

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EPOKSİ ESASLI POLİMERİK KAPLAMALARIN
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELİF TUĞÇE YALNIZ

DENİZLİ, TEMMUZ - 2022

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**EPOKSİ ESASLI POLİMERİK KAPLAMALARIN
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELİF TUĞÇE YALNIZ

DENİZLİ, TEMMUZ - 2022

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Elif Tuğçe YALNIZ

ÖZET

EPOKSİ ESASLI POLİMERİK KAPLAMALARIN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELİF TUĞÇE YALNIZ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. TEZCAN ŞEKERCİOĞLU)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2022

Polimer teknolojisinin gelişimi ile epoksi kaplamalar birçok uygulama alanı bulmuştur. Endüstriyel uygulamalarda epoksi kaplamaların aşınmaya karşı dirençli olması avantaj sağlamaktadır. Aşınmaya karşı dirençli yüzeyler elde etmek için çeşitli katkı maddeleri ile hazırlanmış epoksi kaplamalar kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında epoksi kaplamaların tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla farklı içeriklere sahip dört epoksi kaplama malzemesi kullanılarak, pim-disk deney düzeneği ile ASTM G99 standardına uygun deneyler yapılmıştır. Numuneler 5 N, 10N ve 15 N yükler altında 300 s 600 s ve 900 s kayma sürelerinde test edilmiştir. Aynı zamanda numunelere ait anlık sürtünme katsayıları ölçülmüştür. Deney sonrasında ise aşınma izleri mikroskop altında incelenmiştir. Epoksi 1 malzemesine kıyasla Epoksi 2 malzemesi, artan aşınma sürelerinde ve yüklerde daha iyi performans göstermiştir. Epoksi 1 malzemesini iyileştirmek adına ağırlıkça %10 ve %20 B₄C tozu ilavesi yapılarak Epoksi 3 ve Epoksi 4 malzemeleri oluşturulmuştur. Bu malzemeler incelendiğinde %10 B₄C katkısının uzun aşınma sürelerinde olumlu etkisinin olduğu, %20 B₄C katkısının ise epoksinin fiziksel yapısını bozduğu bu nedenle aşınma direncini düşürdüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, uzun aşınma sürelerinde ve artan yüklerde en az kütle kaybeden malzeme olarak Epoksi 2 olarak belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER:Epoksi Kaplama, Polimerik Kaplama, Aşınma Direnci, Pim-Disk, Epoksi Aşınması

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF EPOXY-BASED POLYMERIC COATINGS

MSC THESIS

ELİF TUĞÇE YALNIZ

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. TEZCAN ŞEKERCİOĞLU)

DENİZLİ, JULY 2022

With the development of polymer technology, epoxy coatings took place for many applications. It is advantageous that epoxy coatings are resistant to wear in industrial applications. Epoxy coatings that prepared with various additives are used to obtain wear-resistant surfaces. In this thesis, the tribological properties of epoxy coatings were investigated. For this purpose, using four epoxy coating materials with different contents, experiments were carried out in accordance with ASTM G99 standard with pin-disc test setup. The samples were tested under 5 N, 10N and 15 N loads at 300 s 600 s and 900 s sliding times. At the same time, instantaneous friction coefficients of the samples were measured. After the experiment, the wear marks were examined under the microscope. Compared to Epoxy 1 material, Epoxy 2 material performed better at increased wear times and loads. In order to improve the Epoxy 1 material, Epoxy 3 and Epoxy 4 materials were created by adding 10% and 20% B₄C powder by weight. When these materials were examined, it was observed that 10% B₄C additive had a positive effect on long wear times, while 20% B₄C solids deteriorated the physical structure of the epoxy, thus reducing its wear resistance. When the results obtained were evaluated, Epoxy 2 was determined as the material that lost the least mass at long wear times and increasing loads.

KEYWORDS: Epoxy Coating, Polymeric Coating, Wear Resistance, Pinon Disc, Epoxy Wear

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Özeti	2
2. KAPLAMALAR VE AŞINMA MEKANİZMALARI.....	14
2.1 Kaplamalar	14
2.1.1 Yüzey Kaplama Yöntemleri	14
2.1.1.1 Daldırma ile Kaplama	16
2.1.1.2 Elektrometal Kaplama.....	16
2.1.1.3 Emaye Kaplama	16
2.1.2 Polimerik Kaplama	16
2.1.2.1 Termoset Kaplama	17
2.1.2.2 Termoplastik Kaplama	18
2.1.2.3 Poliüretan Kaplama.....	18
2.1.2.4 Vinil Kaplama	19
2.1.2.5 Üretan Elastomer Kaplama	19
2.1.2.6 Kompozit Kaplama	20
2.1.3 Epoksi	21
2.1.3.1 Epoksi Kaplama	23
2.2 Aşınma Mekanizmaları	25
2.2.1 Adhesiv Aşınma.....	26
2.2.2 Abrasiv Aşınma	27
2.2.3 Yorulma Aşınması	28
2.2.4 Koroziyon Aşınma.....	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1 Deney Düzenegi	30
3.2 Numuneler	30
3.3 Deney Parametreleri	34
4. DENEY SONUÇLARI VE ANALİZ.....	38
4.1 Deney Sonuçları	38
4.2 Yüzey Görüntüleri	49
4.3 Sürtünme Katsayıları	51
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
6. KAYNAKLAR.....	55
7. ÖZGEÇMİŞ.....	59

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Yüzey kaplama yöntemleri.....	15
Şekil 2.2: Fabrika zemininde epoksi kaplama uygulaması.....	22
Şekil 2.3: PCB üzerinde epoksi ile kaplanmış kart ve elektronik parçalar.....	23
Şekil 2.4: Aşınmış pompa gövdesinin tamiratında kaplama uygulaması	23
Şekil 2.5: Kavite hasarlı çelik türbinin onarılması	24
Şekil 2.6: Boru dirseklerinde epoksi kaplama uygulaması	24
Şekil 2.7: Gemi pervanesinin epoksi kaplama ile tamirata	24
Şekil 2.8: Aşınma mekanizmaları.....	26
Şekil 2.9: Adhesiv aşınmaya maruz kalmış mil	27
Şekil 2.10: Abrasiv aşınmaya maruz kalmış makine elemanı	28
Şekil 2.11: Yorulma aşınması.....	28
Şekil 2.12: Korozif aşınmaya uğramış dişli.....	29
Şekil 3.1: Deney düzeneği	30
Şekil 3.2: Bilye tutucu	31
Şekil 3.3: Disk numunesi.....	31
Şekil 3.4: Deney düzeneği şematik gösterim.....	32
Şekil 3.5: Hazır disk numuneleri	34
Şekil 3.6: Epoksi 1 ile kaplanmış disk numunesinin aşınma görüntüsü.....	36
Şekil 3.7: Epoksi 2 ile kaplanmış disk numunesinin aşınma görüntüsü.....	36
Şekil 3.8: Epoksi 3 ile kaplanmış disk numunesinin aşınma görüntüsü.....	36
Şekil 3.9: Epoksi 4 ile kaplanmış disk numunesinin aşınma görüntüsü.....	37
Şekil 4.1: Zamana göre kütle kaybı değişimi (F=5 N)	39
Şekil 4.2: Zamana göre kütle kaybı değişimi (F=10 N)	43
Şekil 4.3: Zamana göre kütle kaybı değişimi (F=15 N)	45
Şekil 4.4: Kuvvete göre kütle kaybı değişimi (t=300 s)	46
Şekil 4.5: Kuvvete göre kütle kaybı değişimi (t=600 s)	47
Şekil 4.6: Kuvvete göre kütle kaybı değişimi (t=900 s)	48
Şekil 4.7: Epoksi 1 kaplanmış numunelere ait mikroskop görüntüleri.....	49
Şekil 4.8: Epoksi 2 kaplanmış numunelere ait mikroskop görüntüleri.....	49
Şekil 4.9: Epoksi 3 kaplanmış numunelere ait mikroskop görüntüleri.....	50
Şekil 4.10: Epoksi 4 kaplanmış numunelere ait mikroskop görüntüleri.....	50
Şekil 4.11: Zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi	52

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Epoksi 1'in mekanik özellikleri.	33
Tablo 3.2: Epoksi 2'in mekanik özellikleri	33
Tablo 3.3: Deney parametreleri.....	35
Tablo 4.1: Epoksi 1 için deney sonuçları (F=5 N)	38
Tablo 4.2: Epoksi 2 için deney sonuçları (F=5 N).....	39
Tablo 4.3: Epoksi 1 için deney sonuçları (F=10 N).....	40
Tablo 4.6: Epoksi 4 için deney sonuçları (F=10 N).....	42
Tablo 4.7: Epoksi 1 için deney sonuçları (F=15 N).....	44
Tablo 4.8: Epoksi 2 için deney sonuçları (F=15 N).....	44
Tablo 4.9: Epoksi 2 için deney sonuçları (F=30 N).....	46
Tablo 4.10: Sürtünme katsayısı ölçümleri	51

SEMBOL LİSTESİ

F	:	Sürtünme kuvveti (N)
N	:	Tepki kuvveti (N)
μ_k	:	Kinetik sürtünme katsayısı

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasına öncülük eden kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU' na teşekkürü bir borç bilirim.

Deneyleri gerçekleştirirken bana yardımcı olan Öğr. Gör. Ramazan Çağrı KUTLUBAY'a ve deneylerde kullanılan malzemeleri temin edilmesinde destek olan Weicon firmasından Mak. Müh. Eray KURUÇ'a çok teşekkür ederim.

Bu süreçte maddi-manevi desteklerini her zaman hissettiğim çok sevgili aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler.

1. GİRİŞ

Kaplamalar hayatımızın her alanında kullanılan önemli bir yöntemdir. Polimer teknolojisinin gelişmesi ile polimerik kaplamalarda önem kazanmıştır. Alışlagelmiş yöntemlere göre çeşitli avantajlar sağlayan polimerik kaplamaların gelişimi devam etmektedir. Polimerik kaplama yöntemlerinden biri olan epoksi kaplama ise tamirat uygulamalarından elektronik parçaların kaplanmasına kadar birçok uygulama alanı bulunan önemli bir yöntemdir. Epoksi kaplamaların aşınma direnci ise uygulandığı alanlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu sebeple epoksi kaplamaların tribolojik özelliklerini arttırmak amacı ile birçok çalışma yapılmıştır. Bu tez kapsamında polimerik kaplamalara yönelik gelişmeler incelenmiş, epoksi kaplamalar üzerinde durulmuştur. Epoksi kaplamaların aşınma direncinin arttırılmasına yönelik çalışmalar ışığında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Epoksi reçineler, mükemmel yapıştırma özelliğine sahiptir. Ayrıca, ısıya, neme, kimyasallara ve aşınmaya karşı oldukça dirençlidir. Bu avantajlarından dolayı epoksi reçineler inşaat sektöründe, elektronik parçalarda, otomotiv ve imalat sektöründe sıkça tercih edilmektedir. Epoksi reçinelerin en büyük kullanım alanı ise kaplama endüstrisidir.

Epoksi kaplamalar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak çeşitli uygulamalarda yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu anlamda epoksi reçinesinin içerisine eklenecek nanopartiküller ve katı yağlayıcılar ile bu ihtiyaç kolaylıkla giderilebilmekte, aşınmaya karşı oldukça dirençli malzemeler üretilebilmektedir.

Bu çalışmada sektörde oldukça yaygın kullanılan epoksi kaplamaların tribolojik özellikleri kapsamlı olarak incelenerek, kaplama materyali harici parametreleri de göz önünde bulundurarak aşınma davranışlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, endüstride yaygın olarak kullanılan epoksi kaplamalarının tribolojik özelliklerinin test edilerek incelenmesidir. Tez kapsamında, epoksinin türü, kuvvet ve aşınma süresi değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonrası aşınma direnci üzerinde etkili parametreler değerlendirilmiştir.

Epoksi kaplamanın aşınma direncinin iyileştirilmesi amacıyla eklenen katkı maddeleri ve katı yağlayıcılar hakkında detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Literatürden elde edilen bilgiler ve deney sonuçları ışığında, epoksi kaplamaların tribolojik özelliklerine etki eden faktörler irdelenerek aşınmaya dirençli kaplamaların üretilmesine katkı sağlamak amaçlanmaktadır.

1.2 Literatür Özeti

Symonds ve diğ. (1999) çalışmalarında, açık deniz petrolünde kullanılan su enjektör borularındaki polimerik kaplamalar, enjekte edilen sudan kaynaklanan korozyona karşı direnmesi, ancak daha da önemlisi, boruya hızla indirilen muayene aletlerinden kaynaklanan mekanik hasara direnmesi gerektiğini belirtmiştir.

Xu ve Mellor (2003) çalışmalarında kalsiyum silikat dolgu maddeleri içeren modifiye edilmiş bir novolak ve dolgu maddesi olarak alümina içeren modifiye edilmiş bir epoksi ve bir tür termoplastik kaplama olan floropolimer olmak üzere iki tip termoset polimerik kaplama kullanmışlardır. Disk-pim aparatındaki disk numunesi, yüzeyine dairesel bir tel halkasının gömülmesini sağlamak için değiştirilmiştir. Bu düzenleme, normal kuvvetin ve kayma mesafesinin, üç polimerik kaplamanın kablolu aşınma üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmıştır. Farklı uygulanan yükler altında ve farklı kayma mesafeleri için üç polimerik kaplama üzerinde kablolu aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

Xing ve Li (2004) tarafından yapılan çalışmada tek tip boyutlu mikron altı küresel silika parçacıkları ile doldurulmuş epoksi matrisli kompozitlerin aşınma davranışı araştırılmıştır. İki farklı boyutta silika partikülü sırasıyla 120 ve 510 nm

apında hazırlanmıř ve kompozit sistemlerde model dolgu maddesi olarak kullanılmıřtır. Disk-pim ařınma testleri ve SEM incelemeleri yapılmıřtır. Ařınma testi sonuçları, dolgu maddelerinin içeriđi nispeten dūřuk bir seviyede (ađırlıkça %0,5-4,0) olmasına rađmen kūresel silika parçacıklarının epoksi matrisinin ařınma direncini iyileřtirebileceđini gōstermiřtir. Daha kūuk boyutlu dolguların kompozitlerin ařınma direncini iyileřtirmede daha etkili olduđu gōrūlmūřtur.

Guang Shi ve diđ. (2004) tarafından yapılan bir çalışmada nano boyutlu Al_2O_3 parçacıklar ile doldurulmuş epoksi kompozitlerin kayma aşınma performansı incelenmiştir. Deney sonuçları, epoksinin sūrtūnme katsayısının ve aşınma oranının oldukça dūřuk nano- Al_2O_3 konsantrasyonunda azaltılabileceğini gōstermiřtir. Ayrıca parçacıkların ōn işlemleri bu olumlu etkiyi daha da arttırmıştır. En dūřuk spesifik aşınma oranı, $1,6 \times 10^{-6}$ mm³/Nm, hacimsel olarak %0,24 nano- Al_2O_3 'ye sahip kompozitler için gōzlenmiřtir.

