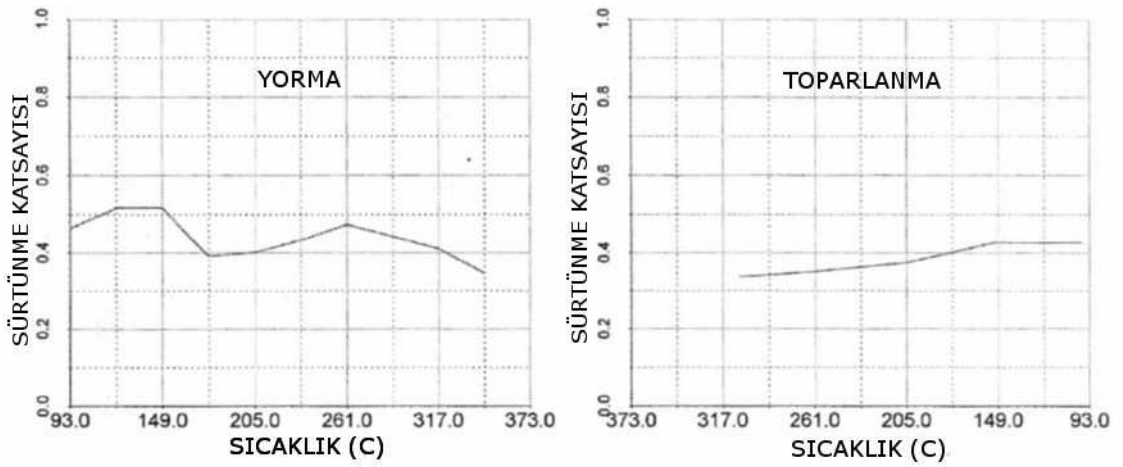


Şekil 7. 28 YeAK-3 numunesinin sürtünme davranışı

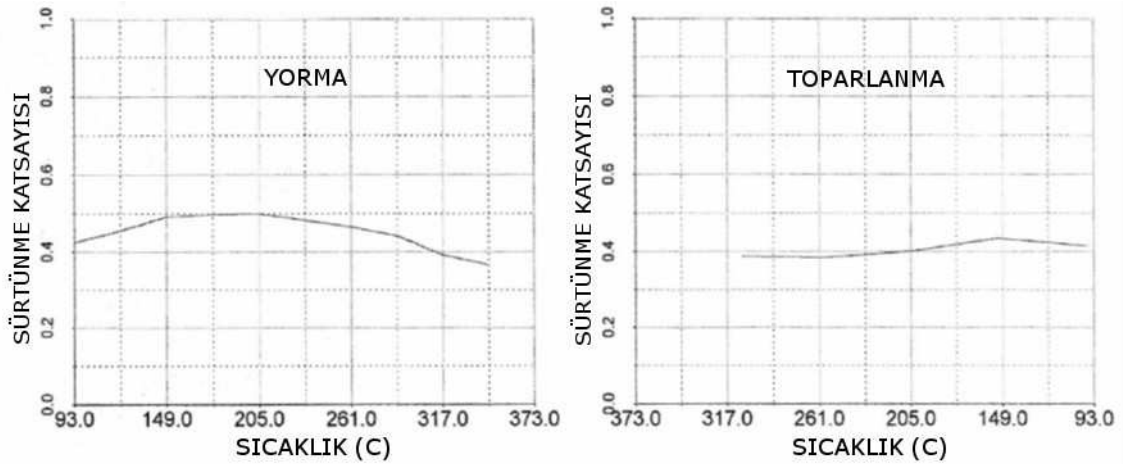


Şekil 7. 29 YeAK-4 numunesinin sürtünme davranışı

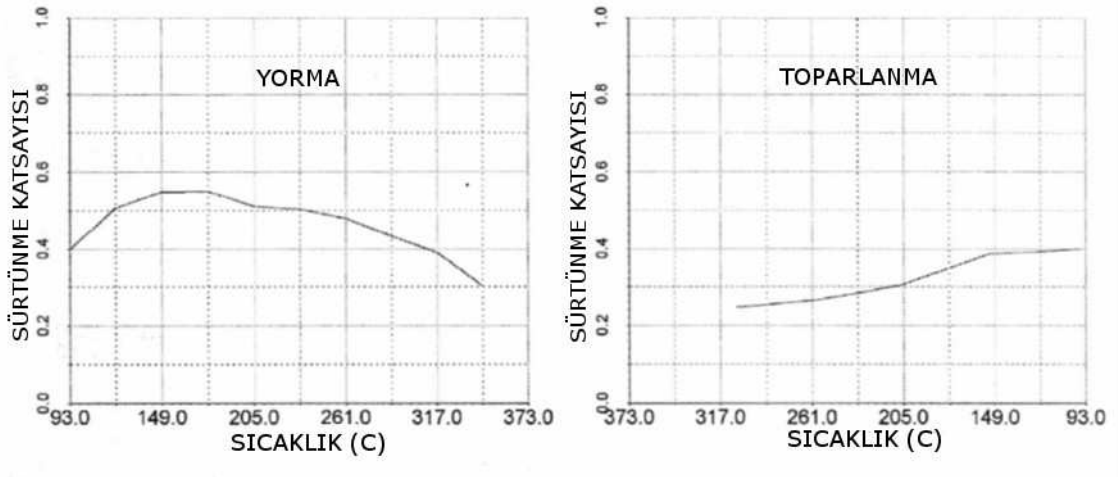
Numunelerin sıcaklık karşısındaki performansları incelendiğinde çelik fiber katkılı YEAK-3'ün en iyi yorma ve toparlanma değerlerini gösterdiği söylenebilir. 205 °C'de 0,5'ten düşmeye başlayan sürtünme katsayısı 345 °C'de 0,367'ye kadar düşme eğilimi gösterse de sıcaklığın tekrar azalmasıyla birlikte hemen toparlanma davranışı sergilemektedir. YeAK-2'de ise 150 °C'den sonra dengesizleşmiştir. Vermikülit katılan YeAK-4 numunesinin sürtünme katsayısı 0,551'den 0,303'e kadar düşmektedir.