Xiubing ve diđ. (2004) tarafından yapılan çalıřmada A36 elik numuneleri ile eřleřtirilmiř epoksi kompozit numunelerin ařınma testleri, M200 tipinde bir halka blok ařınma test cihazı ūzerinde gerçekleřtirilmiřtir. Ařınma testlerinden sonra elik numunelerin ařınmıř yūzeyleri XPS ve SEM ile incelenmiřtir. Sonuç olarak epoksi kompozitteki grafitin, sūrtūnme katsayısını etkili bir řekilde azaltabildiđini ve epoksi kompozitin ařınma direncini būyuk ōlde artırabildiđini gōstermiřtir. Sadece grafit sūrtūnme azaltıcı faz olarak kullanıldıđında sūrtūnme katsayısı 0,48'den 0,25'e dūřmūřtur. Hem grafit hem de MoS_2 kullanıldıđında ise sūrtūnme katsayısı 0,25, ařınma hacmi ise 0,5 mm'ye kadar dūřmūřtur.

Wetzel ve diđ. (2006) tarafından yapılan çalıřmada titanyum dioksit (TiO_2) veya alūminyum oksit (Al_2O_3) olmak ūzere deđiřen miktarlarda nanoparçacıklar içeren bir dizi nanokompozit ūzerinde kapsamlı bir çalıřma yapılmıřtır. Nanokompozitler, aglomeraların boyutunu kūūltmek ve epoksi reçinesi içinde tek tek nanopartikūllerin homojen bir dađılımını elde etmek için kontrollū bir dispersiyon iřlemi sırasında yūksek (kesme) enerjisi uygulanarak sistematik olarak ūretilmiřtir. Nanokompozitlerin mekanik performansı daha sonra eđilme testi, dinamik mekanik analiz (DMA) ve ayrıca kırılma mekaniđi yaklařımları (LEFM) ve yorulma çatlak būyūme testi (FCP) ile karakterize edilmiřtir. Numunelerin mikro yapısı ve ilgili

kırılma yüzeyleri, ilgili kırılma mekanizmalarını belirlemek ve polimer içindeki nanoparçacıkların dağılım kalitesi hakkında bilgi edinmek için TEM, SEM ve AFM teknikleri ile incelenmiştir. Epoksi içinde nanopartiküllerin varlığının çeşitli kırılma mekanizmalarını tetiklediği bulunmuştur. Aynı zamanda nanopartiküller, termomekanik özelliklerden ödün vermeden epoksinin sertliğini, mukavemetini ve tokluğunu aynı anda geliştirerek geleneksel sertleştiricilere alternatif olarak sunulmuştur.

Kim ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmada, yüzeyleri çok sayıda küçük oluklara sahip karbon epoksi kompozitlerin tribolojik davranışı, kuru kaydırma ve su ile yağlama koşulları altında kaplama yöntemine göre karşılaştırılmıştır. Yüzey kaplama malzemeleri, kendinden yağlamalı MoS₂ ve PTFE tozları ile karıştırılmış epoksi ve polietilendir. Bir SEM ile gözlemlenen kompozitlerin aşınma morfolojisi, yivli yüzey üzerinde kendi kendini yağlayan toz ile karıştırılan yüzey kaplama tabakasının, yüzey kaplama tabakası suyun nüfuz etmesini engellediği için su ile yağlama koşulu altında aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Kompozit yüzey ve kendi kendini yağlayan toz, kabarcık oluşumunu baskılayarak kaplama üzerindeki aşınmayı azaltmıştır.

McCook ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmada, kullanılan polimerik katı yağlayıcı kaplama, genişletilmiş bir PTFE/epoksi kompozittir. Kaplamalar, ara yüzey yorgunluğundan kaynaklanan kümülatif hasara maruz kalmaktadır ve sonuçta arızaya neden olan aşınma gerçekleşmektedir. Temas koşullarının bir sonlu eleman simülasyonu ve deneysel veriler kullanılarak, birleştirilmiş arıza modlarının sayısal analizi yapılmıştır. Modellemenin sonuçları, tasarımcılara kaplamaların ömrünün uzatılmasında dikkate alınması gereken hususlar hakkında fikir vermiştir. Kaplama kalınlığına karşı arıza döngüleri için deneysel veriler, kümülatif hasar modeline çok yakındır. Bu sonuç ayrıca, kaplamaların, pim üzeri disk deneysel koşulları altında öncelikle ara yüz yorgunluğundan kaynaklanan arıza yaşadığını göstermektedir.

Abenojar ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada, bor karbür (B₄C) ile doldurulmuş bir epoksi yapıştırıcının kürlenme süreci, aşınma davranışı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. İki farklı tane boyutu ve takviye miktarı test edilmiştir. Kürlenmiş takviyeli epoksinin viskoelastik özelliklerini ve camsı geçiş sıcaklığını (T_g) izlemek için dinamik mekanik termal analiz (DMTA) testleri de gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca alüminaya karşı aşınma direnci, kütle kaybı olarak değerlendirilen bir disk-pim deney düzeneği ile ölçülmüştür. Aşınma izleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. B₄C ile güçlendirilmiş epoksinin ana malzeme olan alüminayı aşındırdığı görülmüştür. Ayrıca, T_g değeri B₄C ilavesiyle azalmıştır.

Bello ve Wood (2009) tarafından yapılan çalışmada kablolu pürüzlerin dolgulu ve dolgusuz kaplamaların tribolojik performansı üzerindeki etkisini anlamak için çeşitli termoplastik ve ısıyla sertleşen polimerik kaplamalar üzerinde gerçekleştirilen kablolu aşınma çalışmasının sonuçlarını araştırmıştır. Çalışmada modifiye edilmiş bir pim-disk deney düzeneği kullanılmıştır. 80 mm yarıçaplı dairesel bir döngü oluşturmak için bir alüminyum diske gömülü 3,2 mm çaplı kaygan telden oluşan gerçek bir tribo-çift kullanılmıştır. 2,2 m/s'lik kayma hızı ve 150 N'luk bir yük, tipik kuyu içi kablolu aşınma koşullarını simüle etmek için seçilmiştir. Sonuç olarak doldurulmamış termoplastik kaplamanın en yüksek aşınma direncine sahip olduğu, doldurulmuş termoplastiklerin ise en kötü aşınma direncine sahip olduğunu görülmüştür. Kaplamaların performansının, matris malzemesinin (termoplastik veya termoset) kimyasal ve fiziksel doğasına bağlı olduğu bulunmuştur. Ek olarak dolgu maddesi konsantrasyonunun, şeklinin, tipinin ve boyutlarının, dolgulu kaplamaların aşınma hızı ve aşınma mekanizması üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Sonuç olarak dolgu şeklinin, boyutunun ve tipinin kaplamaların aşınma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu görülmüştür. Dolgu çekme, dolgu kırılması ve zayıf aşınma direnci gibi faktörler dolgu maddelerinin yük taşıma elemanları olarak görev yapmadaki yetersizliği nedeniyle, dolgulu kaplamaların bazılarının zayıf aşınma direncinden dolgu maddesinin sorumlu olduğu bulunmuştur.

Guoliang ve diğ. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, hem iyi iletkenliğe hem de yüksek aşınma direncine sahip bir kompozit kaplama elde etmek için, iletken grafit ve epoksi reçine içeren bir dizi kaplama tasarlanmıştır. İletken kaplamaların sızma kritik değeri (SCV), grafit / epoksi kompozit kaplamalar için sürekli faz ve dağılmış faz arasındaki dönüşümü tanımlamak için kullanılmıştır. SCV'den önce, kaplamalar sürekli faz olarak epoksi reçine ile yalıtılmıştır ve aşınma davranışı esas olarak epoksi reçinesinin lokal yapışkan parçalanması ile yapışkan aşınması ile karakterize edilmiştir. SCV'den sonra, kaplamalar iletkenlik göstermiştir ve yüzey direnci, grafit içeriğinin artmasıyla düzenli olarak azalmıştır. %50'lik grafit içeriğinde,

döküntülerin aktarılması ve dağılması arasındaki olası dinamik denge nedeniyle en düşük sürtünme katsayısına ve aşınma oranına yol açan optimal bir katı yağlayıcı film elde edilmiştir.

Sanes ve diğ. (2010) çalışmalarında, epoksi reçine içindeki iyonik sıvı (IL) ve ZnO nano parçacıklarının yeni dispersiyonları hazırlanmış ve SEM ve TEM ile karakterize edilmiş ve bunların termal ve dinamik mekanik özellikleri belirlenmiştir. ZnO nano parçacıklarının varlığı, epoksi reçinenin sertliğini arttırırken, IL fazının eklenmesi zincir hareketliliğini arttırmıştır ve plastikleştirici bir etki üretmiştir. Katkı maddelerinin epoksi reçinenin yapışkan ve aşındırıcı aşınması üzerindeki etkisini değerlendirmek için tribolojik performans sırasıyla disk-pim kayma testlerinde ve çoklu çizik testlerinde incelenmiştir. Disk-pim sisteminde, IL'nin eklenmesi, IL yağlayıcı etkisinden dolayı sürtünme katsayısını %50 ve aşınma oranını azaltmıştır. Çoklu çizik koşulları altında, viskoelastik geri kazanımdan sonra sadece ZnO ilavesi epoksi reçine üzerindeki çizik oluşunun derinliğini azaltmıştır.

Kanchanmai ve diğ. (2011), ağırlıkça %68,5 oranında ezilmiş silika parçacıkları (20 – 40 µm) ile doldurulmuş epoksi reçinenin kuru kayma aşınmasını disk-pim testleri kullanılarak değerlendirmişlerdir. Kayma hızının artmasıyla hacim kaybı artmıştır. Ayrıca aşınma süreci yüksek kayma hızlarında sıcaklığa bağımlı hale gelmiştir.

Basavarajappa ve Ellangovan (2012) tarafından yapılan bir çalışmada silisyum karbür ile doldurulmuş bir cam-epoksi (G-E) kompozitinin kuru kayma aşınma özellikleri bir disk-pim test cihazı kullanılarak incelenmiştir. Kompozitteki dolgu malzemelerinin hacim yüzdesi silisyum karbür için %5 ile %10 arasında değiştirilirken grafit %5'te sabit tutulmuştur. Böylelikle cam-epoksi içeren dolgularla mükemmel aşınma direnci elde edilmiştir ve üzerinde oluşan transfer filmi karşı yüzeyin doldurulmuş G-E'nin aşınma özelliklerini iyileştirmede etkili olduğu doğrulanmıştır.

Srinivas ve diğ. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, 20 µm boyutunda grafit ve 60 µm boyutunda silisyum karbür (SiC) parçacıklarının bir arada ve tekli takviyelendirilmesi ile aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Ağırlıkça toplam %10-%40 arası hazırlanan kompozitlerde en iyi sonucu toplamada %40

takviye içeren (%5 SiC+ %35 Grafit) hibrit kompozit vermiştir. Hibrit karışımlarda ise grafit oranının yüksek olması sonucu olumlu yönde etkilemiştir.

Amiriyan ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada, Fe₃Al ve TiC kompozit kaplamaların alümina karşı gövdeye karşı aşınma direnci üzerindeki TiC partiküllerinin etkisi araştırılmıştır. 0,04 ile 0,8 m/s arasında değişen kayma hızlarında ve 5 N sabit yük altında TiC ilavesinin kaplamaların kuru kayma aşınma oranlarına etkisi incelenmiştir. Saf Fe₃Al'den yapılan kaplamalar, nispeten yüksek bir aşınma oranı sergilemiştir. Bu Fe₃Al matrisinde artan TiC içeriği ile kaplamaların Vickers sertliği ve aşınma direnci artmıştır. Aşınma mekanizması, kayma hızına ve TiC parçacıklarının içeriğine güçlü bir şekilde bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Düşük kayma hızlarında %0,10 ve %30 TiC içeren kaplamaların baskın aşınma mekanizmasının yorulma aşınması olduğu, yüksek kayma hızlarında ise aşınma mekanizmasının oksidasyon olduğu görülmüştür.

Tahir ve diğ. (2016) çalışmalarında, bir hurma çekirdeği aktif karbon-epoksi (PKAC-E) kompozitinin tribolojik özellikleri üzerinde kayma mesafesi ve sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Tüm numuneler, 30 mm uzunluğunda 10 mm çapında pimler halinde oluşturulmuştur. Tribolojik testler, disk-pimli bir tribometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, aşınma hızı biraz artmasına rağmen, kayma mesafesi ile sürtünme katsayısı (COF) üzerinde önemli bir etki olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, çalışma sıcaklığı kritik bir sınırı aştığında, hem COF hem de aşınma oranı kayma mesafesi ile hızla artmıştır. Sentetik ve diğer tarımsal atık bazlı polimerik kompozit ile karşılaştırıldığında, PKAC-E, 90 °C'nin altındaki çalışma sıcaklığında en potansiyel kendi kendini yağlayan malzemelerden biri olarak kabul edilmiştir.

Qi ve diğ. (2016) tarafından epoksi kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınmasının standart yatak çeliği, orta karbonlu çelik ve krom kaplama gibi muadil malzemelere olan ilişkisi araştırılmıştır. Kısa karbon fiber (SCF) ve grafit ile doldurulmuş geleneksel kompozit, kroma sürtündüğünde en yüksek tribolojik performansı gösterirken, hibrit nanokompozit (SCF, grafit ve silika nanoparçacıklarla doldurulmuş epoksi polimer) standarda karşı, kayarken en düşük sürtünme ve aşınmayı göstermiştir. Nanopartiküllerin tribolojik performanstaki rolü, çeşitli muadil malzemelerle karşı karşıya geldiğinde belirgin şekilde farklıdır. Karşılık gelen

malzemelerin, aşınma ürünlerinin malzeme transferi, tribo-oksidasyon ve mekanik olarak karıştırılması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Abenojar ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, pirojenik silisin, genellikle formülasyonlarında bulunmayan epoksi reçineler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ağırlıkça %3 ve %5 olmak üzere iki farklı nano-silika yüküne sahip epoksi nanokompozitler üretilmiştir. Özellikle, çalışma nano-silika ilavesinin mekanik, aşınma ve kavitasyon üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Mekanik özellikler (sertlik, eğilme ve çekme mukavemeti), aşınma direnci (dökme ve kaplamada) ve kavitasyon erozyonu değerlendirilmiştir. Epoksi kütleme işlemi ve nano-SiO₂ ilavelerinin cam geçiş sıcaklığı (T_g) üzerindeki etkisi Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) ile incelenmiştir. Genel olarak, nano-silika ilavesi ile plastikleştirici bir etki gözlenmiştir. Ayrıca, kümülatif erozyon ve erozyon oranı açısından kavitasyon yoluyla erozyona karşı direnç, nanokompozitler için şeffaf reçineye göre daha yüksek ölçülmüştür.

Kumar ve diğ. (2017) tarafından yayınlanan bir çalışmada, grafen, grafit ve sıvı yağlayıcılar (baz yağ SN150 ve perfloropolimer) gibi dolgu maddeleri içeren epoksi kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Kompozit kaplamalar silindirik çelik yüzeye uygulanmış ve karşı yüzey olarak çelik bilya kullanılmıştır. Testler 10 N normal yük ve 0,63 m/s doğrusal kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Tüm kaplamalar arasında, grafen ve SN150 yağlayıcı ile doldurulmuş epoksi, 200.000'i aşan aşınma döngüsü ve $5,4 \times 10^{-7}$ mm³ /Nm'lik spesifik aşınma oranı ile 0,09 en düşük sürtünme katsayısını sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre grafen ve baz yağ SN150 içeren epoksi, en düşük sürtünme ve en yüksek aşınma ömrü sağlamaktadır.

Lan ve diğ (2018) tarafından yapılan çalışmada, ATSP bazlı kaplamaların kriyojenik koşullar altında – 160 °C kadar düşük sıcaklıklarda tribolojik performansı araştırılmıştır. Disk-pim deney düzeneğinde dökme demir üzerine kaplanmış polimerik kaplamaya karşı AISI 316 paslanmaz çelik bilye kullanılmıştır. Yapılan deneylerde, 110 MPa'lık bir ilk Hertz temas basıncı altında, ATSP kaplamalarının ölçülemeyen sıfır aşınma sergilediği ve azalan sıcaklıkla sürtünme katsayısının arttığı, –100 °C'de bir tepe değeri ile gösterdiği ve 139 MPa'lık daha yüksek temas basıncı altında, -160°C'de sürtünme katsayısının önemli ölçüde düştüğü bir geçiş noktası gözlemlenmiştir.

Rahsepar ve Mohebbi (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, mezopoöz 2-merkaptobenzotiazol (MBT) yüklü silika nanocontainers (SNC) epoksi kaplamanın aşınma direnci üzerindeki etki mekanizması araştırılmıştır. MBT yüklü SNC'lerin epoksi kaplamanın aşınma direnci üzerindeki etki mekanizmasını araştırmak için disk-pim aşınma testi, mikro sertlik ölçümü ve elektron mikroskopisi kullanılmıştır. Aşınma analizi sonuçları, MBT yüklü SNC'lerin varlığının kaplama mikro sertliğini arttırdığını ve ayrıca kaplama tabakasının sürtünme katsayısını azalttığını ortaya koymuştur ve böylece kaplamanın aşınma direncinde önemli bir iyileşme ile sonuçlanmıştır. Silika nanokaplayıcıların mevcudiyetinde nanokompozit kaplamaların üstün aşınma direncinin, mezopoz MBT-yüklü SNC'lerin takviye etkisi ve kendi kendini yağlama etkisine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Upadhyay ve diğ. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, kuru sürtünmeyi düşüren uygulamalar için epoksi matrisin kimyasal, fiziksel, termal ve tribolojik davranışının derinlemesine bir analizi amaçlanmıştır. Epoksi malzemeler ağırlıkça %1, %3 ve %5 ağırlık konsantrasyonunda Fullerene C ve çok duvarlı karbon nanotüpler aşınarak hazırlanmıştır. Test edilen dolgu epoksilerinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı 0,07 ile 0,29 arasında değişmiştir. Dolgu maddesi konsantrasyonunda ağırlıkça %5'e kadar artış, malzemenin tribolojik davranışına doğru önemli bir gelişme göstermiştir.

Madhanagopal ve diğ. (2018), epoksi kompozitin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını belirlemek için yağlanmayan koşullarda disk-pim aşınma testleri yapmışlardır. Üç farklı numune (%1, %2, %4), epoksi reçinesine dolgu ilave yüzdesi esas alınarak hazırlanmıştır. Deneyler temas basıncı ve hızının çalışma parametreleri değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu tribolojik veriler, sırasıyla 1198 m ve 2402 m'lik iki sabit kayma mesafesi için elde edilmiştir. Malzemenin aşınma davranışı, sürtünme katsayısı ve yük (1 kg, 2 kg ve 3 kg) ve hız (1 m/s, 2 m/s) koşullarına göre aşınma oranı için çizilen grafipler elde edilmiştir. Yük arttıkça bağlanma kuvvetinin düştüğü ve daha fazla kütle kaybı gözlemlenmiştir. Ayrıca özgül aşınma oranı 2,1'e ulaşmış ve karşılık gelen sürtünme katsayısı 0,38 olarak ölçülmüştür.

Avilés ve diğ. (2018) tarafından hazırlanan bir çalışmada, tribolojik performans yumuşak çelik AISI 1015 alt-tabaka üzerinde, epoksi reçinesi kaplanarak incelenmiştir. Hem tek katmanlı hem de çift katmanlı kaplamalar, spin kaplama ve

sertleştirme ile elde edilmiştir. Sonuçlara göre iyonik sıvı ve grafen, sade epoksi kaplamaya göre sürtünme katsayısını %60 azaltmış ve aşınmayı önlemiştir. Oleat protik iyonik sıvı ile çift katmanlı kaplama ise, aşınmayı önleyerek sürtünme katsayısını %70 azaltmıştır.

Cabrales ve diğ (2019) yaptıkları çalışmada çelik levhalar üzerinde elektrostatik olarak biriktirilen 100, 200 ve 300 mg/kg olmak üzere üç farklı miktarda ilave grafen oksit (GO) içeren polyester reçine kaplamaların tribolojik davranışını araştırmışlardır. Kontrol olarak ise GO içermeyen polyester reçine kaplama kullanılmıştır. Kaplamalar, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, atomik kuvvet mikroskobu ve raman spektroskopisi kullanılarak karakterize edilmiştir. Ek olarak, polyester reçine kaplamaların tribolojik davranışını değerlendirmek için disk-pim testi kullanılmıştır. Sonuç olarak grafen nanoparçacıklarının termal polimerizasyondan sonra elektrostatik olarak biriktirilen kaplamalar boyunca düzgün bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Tribolojik testler, polyester reçinesine dahil edilen GO miktarı arttığında, aşınma değerlerinin ve sürtünme katsayılarının arttığını göstermiştir. Bu sonuçlar, GO'nun kendi kendini yağlama özelliklerinin kaplamaların direncini iyileştirme üzerindeki faydalı etkisini göstermiştir.

Sharma ve diğ. (2020) tarafından, narenciye ve limon kabuklarının epoksi reçineye eklenmesi ile elde edilmiş epoksi kompozitlerin aşınma davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Reçinenin ağırlıkça %15'i olan narenciye limon kabuğu (CLP) dolgu maddeleri, üç farklı parçacık boyutunda reçineye eklenerek epoksi kompozitler hazırlanmıştır. Geliştirilen epoksi kompozitlerin kuru kayma aşınma davranışı, pim-disk tipi aşınma test makinesi kullanılarak analiz edilmiştir. Testler, 60 mm'lik bir ray yarıçapında ve 5000 m'lik sabit bir kayma mesafesi için gerçekleştirilmiştir. Her bileşimin aşınma davranışı, uygulanan normal yük (30 N, 40 N ve 50 N) ve kayma hızı (3 m/s, 4 m/s, 5 m/s) değiştirilerek deneysel olarak incelenmiştir. Farklı parçacık boyutlarına sahip geliştirilmiş kompozitler için sürtünme ve aşınma kaybı katsayısı kaydedilmiştir ve analiz edilmiştir. Sonuç olarak CLP dolgu maddelerinin epoksi matrisine dahil edilmesinin, geliştirilen kompozitlerin aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Maksimum aşınma direncinin ise 100-250 µm boyutundaki dolgu maddeleri ile gözlemlendiği görülmüştür.

Alvarez ve diğ. (2020) çalışmalarında, epoksi esaslı toz boyalara aşınma direncini arttırmak için ağırlıkça %1, 2 ve 3 olmak üzere farklı yüzdelerde SiO₂ eklemiştir. Modifiye edilmiş organik tozlar, karbon çelik yüzeylere elektrostatik tabanca ile uygulanmıştır. Kürleşmeden sonra, 5 N'da pistonlu aşınma ekipmanı kullanılarak ve sürtünme katsayısı (COF) ölçülerek kayma aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma mekanizması analiz edilmiştir, her bir izin genişliği ve derinliği, taramalı elektron mikroskobu ile ölçülmüştür. Aşınma sonuçları, nanoparçacıkların neden olduğu kaplamanın sertlik ve çizilme direncindeki artış ve süneklikteki azalma dikkate alınarak analiz edilmiştir. Oluşturulan kaplamalar, orta dereceli yükler altında çok küçük hasarla aşınmaya dayanmıştır ancak yük arttığında aşındırıcı yüksek sürtünme katsayısı göstermeye başlamıştır.

Bobby ve Samad (2020) tarafından yapılan çalışmada, dokusuz plazma ile işlem görmüş yumuşak çelik yüzeyler uygulanan bozulmamış epoksi kaplama sisteminin yük taşıma kapasitesi ilk olarak kuru kayma koşulları altında değerlendirilmiştir. Aşınma testleri, karşı yüzey olarak 6,3 mm çapında ve 62 HRC sertliğe sahip 440C dereceli sertleştirilmiş paslanmaz çelik bilye ile disk üzerinde bilye konfigürasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Epoxy-GO nanokompozit epoksi kaplamalar üretmek için saf epoksi matrisine değişen konsantrasyonlarda dolgu maddeleri ilave edilmiştir ve tribolojik değerlendirme yapılmıştır. Tribolojik testler, ağırlıkça %0,5 dolgu yüklemesinde nanoparçacıklarının eklenmesinin, bozulmamış epoksi sistemine kıyasla aşınma ömründe önemli bir iyileşmeye (~6,5 kat) yol açtığını ortaya koymuştur.

Taşyürek ve Düzcükoğlu (2021) tarafından yapılan çalışmada epoksi reçineye bor karbür (B₄C) partiküllerinin eklenmesinin kuru kayma aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Test numunelerinin üretilmesi için B₄C'nin 5 ve 10 ağırlık yüzdeleri homojen bir şekilde epoksi reçinesine eklenmiştir. Takviyeli kompozit numunelerin tribolojik özellikleri, saf epoksi reçinenin özellikleri ile karşılaştırılmıştır. ASTM G-99'a göre aşınma testleri yapılmıştır. Testler 5, 10 ve 15 N olmak üzere üç farklı yük altında, 0,8, 1 ve 1,2 m/s'lik üç farklı hızda ve 750, 1000 ve 1200 m'lik üç farklı kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Testlerin tamamı, oda sıcaklığında kuru koşullar altında gerçekleştirilmiştir. B₄C partiküllerinin aşınma mekanizmaları üzerindeki etkisini değerlendirmek için metalurjik incelemeler yapılmıştır. Test

numunelerinin sürtünme yüzeyleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Tribolojik özelliklere en çok etki eden parametre B₄C oranı olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak epoksi reçineye bor karbür takviyesinin eklenmesiyle aşınma direncinin arttırılması sağlanmıştır.

Jakab ve diğ. (2021) tarafından hazırlanan bir çalışmada, dolgu maddelerinin aşınma azaltıcı mekanizmalarını etkileyen faktörleri belirlenmiştir. Çalışma pim-disk deneyi ve bir taber aşındırıcı aygıtı üzerinde gerçekleştirilen aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir. Politetrafloroetilen (PTFE), polietilen (PE) ve florlu etilen propilen (FEP) gibi polimer dolgu maddeleri içeren formülasyonlarda , kendi kendini yağlama özelliğinden dolayı aşınma oranında önemli bir düşüş kaydedilmiştir. Silikanın parçacık boyutu (SiO₂) ve dolgu maddelerinin önemli bir rol oynadığı, kaba partiküllerin reçine/dolgu ara yüzeyindeki bağ nedeniyle aşınma oranını azalttığı bulunmuştur. Tüm dolguların aşınma direncini arttırmaya yardımcı olmadığı gösterilmiş ve daha düşük partikül boyutuna sahip SiO₂ dolgu maddelerinin malzemede süreksizliklere neden olarak epoksi kaplamanın aşınma direncini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.

Kan ve Chang (2021) tarafından yapılan çalışmada, hibrit polimer nanokompozitlerin kayma aşınma davranışı, farklı yükleme koşulları altında ve farklı karşı yüzey pürüzlülüğüne karşı incelenmiştir. Tribo-dolgu maddesi olarak klasik mikro boyutlu kısa karbon fiber ve grafit pulları ile iki farklı polimer matrisi, epoksi ve poliamid 66, TiO₂ takviyeli nanopartiküller ile ve bunlar olmadan incelenmiştir. Nanopartiküller ve mikro boyutlu dolgu maddeleri arasındaki sürtünme ve aşınma performansı üzerindeki etkinin, ilgili tribolojik sisteme bağlı olduğu bulunmuştur. Özellikle epoksi bazlı kompozitler için TiO₂'nin dahil edilmesi yalnızca yeterince pürüzlü bir diske karşı fayda göstermiştir. Poliamid nanokompozitler için, nanoparçacıkların ve diğer dolgu maddelerinin kombinasyonu, özellikle daha yüksek uygulanan temas basınçlarında, hem pürüzlü hem de pürüzsüz disklere karşı düşük sürtünme ve aşınma ile sonuçlanmıştır.

Medabalimi ve diğ. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, NiCrBSiFe ve NiCr tozları, alev püskürtme işlemi kullanılarak kısmen oksitlenmiştir ve bir plazma püskürtme işlemi kullanılarak MDN321 çelik alt tabaka üzerinde biriktirilmiştir. Kısmi oksidasyonun kaplamaların mikroyapısı, mikrosertliği, yoğunluğu, bağ

mukavemeti ve gözenekliliği üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Kaplamaların sürtünme ve aşınma davranışı, değişen yükler (10, 20 ve 30 N), kayma hızları (1, 2 m/s) ve sıcaklıklar (RT, 200, 400 ve 600) ile bir disk-pim tribometre kullanılarak değerlendirilmiştir. NiCrBSiFe ve NiCr kaplamaların aşınmış yüzeylerinde SiO₂, NiO, Cr₂O₃ ve NiCr₂O₄ oksit fazlarından oluşmuştur. Bu fazlar, 600 °C'de kaplanmamış çeliklere kıyasla kaplamalı çeliklerde aşınma oranının beş kat azaltılmasına katkıda bulunmuştur. Kaplamadaki aşınma hızı sıcaklık artışı ile azalmıştır. Ayrıca sürtünme katsayısı, kaplamalar ve alt tabakadaki sıcaklıkla kademeli olarak azalmıştır. Ek olarak NiCr kaplamanın aşınma oranı katsayısı, NiCrBSiFe kaplamadan 1,7 kat daha yüksek ölçülmüştür.