Şekil 7. 30 YeAK-2 numunesinin yorma ve toparlanma davranışı

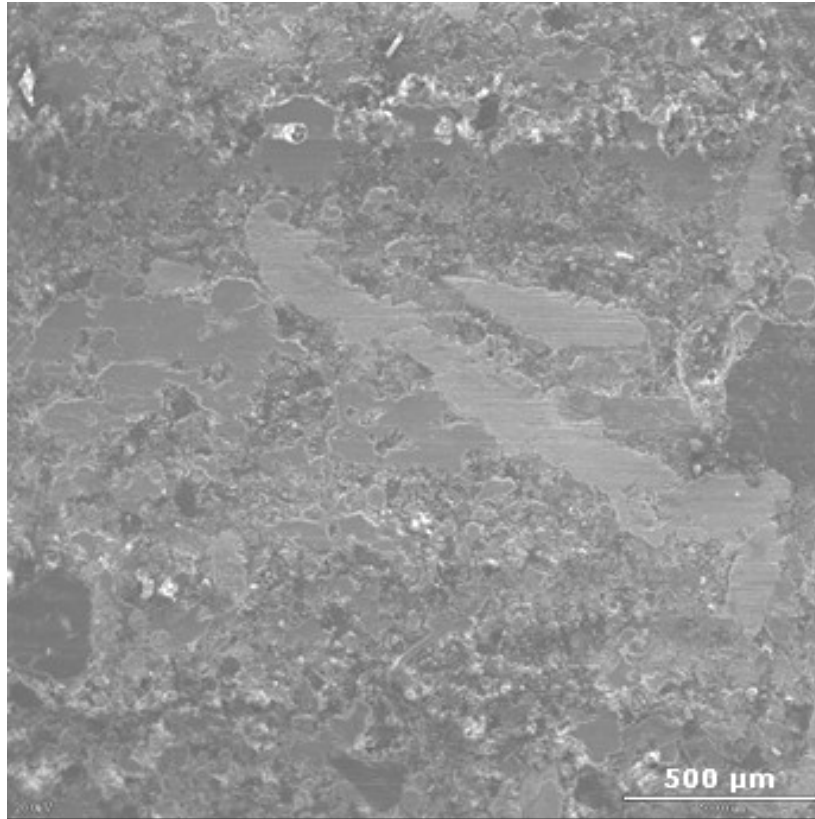


Şekil 7. 31 YeAK-3 numunesinin yorma ve toparlanma davranışı



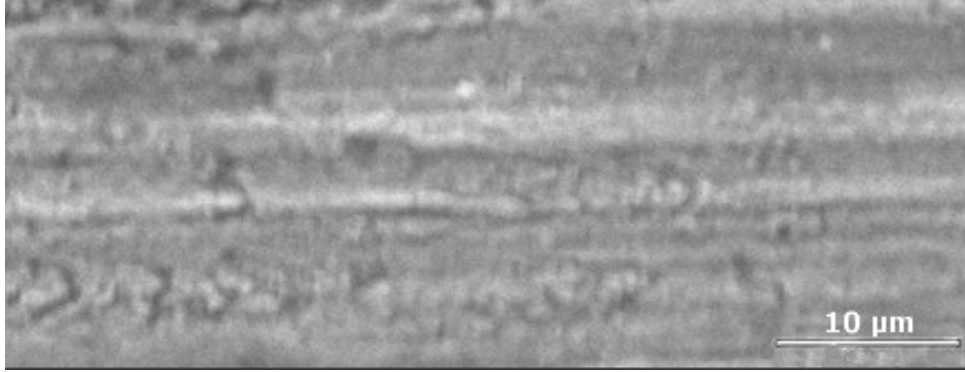
Şekil 7. 32 YeAK-4 numunesinin yorma ve toparlanma davranışı

YeAK-3 numunesinin aşınma yüzeyinin tarama elektron mikroskopunda ikincil elektronlar ile çekilmiş topografik görüntüsü Şekil 7.33'te verilmiştir. Aşınma yüzeyi üzerinde