B₄C bilinen en sert malzemelerden biridir. Yüksek sertlik, iyi korozyon direnci, termal ve kimyasal kararlılık gibi özelliklerinden ötürü birçok uygulama alanı bulmaktadır. Yüksek sertliğinden dolayı yüksek aşınma direncine sahiptir. Bu nedenle aşındırıcı toz olarak ve elektronik parçalarda koruyucu kaplama olarak kullanılır. Bu özellikleri değerlendirildiğinde epoksi kaplamalara katkı maddesi olarak eklenmesinin, kaplama malzemesinin aşınma direncine etkisinin nasıl olacağı araştırılmıştır.

Yapılan literatür taramasından yola çıkılarak, 300, 600, 900 s aşınma sürelerinde ve 5, 10 ,15 N olmak üzere üç farklı yük durumunda iki temel epoksi kaplamanın davranışları incelenmiştir. Ek olarak aşınma direncini iyileştirmek adına literatürden elde edilen bilgiler ışığında B₄C katkısı eklenmiştir. Kütlece %10 ve %20 B₄C ilave edilmiş malzemelerle temel iki epoksi kıyaslanmıştır.

2. KAPLAMALAR VE AŞINMA MEKANİZMALARI

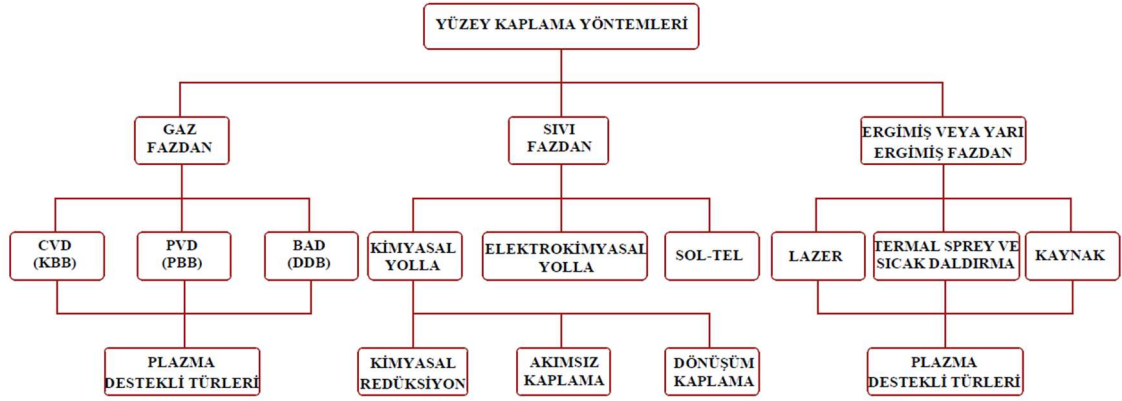
2.1 Kaplamalar

Kaplama işlemi, ile bir malzeme yüzeyinin çeşitli avantajlar sağlaması amacı ile başka bir malzeme ile kaplanmasıdır. Kaplanan malzemenin yüzeyinin fiziksel veya kimyasal özelliklerini değiştirmek için uygulanabilir. Kaplamalar, yüzey bitirme teknikleri ekleme ve değiştirme olarak sınıflandırılır. Uygun kaplama yöntemleri kullanılarak alt tabakaların yüzeyleri üzerinde geliştirilebilirler. Uygulama talebine bağlı olarak yüzey kaplamaları bir malzemenin estetik çekiciliğini iyileştirebilir, yüzeyi daha pürüzsüz hale getirebilir veya korozyon ve aşınmaya karşı direnç sağlayabilir. Kaplama işleminin uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir:

- Elektronik parçalarda kullanılan kaplamalar,
- Aşınmaya dayanıklı kaplamalar,
- Korozyona dayanıklı kaplamalar,
- Optik amaçlı kaplamalar,
- Dekoratif amaçlı kaplamalar.

2.1.1 Yüzey Kaplama Yöntemleri

Kaplama işlemi yüzey kaplamaları ve yüzey sertleştirme işlemleri olarak iki ana grupta incelenebilir. Yüzey sertleştirme işlemlerine örnek olarak karbürleme, sementasyon, nitürleme gibi işlemler gösterilir. Yüzey kaplamaları ise bir malzemenin üzerine başka bir malzemenin çöktürülmesi işlemidir. Yüzey kaplamaları ise kaplanacak malzemenin cinsine göre üç grupta incelenebilir. Bunlar gaz fazdan, sıvı fazdan ve ergimiş veya yarı ergimiş fazdandır. Bu üç gruba ait kaplama teknikleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Yüzey kaplama yöntemleri

Dökme malzemenin yüzeyinde kaplamaların biriktirilmesi, dökme malzemeye ek özellikler sağlamak, özellikle işlevselliğini geliştirmek ve hizmet ömrünü uzatmak için çok yönlü, ekonomik ve etkili bir stratejidir. Tüm termal biriktirme teknikleri arasında, soğuk püskürtme, parçacıkların erime noktalarının altında biriktirildiği tek tekniktir ve bu nedenle, bir katı hal işleme tekniğidir. Soğuk püskürtme ile üretilen kaplamalar, diğer yöntemlerle üretilen kaplamalardan farklı özellikler sergiler; bu, soğuk püskürtmeyi onarım ve hatta bağımsız bileşenlerin üretimi için rekabetçi bir teknik haline getirebilir (Poza 2022).

Plazma püskürtmeli alüminyum oksit kaplamalar esas olarak mekanik uygulamalarda aşınmaya dayanıklı bir kaplama olarak kullanılır. Önceki çalışmalar, bu kaplamaların hem aşınma direncinin hem de korozyon direncinin, bir sızdırmazlık işlemi uygulanarak önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. Bu iyileşmenin temel olarak işlem sonrası süreçte meydana gelen mikroyapısal değişikliklerden kaynaklandığı bildirilmiştir (Liscano 2005).

Grafen, olağanüstü fiziksel, elektriksel, optik ve mekanik özellikleriyle bilim camiasını büyüleyen bilinen son karbon allotropidir. Bu iki boyutlu, atomik olarak ince ve bilinen en güçlü malzeme, yüzey kaplamaları alanında muazzam bir endüstriyel potansiyele sahiptir. Bu bölümde ele alınan grafen bazlı kaplamalar alanı, yansıma önleyici ve kendi kendini temizleyen etkiye sahip, kendi kendini yağlayan ve aşınma direnci yüksek, korozyon önleyici, yangın geciktirici, biyolojik kirlenme önleyici ve kirlenme adsorpsiyon ve antibakteriyel uygulamalar için sert kaplamaları içerir (Nine 2021).

2.1.1.1 Daldırma ile Kaplama

Kaplanacak yüzey alanı çok büyük ise genellikle tercih edilen yöntem daldırma ile kaplamadır. Bu yöntemde kaplanacak malzeme, sıvı olan kaplama malzemesine daldırılır. Daldırma ile kaplamada kaplama kalınlığı fazla olabilir ve karmaşık şekilli parçaların kaplanmasında büyük kolaylık sağlar. Örneğin ergime sıcaklığı düşük olan çinko kaplama malzemesi olarak seçilir. Galvanizleme olarak da adlandırılan bu yöntem büyük yüzey alanlarının ekonomik olarak kaplanmasına olanak sağlamaktadır.

2.1.1.2 Elektrometal Kaplama

Elektrometal kaplama işlemi elektrolitik olarak metal kaplama olarak da adlandırılabilir. Bu işlemde bir çözelti içerisinde çözülmüş olarak bulunan metal iyonları elektrik akımı yardımıyla malzeme yüzeyine kaplanabilmektedir. Bu yöntemde kaplama tabakası çok ince ve homojen olabilmektedir. Elektrolitik olarak bakır, çinko, nikel ve krom gibi çeşitli metaller kaplanabilmektedir.

2.1.1.3 Emaye Kaplama

Emaye, metal, cam veya seramik eşya üzerinde koruyucu veya dekoratif kaplamada kullanılan camsı, ve genellikle opak bir maddeyi ifade eder. Emaye malzemeleri korozyondan korur. Emayeden yapılan kaplamalar, çeliği korozyondan korumak için büyük bir potansiyele sahiptir. Bazı inorganik oksitlerden oluşturulan emayenin yüzeye uygulandıktan sonra fırınlanması ile emaye kaplama elde edilmektedir. Emaye kaplama kokuyu emebilen, tat olarak nötr ve aynı zamanda hijyenik bir malzemedir. Bu sebeple mutfak eşyalarında sıklıkla kullanılır.

2.1.2 Polimerik Kaplama

Polimerik kaplamalar çevresel ve mekanik etkilere karşı metalik yapıların korunması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplamalar koruyucu olarak

kullanılmalarının yanında, dekoratif veya fonksiyonel amaçlarla yüzeylere uygulanabilir, ancak çoğu durumda amaç bunların bir kombinasyonudur.

Polimerik kaplamalar çoğunlukla dört temel bileşenden oluşur; matris (reçine), pigment, çözücü ve katkı maddeleri. Kaplamalar, kaplama bileşiminde kullanılan matrisin adıyla ifade edilirler. Metalik yüzeylerin kaplanmasında yaygın olarak kullanılan polimerik reçineler arasında; epoksi, akrilik, alkit, vinil ve poliüretan sayılabilir.

2.1.2.1 Termoset Kaplama

Termoset kaplama, güçlü kimyasal bağlarla birbirine yüksek oranda çapraz bağlanmış polimer hatlarından oluşan ve metalik yüzeyler üzerinde ince koruyucu tabakalar oluşturmak için kullanılan koruyucu bir kaplama maddesidir. Termoset kaplamalar, sıradan termoplastiklerden daha yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Korozyon ve diğer bozulma biçimlerini önlemek için termoset kaplamalar kullanılmaktadır.

Petrol endüstrisinde su enjektörleri gibi kuyu içi boruların deliklerinde kaplama olarak termoset ve termoplastik polimerik malzemeler kullanılmaktadır. Önceki çalışmalar, bu tür kaplamaların, darbe hasarı ve inceleme araçlarını borunun altına indirmek için kullanılan telden kaynaklanan aşınma nedeniyle başarısız olabileceğini göstermiştir. Tel genellikle "kaygan çizgi" olarak adlandırılır ve aşınma tipine "kablo aşınması" denir. Bununla birlikte, kablolu aşınma koşulları altında termoset ve termoplastik polimerik kaplamaların farklı aşınma mekanizmaları açıklığa kavuşturulmamıştır. Kalsiyum silikat, kalsiyum florür gibi dolgu malzemeleri ve alümina, matris malzemelerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için genellikle polimerik kaplamalara eklenir. Bununla birlikte, dolgu maddeleri, şekil, konsantrasyon ve dolgu maddesi ile matris malzemesi arasındaki sınır koşulu gibi dolgu malzemesinin özelliklerine bağlı olarak, polimerik kaplamaların aşınma direncini iyileştirebilir veya aşınma hızını artırabilir (Xu 2003).

2.1.2.2 Termoplastik Kaplama

Termoplastik kaplama, kurutma sırasında kimyasal olarak reaksiyona girmeyen bir kaplamadır. Bunun yerine kaplama, ısı kullanılarak alt-tabakaya kaynaştırılır.

Termoset kaplamalar genellikle toz halinde bulunur. Kaplama partikülleri veya metalin yüzeyi önce istenen sıcaklığa ısıtılır. Ardından gelen soğutma işlemi, kaplamanın sertleşmesine ve mukavemet kazanmasına neden olur.

Termoplastik kaplamaların en belirleyici özelliklerinden biri, yeniden ısıtılabilmeleri, yeniden eritilebilmeleri ve yeniden katılaştırılabilmeleridir. Termoplastik kaplamalar, bileşimlerinde veya mukavemet özelliklerinde önemli bir değişiklik olmaksızın yeniden ısıtılabilirdiğinden, yeniden işlenebilir ve yüzey boyunca yeniden dağıtılabilir. Bu, kaplama uygulayıcılarının ilk uygulama sırasında oluşmuş olabilecek kusurları ortadan kaldırmasını sağlar. Termoset olmayan kaplamalar ise yeniden ısıtıldığında yanar ve bu nedenle yeniden işlenemez ve tekrar uygulanamaz.

2.1.2.3 Poliüretan Kaplama

Bir poliüretan kaplama, bir malzemenin yüzeyine, onu korumak amacıyla uygulanan bir poliüretan tabakasıdır. Bu kaplamalar, alt tabakaları korozyon, hava koşullarına maruz kalma, aşınma ve diğer bozulma süreçleri gibi çeşitli kusurlardan korumaya yardımcı olur.

Poliüretanın kendisi, karbamatlar olarak bilinen kimyasal bir bileşik grubuna bağlı bir polimer türüdür. Bu polimer malzeme aynı zamanda doğada ısıyla sertleşir; yani ısıtıldığında erimek yerine yanar. Poliüretan kaplamaların bir diğer özelliği de özelleştirilebilir olmasıdır. Bu kaplamalar parlak, sessiz, opak veya şeffaf olacak şekilde formüle edilebilir.

Poliüretan kaplamalar görsel olarak diğer kaplamalara özellikle epoksi kaplamalara benzer görünse de onları belirli durumlar için ideal kılan birkaç farklı özelliğe sahiptirler. Poliüretan kaplamalar nispeten dayanıklı olmakla birlikte, epoksi

muadillerine göre daha yumuşak ve daha elastiktir. Bu dayanıklılık aynı zamanda onları aşınmaya karşı daha dayanıklı ve ezik ve çizilmelere karşı daha az eğilimli hale getirir. Geliştirilmiş elastikiyet aynı zamanda poliüretan kaplamaların şekillerini ve mekanik özelliklerini -1°C 'den daha düşük sıcaklıklarda koruyabileceği anlamına gelmektedir.

2.1.2.4 Vinil Kaplama

Vinil kaplama, sentetik reçine veya plastikten oluşan bir kaplama türüdür. Esas olarak özelliklerini geliştirmek ve nesnenin çevresiyle reaksiyona girmesi nedeniyle yüzey bozulmasına karşı koruyucu bir bariyer oluşturmak için bir nesnenin yüzeyine bırakılan veya uygulanan ince bir koruyucu kaplama maddesi tabakasıdır. Vinil kaplamalar, polivinil asetat veya polivinil klorür gibi çeşitli reçine formlarından oluşabilir. Vinil kaplamaların avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Aşınma ve çizilme direnci,
- Ateşe ve ısıya dayanıklılık,
- Elektrik yükünün akışına karşı yalıtım,
- Sızdırmazlık yeteneği ve ıslanabilirlik,
- Geliştirilmiş fiziksel görünüm ve estetik,
- Korozyon direnci,
- Genel aşınma, erozyon, çukurlaşma ve kaviteasyona karşı direnç,
- Geliştirilmiş fiziksel görünüm ve estetik.