oluşan platolar görülmektedir. Bu platolar, daha alt yüzeyde kalmış aşınmış bölgelere göre daha pürüzsüzdür ve kayma bu temas noktaları üzerinden gerçekleşmektedir.



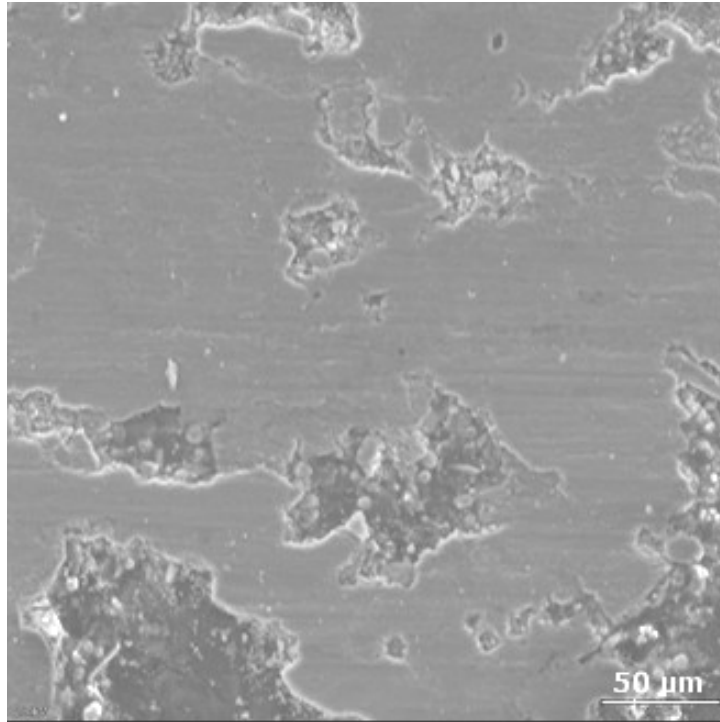
Şekil 7. 33 YeAK-3 numunesinin aşınma yüzeyi SEM görüntüsü

Kompozisyona katılan elik fiberler birincil plato olarak görev yapmaktadır. Şekil 7.33'te görülen elik fiberin yüzeyinden kayan partiküllerin oluşturduğu izler Şekil 7.34'tedir.