2.1.2.5 Üretan Elastomer Kaplama

Üretan elastomer kaplama, boya olarak uygulanabilen bir elastomerik poliüretan formülasyonudur. Üretan elastomer kaplamalar, aşınma direnci, kimyasal direnç, yırtılma mukavemeti, neme direnç ve sıcaklık uyumluluğu gibi elastomerik

poliüretanın özelliklerinin istendiği yüzeyleri korumak için kullanışlıdır. Üretan elastomer kaplamaların altında yatan polimerik yapı, polimeri oluşturmak üzere reaksiyona giren izosiyanat ($RN=C=O$) ve alkol ($R-OH$) olmak üzere iki bileşenden oluşur. Poliüretanın türü ve ortaya çıkan özellikleri, reaksiyonda kullanılan izosiyanat ve alkolün türüne bağlıdır.

Üretan elastomer kaplamalar, birçok malzemenin yüzeyine sayısız direnç ekleme yeteneğinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kaplama, sıkıştırma veya gerdirmeden sonra da şeklini korur. Üretan elastomerlerle kaplanmış yüzey örneklerinin bazıları şu şekildedir.

- Havacılık parçaları,
- Alışveriş kartı,
- Kaykaylar,
- Kar küreme makineleri,
- Çelik parçalar ve borular,
- Çöp konteynerleri,
- Lunapark hızlı treni,
- Vanalar ve çeşitli endüstriyel parçalar.

2.1.2.6 Kompozit Kaplama

Kompozit kaplama, korozyona karşı koruma sağlayan iki veya daha fazla maddenin birleşiminden oluşan malzemenin kaplama malzemesi olarak kullanılması ile elde edilen kaplamadır. Bu özel kaplama tipi esas olarak reçinenin yanı sıra epoksi ve poliüretan bazlıdır. Mükemmel korozyon koruması ve su yalıtımı sağlayarak endüstride en yaygın kullanılan kaplama malzemelerinden biridir. Kompozit kaplamalar, özellikle boru, çekme ve benzeri yapıların yaygın olduğu petrol endüstrisi ortamları için idealdir. Bu kaplama türü aşağıdaki avantajları sunar:

-Yangın ve ısı koruması; Termal bariyer görevi görür, bu nedenle sıcak gaz ve radyan ısıdan koruma sağlar. Ayrıca yangına karşı direnç sağlar ve karbon kompozitleri reçine erimesinden ve delaminasyondan korur.

-En iyi iletken kaplamayı sağlar. Kompozit kaplamalar, elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve karbon kompozitlere karşı koruma sağlayan radyo frekansı (RF) sağlamak için ince iletken kaplamalar olarak karakterize edilir.

-Güzel yüzeyler: Bu kaplama, çok çeşitli doku ve renklerde hem seramik hem de metal yüzeyler içerebilen çekici yüzeyler sunar.

-Yalıtım özellikleri: Alt tabakaları elektriksel olarak ortamdan izole eden oldukça etkili elektrik yalıtımı sağlar.

2.1.3 Epoksi

Epoksi termoset grubuna ait bir çeşit reçinedir. Çeşitli sertleştiricilerle kontrol altında çapraz bağlı yapılar oluşturulabildiğinden istenilen fiziksel özelliklerde ürünler elde edilebilir; bu nedenle hemen her temel endüstri tarafından kullanılan bir reçine grubudur. Epoksi reçineler mükemmel yapıştırma özelliğine sahiptir. Ayrıca neme, ısıya, kimyasallara ve aşınmaya karşı oldukça dirençlidir. Bu avantajlarından dolayı epoksi reçineler inşaat sektöründe, elektronik parçalarda, otomotiv ve imalat sektöründe sıkça tercih edilmektedir.

Epoksi reçineler düşük ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır, boyutsal kararlılığı yüksektir, darbeye dayanıklıdır, darbeyi absorbe edebilecek esnekliktedir, elektrik direnci ve kimyasal maddelere karşı dirençleri ve yapıştırıcı özelliği yüksektir. Epoksiler değerli kaplama maddeleridir. Epoksi yapıştırıcılar metaller, konstrüksiyon malzemeleri ve diğer sentetik reçinelerin üzerine uygulanabilir. Bazı endüstriyel uygulamalarda perçin ve kaynak maddesi olarak, yiyecek ve içecek kaplarının iç kısımlarını kaplamada ve tekne, yat ve benzeri uygulamalarda dış koruyucu kaplama malzemesi olarak kullanılabilir.

Epoksi reçineler molekül ağırlıklarına göre iki gruba ayrılır. Sıvı epoksilerin molekül ağırlığı 1000 g/mol mertebesinde ve solventsiz epoksi reçine olarak da anılırlar. Katı epoksilerin molekül ağırlığı 1000 g/mol'den fazladır ve solventli reçine olarak da anılırlar. Sıvı epoksiler genelde endüstriyel zemin kaplamalarında, tank içi kaplamalarda, yapıştırıcılarda, elektrik endüstrisinde, kompozitlerde ve parça

imalatında, katılar ise genelde atmosferik korozyona karşı dirençli kaplamalarda, kısaca solventli epoksi kaplamalarda, ayrıca toz boyalarda kullanılır. Sıvı zemin kaplamalarına örnek bir fabrika zemin kaplaması Şekil 2.2’de verilmiştir.

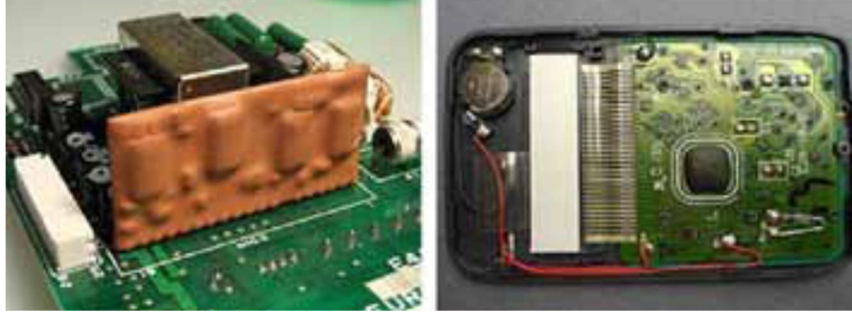


Şekil 2.2: Fabrika zemininde epoksi kaplama uygulaması (Url-1)

Epoksi reçinelerin özellikleri ise şu şekildedir;

- Değişik yüzeylere mükemmel yapışır,
- Aşınmaya karşı dayanıklıdır,
- Pişerek sertleşme esnasında yan ürünler oluşmaz,
- Pişme sonucu büzülme meydana gelmez,
- Boşluk doldurma özelliği vardır,
- Alkali, asit ve çözücüler ile rutubete karşı dayanıklıdır,
- Yapısal özellikleri birbirinden farklı malzemeleri yapıştırırlar,
- Düşük sıcaklıklarda yük altında uzun süre kullanılırlar.

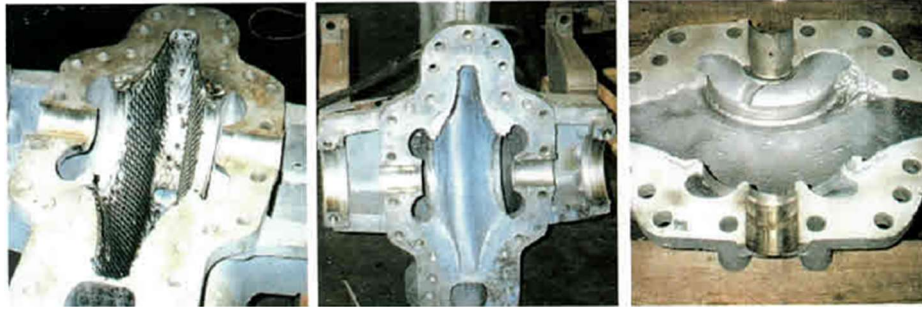
Elektrik endüstrisinde kullanıma bir örnek olarak, Şekil 2.3’te PCB üzerine epoksi ile kaplanmış kart ve elektronik parçalar gösterilmiştir.



Şekil 2.3: PCB üzerinde epoksi ile kaplanmış kart ve elektronik parçalar

2.1.3.1 Epoksi Kaplama

Epoksi reçinelerinin en büyük tüketicisi kaplama endüstrisidir. Epoksi reçineler çoğunlukla kimyasalların kullanıldığı yerlerde özel amaçlı kaplamalarda kullanılır. Bu reçineler, çok çeşitli yüzeylerde iyi yapışma ve mekanik özelliklere sahip ince tabakalı uzun süreli kaplamalar sağlarlar. Yıkama makinelerinde, gemilerde, köprülerde, boru hatları ve kimyasal madde fabrikalarında, otomobillerde, konteynerlerde ve yer kaplamalarında uygulama bulurlar. Şekil 2.4’ te aşınmış bir pompa gövdesinin tamiratında kullanılan epoksi kaplama uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.4: Aşınmış pompa gövdesinin tamiratında kaplama uygulaması

Şekil 2.5 – 2.7’de çeşitli makine elemanları üzerine yapılan epoksi kaplama uygulamaları verilmiştir.



Şekil 2.5: Kavitasyon hasarlı çelik türbinin onarılması (Url-2)



Şekil 2.6: Boru dirseklerinde epoksi kaplama uygulaması (Url-3)



Şekil 2.7: Gemi pervanesinin epoksi kaplama ile tamirâtı (Url-4)

2.2 Aşınma Mekanizmaları

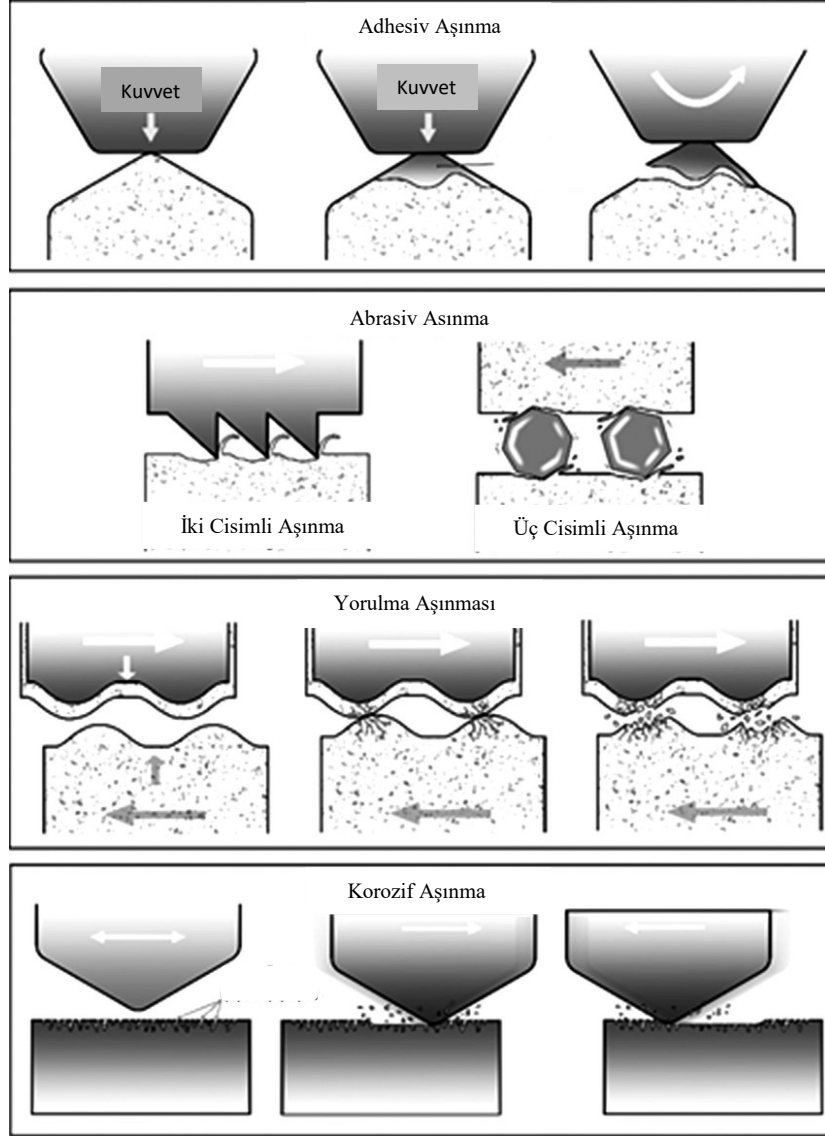
Aşınma, bir malzemenin başka bir malzeme ile teması sonucu, mekanik etkiler ile yüzeyden küçük parçaların ayrılması ve istenmeyen yüzey hasarının oluşmasıdır. Korozyon mekanizmasında kimyasal bir etki söz konusu olduğu için korozyon aşınmadan ayrı tutulmaktadır. Aşınma mekanizmasında ise malzeme yüzeyinden kopma veya kırılma yolu ile küçük parçacıklar ayrılmaktadır.

Bir durumun aşınma olarak değerlendirilebilmesi için 3 şart gerçekleşmelidir. Bu şartlar malzeme yüzeylerinin birbirlerine göre izafi hareket yapmaları, malzeme yüzeylerinin birinde veya her ikisinde malzeme kaybının olması ve bu durumun isteğimiz dışında meydana gelmesidir. Bu nedenle taşlama tornalama gibi isteğimiz ile gerçekleşen işlemler aşınma olarak değerlendirilmemektedir.

Aşınma mekanizmalarını inceleyen bilim dalı tribolojidir. Aşınma olayları tribolojik sistem veya tribosistem olarak adlandırılan ve etki eden değişkenlerin tamamı göz önünde bulundurularak incelenir. Aşınmanın temel usurları ise aşınan malzeme, aşındıran malzeme, ara malzeme, yük ve harekettir.

Aşınma meydana geldiğinde, makine elemanlarının şekillerinde, boyutlarında ve yüzey pürüzlülüklerinde bozulmalar oluşur. Bu bozulmalar sonucu makine parçaları fonksiyonlarını yerine getiremez hale gelir. Malzemelerin aşınma nedenlerini ve mekanizmalarını doğru bir şekilde anlayabilmek için aşınmayı etkileyen ana faktörleri, yani aşınan malzemeyi, aşındırıcı malzemeyi, yağlama durumunu, izafi hareketi ve yük durumunu bilmek gerekir. Bu parametreler bilinir ise aşınmaya çözüm bulunabilir.

DIN 50320'ye göre dört esas aşınma mekanizması olduğu kabul edilmektedir. Bu mekanizmalar adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, yorulma aşınması ve tribokimyasal (koroziv) aşınma olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.5'te aşınma mekanizmaları gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Aşınma mekanizmaları (Url-5)

2.2.1 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, iki metalin bir kuvvet etkisiyle birbirine sürtünerek aşınması ve aşınmaya daha az dirençli yüzeyden malzeme kaybının oluşmasıdır. Bu aşınma, malzeme özellikleri, aşındırıcı atmosfer veya kimyasalların varlığı gibi fiziksel ve kimyasal faktörlerin yanı sıra hız ve uygulanan yük gibi parametrelere bağlıdır.