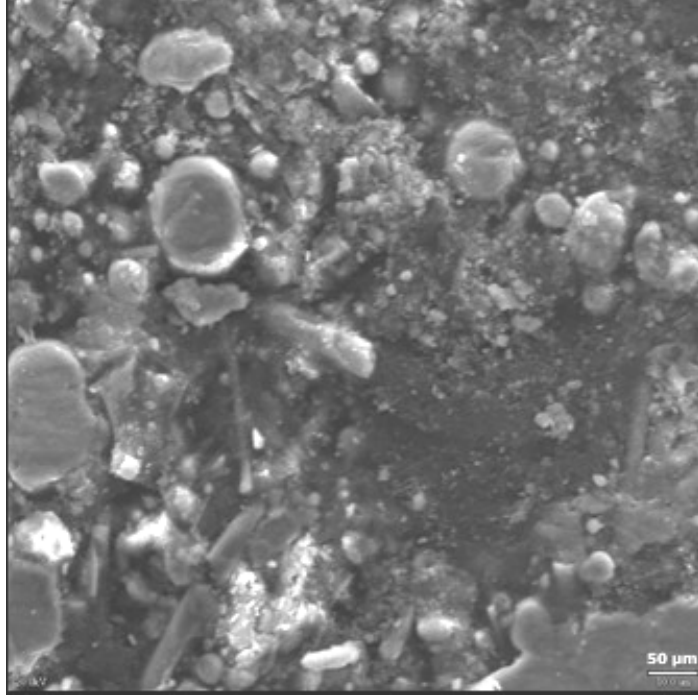


Şekil 7. 34 YeAK-3 numunesinde elik fiber üzerindeki aşınma izleri

AŞınma ara yüzeyine dağılan partiküllerin belli bölgelerde sıkışarak oluşturduğu ikincil platolar Şekil 7.35'te ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 7. 35 YeAK-3 numunesinin aşınma yüzeyinde oluşan ikincil platolar



Şekil 7. 36 YeAK-3 numunesinin aşınma yüzeyi

Platolara göre daha alçak bölgelerde kalan aşınma yüzeyleri oldukça kaba bir yapıya sahiptir. Matristen sıyrılan fiberler ve uçucu kül taneleri Şekil 7.36’de açık bir şekilde görülebilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Kütlece % 40-65 uçucu kül içeren kompozit fren balata numunelerinin homojen olarak üretilmesi pratikte küllerin ortalama tane boyutunun 100 μm ve altında olması ile mümkün olmuştur. Ortalama tane boyutu 100 μm 'nin üzerinde olan Seyitömer, Orhaneli, Afşin Elbistan A ve Soma termik santrallerinin uçucu külleri ile üretilen numunelerde karıştırma sırasında büyük partiküllerin yapıya tam olarak karışmama ve bundan dolayı kalıptan çıkarma sırasında matrinden ayrılarak gözeneklilik oluşturma gibi problemler meydana gelmiştir.

TG/DTA analizleri yapılan Yatağan, Tunçbilek, Kemerköy, Çatalağzı, Afşin Elbistan A küllerinde balataların maksimum çalışma sıcaklık aralığı olan 400-450 °C'de herhangi bir reaksiyon veya dönüşüm gözlenmemiştir.

Kimyasal içerik bakımından aynı termik santral için farklı dönemlerde alınan uçucu kül numunelerinde dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Bu da fren balatası üreticisinin belli bir termik santralden temin ettiği külleri kullanarak uzun bir süre aynı özelliklerde ürün üretebilmesini olanaklı hale getirmektedir.

Kütlece %40-65 uçucu kül ilavesi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri ticari balatalara göre daha yüksektir ve yoğunlukları daha düşüktür.

Kimyasal analizleri yapılan uçucu küllerden Tunçbilek, Çatalağzı, Seyitömer ve Orhaneli'nin SAF miktarları % 82,71-91,75; Yatağan, Çayırhan ve Soma'nın % 69,64-74,23 gibi yüksek değer aralıklarında olduğu görülmüştür. CaO miktarları ise % 1,6-19,5 gibi düşük ve orta aralıktadır. Kemerköy, Afşin Elbistan A ve Yeniköy'ün S+A+F miktarları %45,69-48,6 aralığında diğer küllere göre daha düşüktür. Ancak CaO

miktarları %30,04-35,2 olarak diğerlerine göre daha yüksektir. Kimyasal kompozisyon yönünden değerlendirildiğinde hepsinin fren balatalarında kullanılabileceği söylenebilir. Ancak hepsi dolgu olarak yüksek oranlarda kullanılmaya uygun değildir.

Aşınma oranları bakımından Yeniköy ve Kemerköy külleri ile üretilen numuneler daha düşük aşınma değerlerine sahiptirler. Bu termik santrallerin külleri yukarıda belirtildiği gibi incelenen uçucu küller içerisinde en düşük S+A+F oranına sahip olanlardır. Diğer küllerden ise daha düşük oranlarda katılarak yararlanılabilir.

Yeniköy Termik Santrali küllerinden oluşturulan kompozisyona kütlece toplamda %15 petrokok ve grafit ilavesi, sürtünme katsayılarını ve aşınma değerlerini düşürmüştür. Ticari fren balatalarının özelliklerine en yakın değerler bu kompozisyon (YeAK-2) ile elde edilmiştir. Kütlece %5'lik çelik fiber takviyesi (YeAK-3) normal ve sıcak sürtünme katsayısı arasındaki farkı azaltmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Chan, D. ve Stachowiak, G. W., (2004). "Review of Automotive Brake Friction Materials", IMechE, 218:953-966.
- [2] Blau, P. J., (2001). "Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives"
- [3] Ahmaruzzaman, M., (2010). A review on the utilization of fly ash, Progress in Energy and Combustion Science 36 (2010) 327–363
- [4] Malhotra, V. M., Valimbe, P. S. ve Wright, M. A., (2002). "Effects of Fly Ash and Bottom Ash on The Frictional Behavior of Composites", Fuel, 81:235-244.
- [5] Hee, K. W. ve Filip, P., (2005). "Performance of Ceramic Enhanced Phenolic Matrix Brake Lining Materials for Automotive Brake Linings", Wear, 259:1088-1096.
- [6] Mohanty, S. ve Chugh, Y. P., (2007). "Development of Fly Ash-Based Automotive Brake Lining", Tribology International, 40:1271-1224.
- [7] Dadkar N., Tomar B. S. ve Satapathy B. K., (2009). "Evaluation of flyash-filled and aramid fibre reinforced hybrid polymer matrix composites (PMC) for friction braking applications", Materials and Design, 30:4369-4376.
- [8] Sugözü, İ. ve Mutlu, İ, (2008). "Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme ve Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4:33-40
- [9] Österle, W, Kloß, H., Urban, I. ve Dmitriev, A. I., (2007). "Towards A Better Understanding Of Brake Friction Materials", Wear, 263:1189-1201.
- [10] Fillikçioğlu, C., (1998). Taşıt Frenlerinde Balata Çeşidinin ve Çalışma Şartlarının Frenleme Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [11] Demirsoy M., (1973). "Tanbur ve Disk Frenleri", Mühendis ve Makina, 17(192):49-56.
- [12] Ertan, R., (2008), Fren Balata Malzemelerinin Optimizasyonu ve Üretim Parametrelerinin Analizi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

- [13] Jang, H., Ko, K., Kim, S. J., Basch, R. H. ve Fash, J. W., (2004). "The Effect of Metal Fibers on The Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials", *Wear*, 256:406-414.
- [14] Kim, S. J., Cho, M. H., Lim, D. -S. ve Jang, H., (2001). "Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in The Automotive Friction Material", *Wear*, 251:1484-1491.
- [15] Satır, İ., (2006). Astbestsiz Taşıt Fren Balatalarının Kuru ve Yaş Sürtünme Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [16] Ertan, R. ve Yavuz, N., (2006). "Polimer Matriksli Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyon ve Üretim Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi", *Mühendis ve Makine*, 47(553):24-30.
- [17] Gurunath, P. V. ve Bijwe, J., (2007). "Friction and Wear Studies on Brake-Pad Materials Based on Newly Developed Resin", *Wear*, 263:1212-1219.
- [18] Marşoğlu, M., (1986). Plâstik Malzemeler, Arpaz Matbaacılık Tesisleri, İstanbul.
- [19] Kara, M., (1998). Alüminyum Oksitin Sürtünme ve Aşınma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [20] ASM International Handbook Comitee, (2001). ASM Handbook 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, USA
- [21] Bartz, W. J. ve Müller, K., (1972). "Investigations on The Lubricating Effectiveness of Molybdenum Disulfide", *Wear*, 20:371-379.
- [22] Cho, M. H., Ju, J., Kim, S. J. ve Jang, H., (2006). "Tribological Properties of Solid Lubricants (Graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) For Automotive Brake Friction Materials", *Wear*, 260:855-860.
- [23] Gao, N. F., Kume, S. ve Watari, K., (2005). "Zeolite-Carbon Composites Prepared From Industrial Wastes: (I) Effects of Processing Parameters", *Materials Science and Engineering A*, 399:216-221.
- [24] Özdemir, O., (2007). Uçucu Külün Yapı Malzemelerinde Bağlayıcılığa Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [25] Aruntaş, H. Y., (2006). "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 21(1):193-203.
- [26] TÜİK, (2008). Termik Santral Su ve Atık İstatistikleri 2000-2006, Yayın No:30, Ankara.
- [27] Yıldız, T., (1998). Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Değişik Kombinasyonlarda Kompozit Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [28] ASTM C 618, 2002, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM, West Conshohocken.