Adhesiv aşınma, kayma aşınması veya sürtünme aşınması olarak da bilinir. Bu aşınma mekanizmasında, iki metal yüzey birbiriyle temas ettiğinde birkaç pürüzlü

noktada temas ederler. Sürtünme ve aşınma bu noktalardan kaynaklanır. Kuvvet uygulandığında, bu pürüzlü noktalar, oluşturulan yüksek basınç nedeniyle plastik olarak deforme olur ve sonunda birbirine kaynaklanır. Kayma devam ettikçe bu bağlar kırılır, bir yüzeyde boşluklar oluşur. Şekil 2.6' da adhesiv aşınmaya maruz kalmış bir mil gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Adhesiv aşınmaya maruz kalmış mil (Url-6)

2.2.2 Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, temas eden iki cisimden daha sert olanının uygulanan yük ve hareketin etkisiyle diğer malzeme yüzeyinden mikron mertebesinde talaş kaldırmasıdır. Bu olay iki-cisimli (two-body) abrasiv aşınma veya üç-cisimli (three-body) abrasiv aşınma olarak gerçekleşebilmektedir.

İki cisimli abrasif aşınmada temas halindeki iki cisimden biri diğerinden daha sert ve pürüzlü bir yüzeye sahipse, hareketin ve temas basıncının sonucunda, yumuşak cismin yüzeyinden talaş kaldırarak hasar oluşmaktadır. Eğer iki cisim arasında serbestçe hareket edebilen aşındırıcı tanecikler mevcutsa bu şekildeki aşınmaya üç cisimli abrasiv aşınma denir. Şekil 2.7'de abrasiv aşınmaya maruz kalmış bir makine elemanı görülmektedir.



Şekil 2.10: Abrasiv aşınmaya maruz kalmış makine elemanı (Url-7)

2.2.3 Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, malzemenin sürtünme sırasındaki döngüsel yüklemelerinden kaynaklanır. Bir malzeme döngüsel yüklemeye maruz kaldığında meydana gelen ilerleyici ve lokalize yapısal hasarlardır. Yorulma aşınması, çok yüksek yerel gerilmelere sahip pürüzler arasındaki temastan kaynaklanır ve yağlamalı veya yağlamasız kayma veya yuvarlanma sırasında tekrarlanır. Yorulma aşınmasının sonucu şiddetli plastik deformasyondur. Tekrarlanan, değişen mekanik gerilmeler, gerilmeli yüzeyin altında çatlakların oluşmasına ve yayılmasına yol açar, bu çatlakların yüzeye ulaşması sonucu yüzeyden pullanma şeklinde parçacıklar ayrılır, yüzeyde çukur ve oyuklar oluşur. Şekil 2.8’de yorulma aşınması meydana gelen yüzey gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Yorulma aşınması (Url-8)

2.2.4 Korozif Aşınma

Korozif aşınma, hem aşınma hem de korozyon aşınma mekanizmalarının mevcut olduğu malzeme bozulmasıdır. Ortamla reaksiyona giren ve sürtünen yüzeyler arasında oluşmaktadır. Hem aşınmanın hem de korozyonun etkileri yoğun hasara veya malzeme kayıplarına neden olabilmektedir. Tipik olarak, erozyon ve aşınma gibi yüzey arızaları, iki yüzey arasındaki dinamik etkileşimden kaynaklanır. Korozif bir ortamda meydana geldiğinde ise hem aşınmanın hem de korozyonun etkisinden kaynaklanan bir hasar türüdür. Korozif aşınmaya uğramış dişli Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.12: Korozif aşınmaya uğramış dişli (Url-9)

Tez kapsamında yapılan denelerde, epoksi kaplanmış yüzeyler iki cisimli abrazif aşınmaya maruz bırakılmıştır. Bu aşınma mekanizması disk pim deney düzeneği ile oluşturulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Deney Düzenegi

Tez çalışmasında dört farklı epoksi bazlı kaplama malzemesinin aşınma davranışları incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda deneyler, ASTM G99-17 standardına uygun olarak, disk-pim deney düzenegi ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan düzenek Şekil 3.1’de verilmiştir.

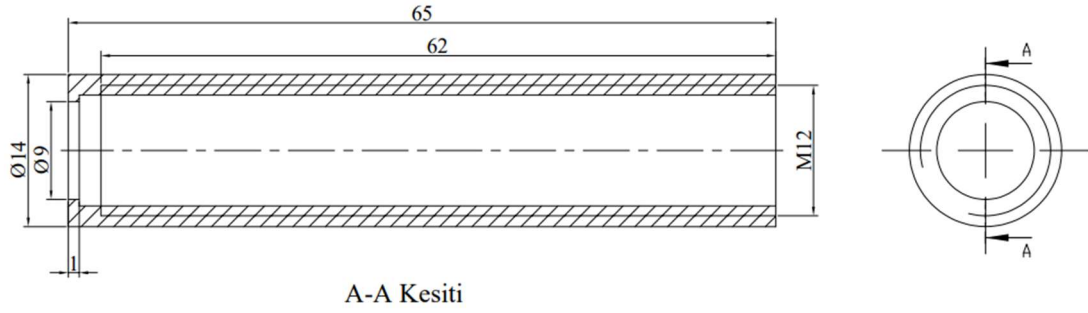


Şekil 3.1: Deney düzenegi

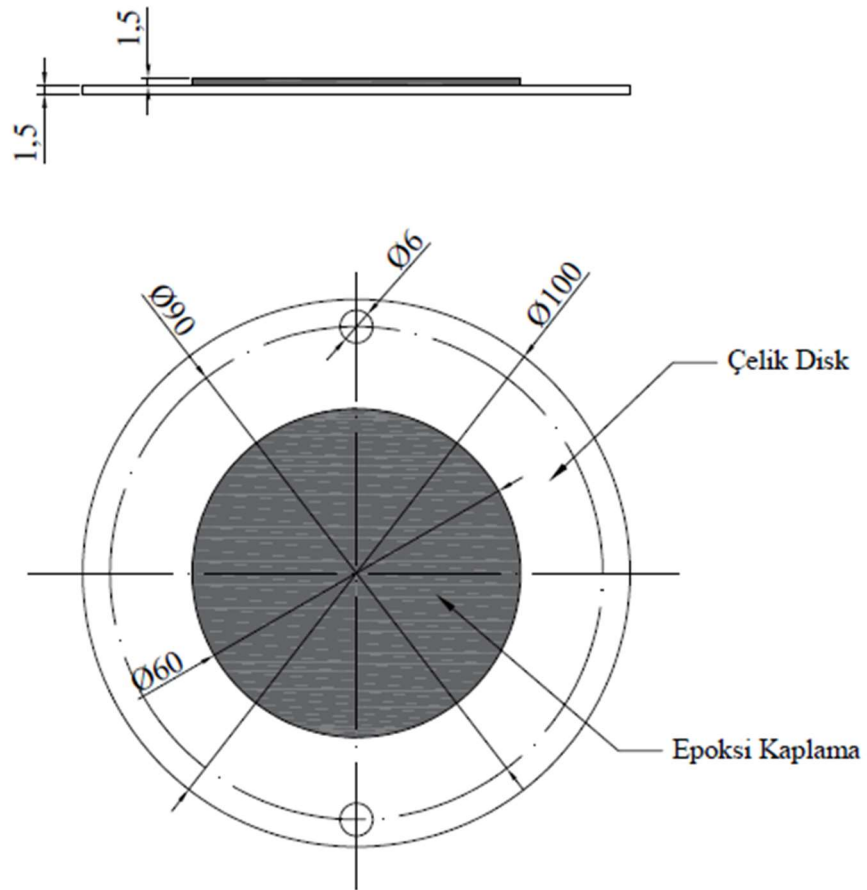
3.2 Numuneler

Deneyel çalışmada, disk üzerine kaplanmış epoksi malzeme küresel uç yerleştirilmiş bir pim ile aşındırılmıştır. 100 mm çapındaki çelik disk üzerine 60 mm çapında epoksi malzeme 1,5 mm kalınlığında kaplanarak disk numunesi oluşturulmuştur. Bilye tutucu ise içi boş olarak tasarlanmıştır. İçerisine 10 mm çapında çelik bilye yerleştirilerek cıvata ile sabitlenmiştir. Çelik bilye, deneyler sırasında düzenli olarak değiştirilmiştir. Şekil 3.2’de bilye tutucu ve Şekil 3.3’te disk

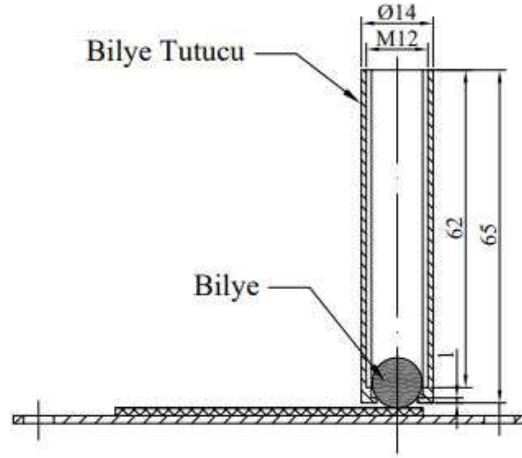
numunesine ait teknik resimler verilmiştir. Şekil 3.4'te ise deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.



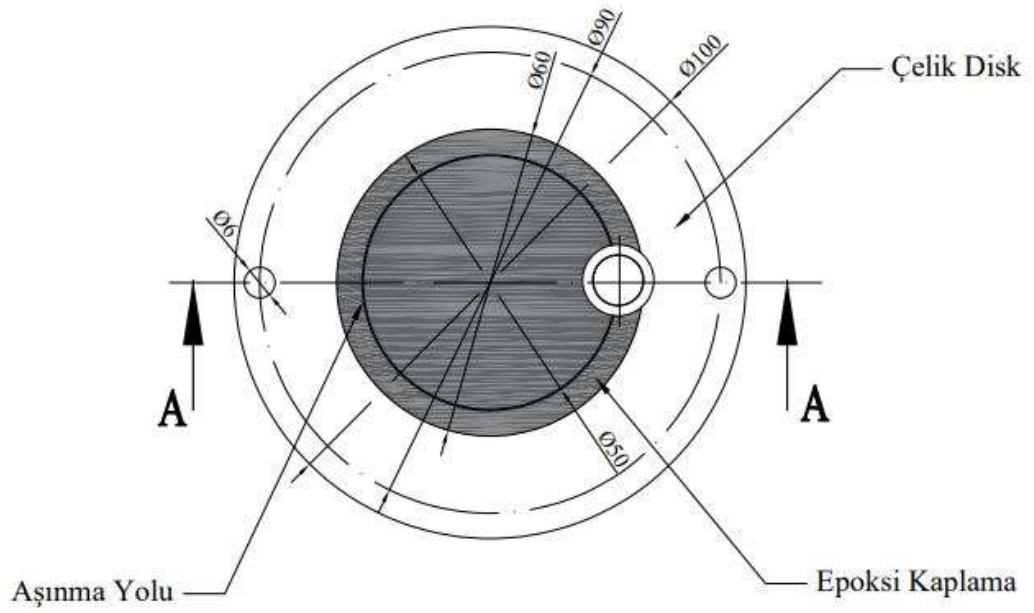
Şekil 3.2: Bilye tutucu



Şekil 3.3: Disk numunesi



A-A Kesiti



Şekil 3.4: Deney düzeneği şematik gösterim

Hazırlanan elik diskler öncelikle alkol ile temizlenmiştir. Sonrasında yüzeyine epoksinin kaplanacağı sınırı belirleyen, plastik malzemeden bir kalıp yerleştirilmiştir. Epoksi malzeme ise reçetede belirtildiği gibi sertleştiricisi ve reçine uygun oranlarda karıştırılarak hazırlanmıştır. Tablo 3.1’de deney kapsamında kullanılan alüminyum dolgulu Epoksi 1 ve Tablo 3.2’de mineral dolgulu Epoksi 2 malzemelerinin teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1: Epoksi 1’in mekanik özellikleri

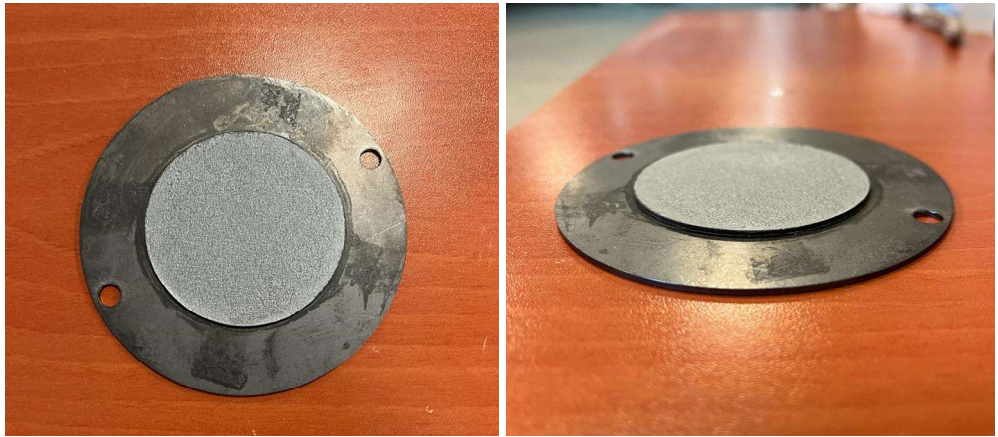
Epoksi 1	
Viskozite	880.000 mPa·s
Basınç Mukavemeti	61 MPa
Çekme Mukavemeti	20 MPa
Bükme Mukavemeti	37 MPa
Shore sertlik D (ATSM D 1706)	84
Büzülme	%0,02
Oda Sıcaklığında Krlendikten Sonra Geçiş Sıcaklığı	56,9 C
Sıcaklık dayanımı	-35 ile +120 C
Isı iletkenliği	1,39 W/m·K

Tablo 3.2: Epoksi 2’nin mekanik zellikleri

Epoksi 2	
Viskozite	560.000 mPa·s
Basınç Mukavemeti	115 MPa
Çekme Mukavemeti	29 MPa
Bükme Mukavemeti	39 MPa
Shore sertlik D (ATSM D 1706)	89
Büzülme	%0,04
Oda Sıcaklığında Krlendikten Sonra Geçiş Sıcaklığı	53,5 C
Sıcaklık dayanımı	-35 ile +120 C
Isı iletkenliği	1,1 W/m·K

Literatürden yola çıkarak epoksi 1 malzemesine kütlece %10 ve %20 olmak üzere bor karbür (B₄C) eklenerek Epoksi 3 ve Epoksi 4 malzemeleri oluşturulmuştur. Katkılı epoksilerin aşınma davranışları da test edilmiştir.

Hazırlanan kaplama malzemeleri disk numunelere uygulanmıştır. Bütün numuneler kürleşme için oda sıcaklığında minimum 48 saat bekletilmiştir. Kürleşme sonrasında aşınma deneylerine hazır hale gelmiştir. Aşınma testlerine hazır disk numuneleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Disk numuneler

3.3 Deney Parametreleri

Deney numuneleri, 5 N, 10 N ve 15 N yük altında, 300 s, 600 s, 900 s sürelerde aşındırılmıştır. Ek olarak Epoksi 2 için 30 N yük altında deneyler yapılmıştır. Dönme hızı tüm deneylerde 60 min⁻¹ olarak sabit tutulmuştur. Her deney 3 kez tekrarlanmıştır ve deney öncesi ve sonrası kütle kayıpları 0,0001 g hassasiyetli hassas terazide ölçülmüştür. Deney parametreleri Tablo 3.3'te gösterilmektedir.

Tablo 3.3: Deney parametreleri

Deney No	Uygulanacak Kuvvet, N	Kayma Süresi, s	Epoksi
1	5	300	1
2	5	600	1
3	5	900	1
4	10	300	1
5	10	600	1
6	10	900	1
7	15	300	1
8	15	600	1
9	15	900	1
10	5	300	2
11	5	600	2
12	5	900	2
13	10	300	2
14	10	600	2
15	10	900	2
16	15	300	2
17	15	600	2
18	15	900	2
19	30	300	2
20	30	600	2
21	30	900	2
22	10	300	3
23	10	600	3
24	10	900	3
25	10	300	4
26	10	600	4
27	10	900	4

Deney sırasında sürtünme katsayısındaki değişim deney düzeneğine bağlı bir bilgisayar programı yardımıyla kaydedilmiştir. Her deneyden sonra pim numunesinin üzerindeki küresel uç değiştirilerek deney tekrarlanmıştır. Deney sonrasında yüzey tekrar alkolle temizlenmiştir. Böylelikle aşınma sonucu ortaya çıkan tanecikler disk numunesi üzerinden uzaklaştırılmıştır. Deney öncesi ve sonrasında disk numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucu ağırlık farkı dolayısıyla aşınma miktarı kaydedilmiştir. Deney sonrasında aşınmış disk numunesi Şekil 3.6-3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Epoksi 1 ile kaplanmış disk numunesinin aşınma görüntüsü



Şekil 3.7: Epoksi 2 ile kaplanmış disk numunesinin aşınma görüntüsü



Şekil 3.8: Epoksi 3 ile kaplanmış disk numunesinin aşınma görüntüsü



Şekil 3.9: Epoksi 4 ile kaplanmış disk numunesinin aşınma görüntüsü

4. DENEY SONUÇLARI VE ANALİZ

4.1 Deney Sonuçları

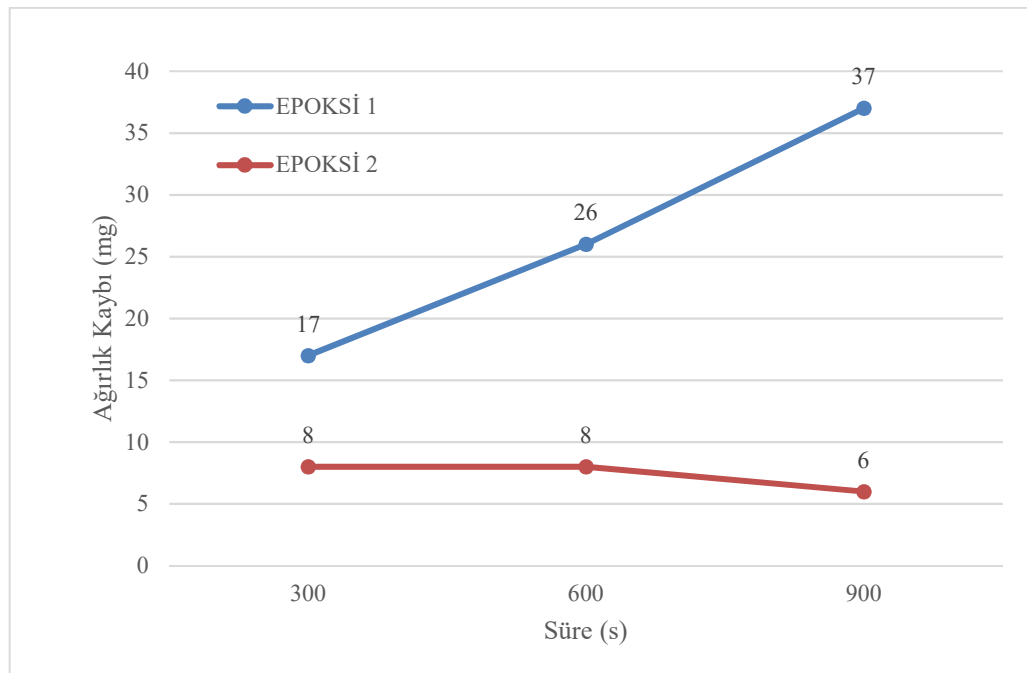
Bu bölümde, tamamlanan deneyler sonucu oluşturulan grafikler ve elde edilen veriler irdelenmektedir. Grafikler zamana göre değişim ve kuvvete göre değişim olmak üzere 2 farklı parametre esas alınarak oluşturulmuştur. Tablo 4.1’de ve Tablo 4.2’de gösterilen deney sonuçlarına ait veriler ve Şekil 4.1’de gösterilen grafik F=5 N için kütle kaybını ifade etmektedir.

Tablo 4.1: Epoksi 1 için deney sonuçları (F=5 N)

Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg		
5 N/300 s	94,881	94,865	94,881	94,866	14	17		
	94,881	94,867						
	94,881	94,866						
5 N/300 s	93,340	93,319	93,339	93,319	20		17	
	93,338	93,319						
	93,339	93,319						
5 N/300 s	94,591	94,574	94,590	94,572	17			26
	94,589	94,571						
	94,589	94,572						
5 N/600 s	94,683	94,663	94,683	94,663	20	26		
	94,683	94,664						
	94,684	94,662						
5 N/600 s	94,768	94,738	94,768	94,739	29		26	
	94,768	94,738						
	94,768	94,740						
5 N/600 s	97,857	97,828	97,857	97,829	28			37
	97,857	97,829						
	97,858	97,829						
5 N/900 s	94,466	94,436	94,466	94,436	30	37		
	94,466	94,437						
	94,467	94,436						
5 N/900 s	96,589	96,546	96,589	96,546	43		37	
	96,590	96,547						
	96,590	96,546						
5 N/900 s	97,279	97,238	97,278	97,239	39			37
	97,279	97,240						
	97,277	97,240						

Tablo 4.2: Epoksi 2 için deney sonuçları (F=5 N)

Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg
5 N/300 s	96,501	96,494	96,501	96,494	6	8
	96,499	96,494				
	96,502	96,495				
5 N/300 s	97,591	97,579	97,591	97,579	11	
	97,590	97,579				
	97,592	97,579				
5 N/300 s	97,055	97,048	97,056	97,048	7	
	97,057	97,049				
	97,056	97,049				
5 N/600 s	97,444	97,432	97,444	97,431	12	
	97,443	97,430				
	97,444	97,431				
5 N/600 s	95,555	95,547	95,555	95,547	7	
	95,555	95,547				
	95,555	95,548				
5 N/600 s	97,418	97,408	97,417	97,409	8	
	97,417	97,409				
	97,417	97,410				
5 N/900 s	96,114	96,103	96,113	96,105	8	
	96,112	96,105				
	96,114	96,107				
5 N/900 s	97,435	97,429	97,435	97,429	5	
	97,435	97,430				
	97,435	97,429				
5 N/900 s	96,005	95,999	96,005	95,999	6	
	96,005	95,998				
	96,005	95,999				



Şekil 4.1: Zamana göre kütle kaybı değişimi (F=5 N)

F= 5 N deney sonuçları değerlendirildiğinde, Epoksi 1 malzemesinin 300 s aşınma süresinde Epoksi 2 malzemesine göre yaklaşık 2 kat daha fazla aşındığı görülmüştür. Epoksi 1 için sabit yük altında aşınma süresi arttıkça aşınma miktarının arttığı görülmektedir. Aşınma süresi 2 kat arttığında aşınma miktarı %50, aşınma süresi 3 kat arttığında ise %124 olmuştur. Epoksi 2 ise aşınmaya karşı oldukça dirençlidir. Sabit yük altında ve artan sürelerde yaklaşık aynı miktarda kütle kaybı olmuştur. Sabit yük altında aşınma süresinin artmasının aşınma miktarı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir.

Tablo 4.3 - 4.6'da dört epoksi için F=10 N'da gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.3: Epoksi 1 için deney sonuçları (F=10 N)

Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg
10 N/300 s	94,600	94,586	94,600	94,585	14	17
	94,600	94,585				
	94,600	94,585				
10 N/300 s	92,776	92,757	92,775	92,758	17	
	92,775	92,759				
	92,775	92,758				
10 N/300 s	94,825	94,805	94,825	94,805	20	
	94,825	94,804				
	94,825	94,805				
10 N/600 s	94,874	94,840	94,874	94,840	34	37
	94,874	94,839				
	94,875	94,840				
10 N/600 s	94,432	94,395	94,433	94,396	37	
	94,433	94,397				
	94,433	94,395				
10 N/600 s	94,348	94,307	94,347	94,307	40	
	94,347	94,307				
	94,347	94,306				
10 N/900 s	94,653	94,591	94,653	94,591	61	69
	94,653	94,591				
	94,654	94,592				
10 N/900 s	94,492	94,430	94,492	94,428	63	
	94,492	94,428				
	94,492	94,427				
10 N/900 s	93,273	93,187	93,273	93,189	83	
	93,273	93,190				
	93,273	93,190				

Tablo 4.4: Epoksi 2 için deney sonuçları (F=10 N)

Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg
10 N/300 s	96,377	96,368	96,377	96,367	9	8
	96,378	96,366				
	96,377	96,369				
10 N/300 s	97,714	97,705	97,714	97,705	9	
	97,714	97,704				
	97,713	97,705				
10 N/300 s	96,712	96,709	96,714	96,707	7	
	96,714	96,710				
	96,715	96,701				
10 N/600 s	95,135	95,124	95,135	95,125	10	
	95,135	95,124				
	95,135	95,126				
10 N/600 s	95,278	95,273	95,277	95,273	4	
	95,278	95,273				
	95,277	95,274				
10 N/600 s	95,440	95,432	95,441	95,433	7	
	95,441	95,434				
	95,441	95,433				
10 N/900 s	97,058	97,043	97,058	97,044	14	
	97,058	97,044				
	97,058	97,044				
10 N/900 s	94,911	94,892	94,910	94,894	16	
	94,911	94,893				
	94,910	94,896				
10 N/900 s	97,315	97,303	97,315	97,303	11	
	97,316	97,303				
	97,315	97,304				

Tablo 4.5: Epoksi 3 için deney sonuçları (F=10 N)

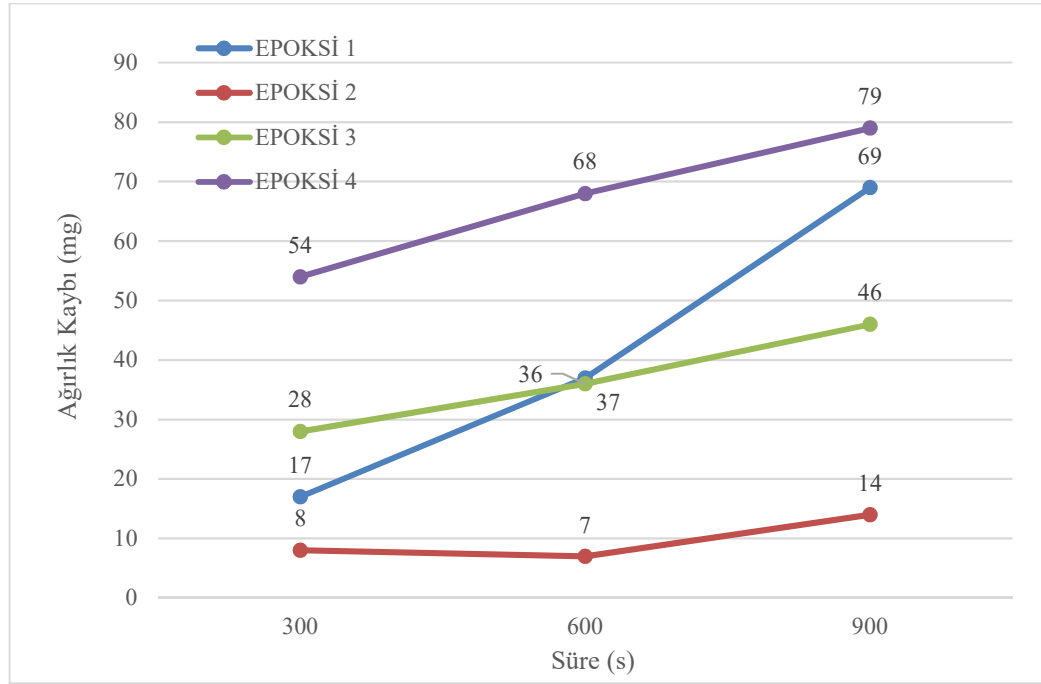
Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg
10 N/300 s	98,120	98,087	98,119	98,087	32	28
	98,119	98,087				
	98,119	98,087				
10 N/300 s	98,031	98,002	98,032	98,002	29	
	98,032	98,003				
	98,032	98,003				
10 N/300 s	97,187	97,161	97,186	97,161	24	
	97,186	97,162				
	97,186	97,162				
10 N/600 s	98,120	98,075	98,119	98,074	44	
	98,119	98,074				
	98,119	98,074				
10 N/600 s	98,031	97,994	98,032	97,994	37	
	98,032	97,993				
	98,032	97,994				
10 N/600 s	97,187	97,159	97,186	97,159	27	
	97,186	97,159				
	97,186	97,158				
10 N/900 s	98,120	98,069	98,119	98,069	50	
	98,119	98,069				
	98,119	98,069				
10 N/900 s	98,031	97,988	98,032	97,987	44	
	98,032	97,987				
	98,032	97,987				
10 N/900 s	97,187	97,141	97,186	97,142	44	
	97,186	97,142				
	97,186	97,143				

Tablo 4.6: Epoksi 4 için deney sonuçları (F=10 N)

Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg
10 N/300 s	98,36	98,28	98,36	98,28	81	54
	98,36	98,28				
	98,36	98,28				
10 N/300 s	97,38	97,32	97,37	97,32	58	
	97,38	97,32				
	97,37	97,32				
10 N/300 s	99,88	99,86	99,88	99,86	22	
	99,88	99,86				
	99,88	99,86				
10 N/600 s	98,36	98,26	98,36	98,26	99	68
	98,36	98,26				
	98,36	98,26				
10 N/600 s	97,38	97,31	97,37	97,31	66	
	97,38	97,31				
	97,37	97,31				
10 N/600 s	99,88	99,85	99,88	99,85	38	
	99,88	99,84				
	99,88	99,84				
10 N/900 s	98,36	98,25	98,36	98,24	114	79
	98,36	98,24				
	98,36	98,24				
10 N/900 s	97,38	97,30	97,37	97,30	78	
	97,38	97,30				
	97,37	97,29				
10 N/900 s	99,88	99,84	99,88	99,84	46	
	99,88	99,84				
	99,88	99,84				