- [29] Aydın, O., (2007). Termik Santral Atığı Küllerin Yapı Tuğlası Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [30] Sugözü, İ. ve Mutlu, İ, (2009). “Fren Balatası Üretiminde Toz Karıştırma Süresinin Frenleme Karakteristiğine Etkisinin Araştırılması”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
- [31] Sugözü, İ., Yavuz, İ. ve Mutlu, İ., (2009). “Polimerik Kompozit Sürtünme Malzemelerinde Üretim Basıncının Performansa Etkisinin Araştırılması”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
- [32] Kim, S. J., Kim, K. S. ve Jang, H., (2003). “Optimization of Manufacturing Parameters for A Brake Lining Using Taguchi Method”, Journal of Materials Processing Technology, 139:202-208.
- [33] Motor Era, Dictionary of Automotive Terms, <http://www.motorera.com/dictionary/BR.htm>, 20 Mayıs 2012.
- [34] Göktan, A.G., Güney A ve Ereke, M., (1995). Taşıt Frenleri, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- [35] Ostermeyer, G. P. ve Müller, M., (2008). “New Insides Into The Tribology of Brake Systems”, IMechE, 222:1167-1200.
- [36] Boz, M. ve Kurt, A., (2006). “Toz Metal Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Performansı Üzerine Çinkonun Etkisi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 21(1):115-121.
- [37] Majcherczak, D., Dufrenoy, P. ve Berthier, Y., (2007). “Tribological, Thermal and Mechanical Coupling Aspects of The Dry Sliding Contact”, Tribology International, 40:834-843.
- [38] Ostermeyer, G. P., (2001). “Friction and Wear of Brake Systems”, Forschung im Ingenieurwesen, 66:267-272.
- [39] TS 555, (1992). Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Balatalar-Sürtünmeli Frenler İçin, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [40] TS 9073, (1991). Karayolu Taşıtları- Fren Sistemleri- Fren Balataları- İç Kesme Mukavemeti Deneyi, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [41] TS 9075, (1991). Karayolu Taşıtları- Fren Sistemleri- Fren Balataları- Su, Tuzlu Su, Yağ ve Fren Sıvısına Dayanım Deneyi, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [42] El-Tayeb, N. S. M. ve Liew, K. W., (2008). “Effect of Water Spray on Friction and Wear Behaviour of Noncommercial and Commercial Brake Pad Materials”, Journal of Materials Processing Technology, 208:135-144.
- [43] Eriksson, M., Jacobson, S., Tribological Surfaces of Organic Brake Pads, Tribology International, 33 (2000) 817–827.
- [44] Satapathy, B. K., Majumdar, A. ve Tomar, B. S., (2010). “Optimal Design of Flyash Filled Composite Friction Materials Using Combined Analytical

- Hierarchy Process and Tecnique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions Approach”, Materials and Design, 31:1937-1944.
- [45] Dadkar N., Tomar B. S., Satapathy B. K. ve Patnaik, A., (2010). “Performance Assessment of Hybrid Composite Friction Materials Based on Flyash-Rock Fibre Combination”, Materials and Design, 31:723-731.
- [46] Satapathy, B. K., Patnaik, A., Dadkar, N., Kolluri D. K., Tomar, S. B., (2011). “Influence Of Vermiculite On Performance Of Flyash-Based Fibre-Reinforced Hybrid Composites As Friction Materials”, Materials and Design, 32:4354-4361.
- [47] Satapathy, B. K., Majumdar, A., Jaggi, H. S., Patnaik, A., Tomar, B. S., (2011). “Targeted Material Design Of Flyash Filled Composites For Friction Braking Application By Non-Linear Regression Optimization Technique”, Computational Materials Science, 50:3145-3152.
- [48] TS 639, (1975). Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan, TSE, Ankara.
- [49] SAE J661, (1997). Brake Lining Quality Test Procedure, SAE International, USA.
- [50] TS 12464, (1998). Demiryolu Taşıtları-Fren Pabucu-Kompozit Malzemeli-Asbest İhtiva Etmeyen, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [51] TS EN 197-1, (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [52] Khulsey, Car Brake Illustrations, www.khulsey.com/car-brake-illustrations.html, 28 Mayıs 2012.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emre GÜMÜŞ
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.08.1987 / Bakırköy
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : gumusemre@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Pertevniyal Anadolu Lisesi	2005