F= 10 N ve değişken süre koşullarında 4 farklı epoksi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucu elde edilen veriler Şekil 4.2’de görülmektedir. Epoksi 1 malzemesinin aşınma miktarı, sabit yük altında aşınma süresi arttıkça artış göstermiştir. Epoksi 2 ise diğer tüm kaplamalara göre en az aşınan epoksi olmuştur. Epoksi 2, 300 s ve 600 s sürelerde yaklaşık aynı miktarda kütle kaybetmiştir. 900 s aşınma süresinde ise aşınma miktarında %94 artış görülmüştür. Epoksi 3 malzemesi Epoksi 1 ile benzer sonuçlar göstermiştir ve artan aşınma süresinde kütle kaybı artışı olmuştur. Epoksi 3 malzemesi, 300 s sürede Epoksi 1’e kıyasla %68 daha fazla kütle kaybetmesine karşın uzun aşınma süresinde Epoksi 1’e kıyasla %50 daha az aşınma olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak %10 B₄C tozu katkısının epoksi kaplamanın yüzeyinde pürüzlülük oluşturması, ilk aşınma aşamasında bu pürüzlerin aşındığı sonrasında kaplamanın aşınmaya direnç gösterdiği kanaatine varılmıştır. Ancak %10 B₄C katkılı Epoksi 3 Epoksi 2 ye kıyasla aşınmaya daha az dirençlidir. En çok kütle kaybı Epoksi 4’te görülmüştür. %20 B₄C katkılı Epoksi 4 kaplandıktan sonra

yüzeyinde fazlaca pürüz oluşması sebebiyle aşınma direncine olumsuz bir etkisi olmuştur. Epoksi 4 malzemesi en az aşınan Epoksi 2 ye göre 900 s aşınma süresinde yaklaşık 5,6 kat daha fazla kütle kaybetmiştir.



Şekil 4.2: Zamana göre kütle kaybı değişimi (F=10 N)

Aşınma süresinin artması ile aşınma miktarı arasındaki artış ilişkisi incelendiğinde, kütle kaybında en çok değişim olan malzeme Epoksi 1 olarak görülmüştür. Epoksi 1 malzemesi 900 s sürede, 300 s süreye göre yaklaşık 2,4 kat fazla kütle kaybetmiştir. Aynı durumda bu artış Epoksi 2 ve Epoksi 3 için yaklaşık 1,6 kat, Epoksi 4 için ise yaklaşık 1,5 kat olmuştur.

Tüm bu veriler değerlendirildiğinde, %10 B₄C katkısının aşınma direnci üzerinde pozitif bir etkisinin olduğunu, ancak %20 B₄C katkısının pürüzlülüğü arttırdığından dolayı aşınma direncine olumsuz etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de F=15 N için Epoksi 1 ve Epoksi 2 malzemelerine ait kütle kaybı değişimleri verilmiştir. Bu veriler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.3’te gösterilmiştir.

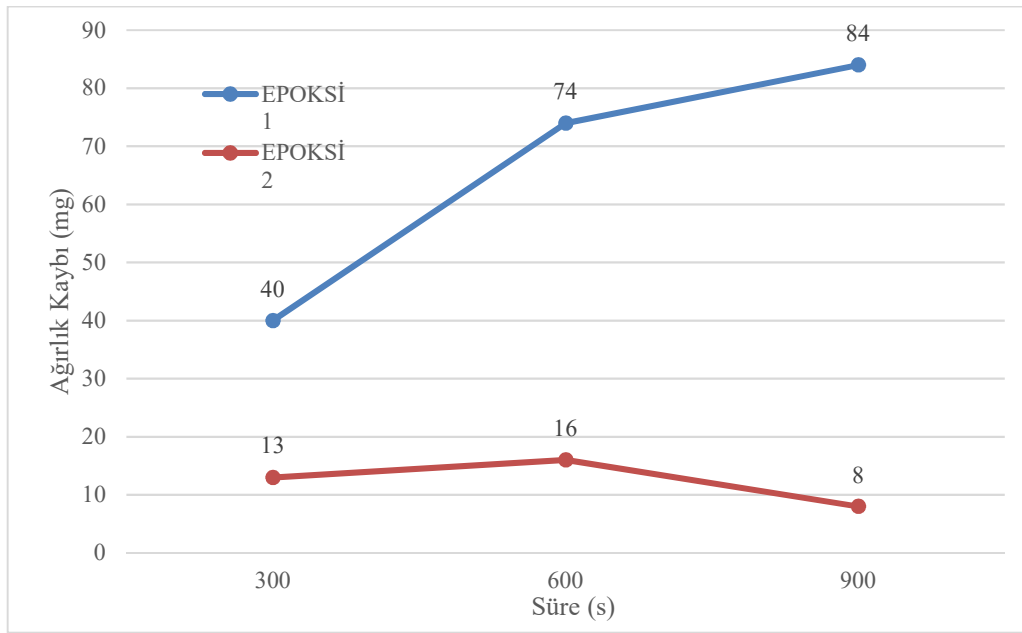
Tablo 4.7: Epoksi 1 için deney sonuçları (F=15 N)

Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg
15 N/300 s	95,463	95,427	95,463	95,427	36	40
	95,463	95,427				
	95,463	95,427				
15 N/300 s	97,903	97,863	97,903	97,863	39	
	97,903	97,863				
	97,903	97,863				
15 N/300 s	98,301	98,255	98,301	98,256	45	
	98,302	98,256				
	98,301	98,256				
15 N/600 s	98,290	98,217	98,291	98,217	73	74
	98,291	98,218				
	98,291	98,217				
15 N/600 s	98,056	97,984	98,057	97,985	71	
	98,056	97,985				
	98,057	97,985				
15 N/600 s	97,172	97,091	97,171	97,093	78	
	97,170	97,093				
	97,170	97,093				
15 N/900 s	97,956	97,854	97,957	97,854	102	84
	97,957	97,854				
	97,957	97,855				
15 N/900 s	97,143	97,049	97,143	97,049	94	
	97,143	97,049				
	97,143	97,048				
15 N/900 s	97,623	97,568	97,623	97,568	55	
	97,623	97,567				
	97,624	97,568				

Tablo 4.8: Epoksi 2 için deney sonuçları (F=15 N)

Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg
15 N/300 s	96,496	96,481	96,496	96,481	15	13
	96,497	96,480				
	96,495	96,482				
15 N/300 s	96,040	96,024	96,039	96,025	13	
	96,038	96,026				
	96,038	96,026				
15 N/300 s	97,365	97,352	97,365	97,353	12	
	97,366	97,353				
	97,365	97,354				
15 N/600 s	95,979	95,960	95,978	95,960	18	16
	95,977	95,959				
	95,978	95,961				
15 N/600 s	97,568	97,549	97,567	97,549	18	
	97,567	97,549				
	97,567	97,549				
15 N/600 s	97,244	97,230	97,244	97,230	14	
	97,244	97,230				
	97,244	97,230				
15 N/900 s	97,281	97,271	97,281	97,270	11	8
	97,282	97,270				
	97,282	97,270				
15 N/900 s	96,677	96,677	96,678	96,670	8	
	96,678	96,670				
	96,679	96,662				
15 N/900 s	94,836	94,829	94,836	94,830	6	
	94,835	94,830				
	94,836	94,830				

Şekil 4.3'e göre $F=15$ N ve değişken süre koşullarında deney sonuçları değerlendirildiğinde, Epoksi 2 malzemesi Epoksi 1'e göre 300 s sürede 3 kat daha az aşınmıştır. 900 s sürede ise bu oran 10 kata kadar çıkmaktadır. Epoksi 1 malzemesi artan aşınma süresinde daha fazla kütle kaybetmiştir, aşınma süresinin 3 kat artması ile aşınma miktarı yaklaşık 2 kat artmıştır. Epoksi 2 malzemesi Epoksi 1 malzemesine göre aşınmaya karşı oldukça dirençlidir ve artan aşınma süresinde kütle kaybında yaklaşık %50 düşüş görülmüştür. Aşınma miktarı çok az olduğu için bu düşüş göz ardı edilebilecek seviyededir, Epoksi 2 için artan sürenin kütle kaybına etkisinin olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.3: Zamana göre kütle kaybı değişimi ($F=15$ N)

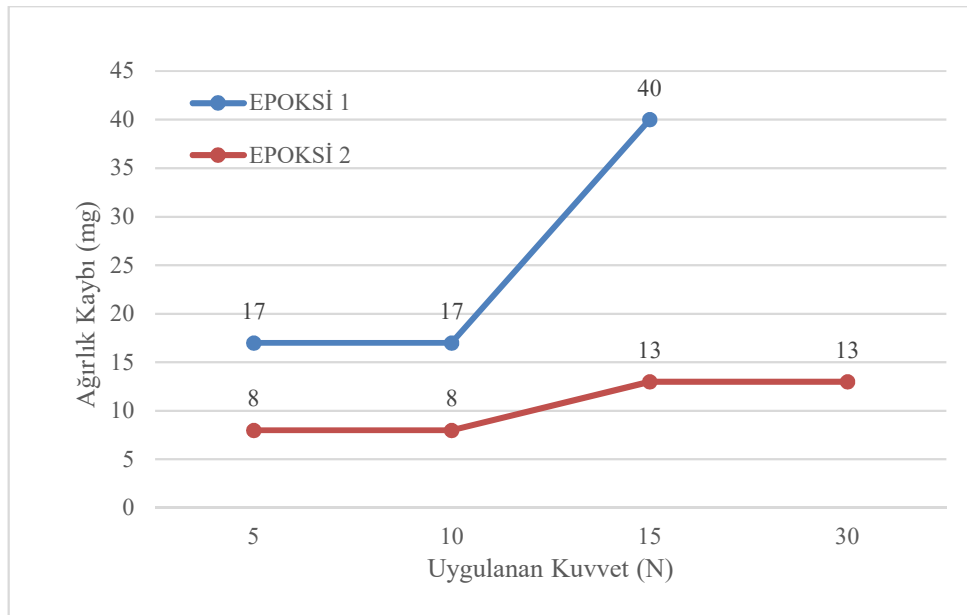
Yukarı bölümde kuvvete göre kütle kaybı değişimi incelenmiştir. Epoksi 2 tüm deney şartlarında en az kütle kaybeden malzeme olduğu için ek olarak $F = 30$ N yük altında da deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 4.9'da verilmiştir.

Şekil 4.1 - 4.3'te incelenen grafikler sabit kuvvet altında değişen süreler için kütle kaybını göstermektedir. Kütle kayıplarının sabit sürede ve değişen kuvvetlerde durumunu gözlemlemek için Şekil 4.4 - 4.6'da verilen grafikler incelenmiştir. 300 s

sabit sürede uygulanan kuvvete göre gerçekleşen kütle kaybı değişimi ise Şekil 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.9: Epoksi 2 için deney sonuçları (F=30 N)

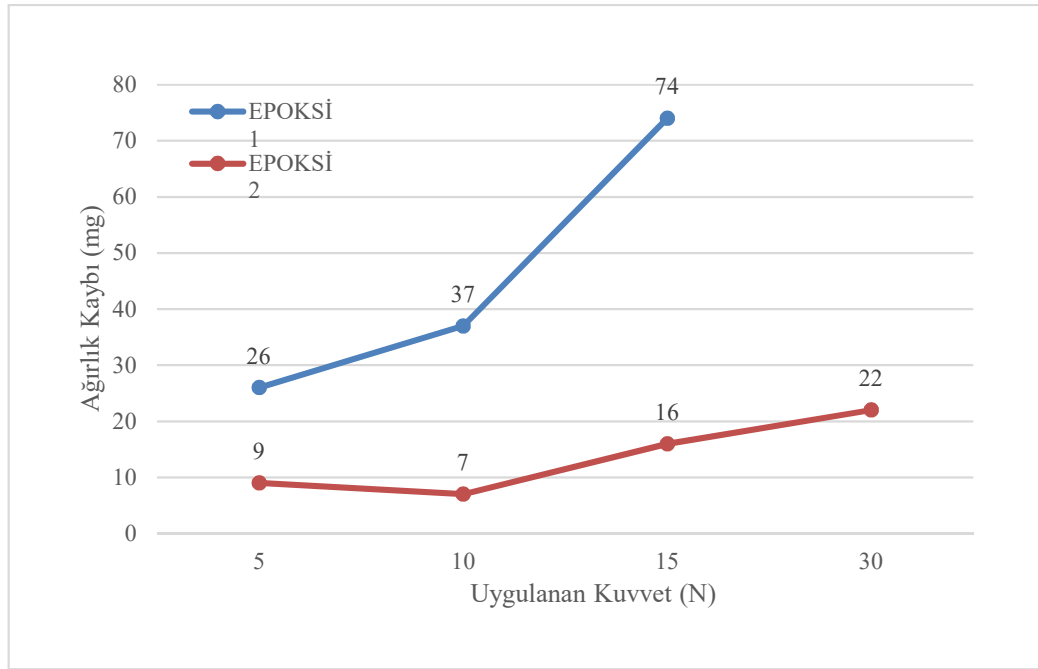
Deney Şartları	İlk Kütle, g	Son Kütle, g	İlk Kütle Ortalaması, g	Son Kütle Ortalaması, g	Kütle Kaybı, mg	Kütle Kaybı Ortalaması, mg	
30 N/300 s	97,660	97,649	97,659	97,650	9	13	
	97,658	97,649					
	97,659	97,650					
30 N/300 s	97,620	97,604	97,620	97,605	15		
	97,620	97,605					
	97,619	97,605					
30 N/300 s	97,703	97,684	97,702	97,685	17		
	97,701	97,685					
	97,702	97,685					
30 N/600 s	97,660	97,633	97,659	97,634	24		22
	97,658	97,634					
	97,659	97,635					
30 N/600 s	97,620	97,597	97,620	97,597	22		
	97,620	97,598					
	97,619	97,598					
30 N/600 s	97,703	97,683	97,702	97,681	20		
	97,701	97,681					
	97,702	97,681					
30 N/900 s	97,660	97,629	97,659	97,629	29	27	
	97,658	97,629					
	97,659	97,630					
30 N/900 s	97,620	97,589	97,620	97,589	30		
	97,620	97,589					
	97,619	97,589					
30 N/900 s	97,703	97,679	97,702	97,679	22		
	97,701	97,679					
	97,702	97,679					



Şekil 4.4: Kuvvete göre kütle kaybı değişimi (t=300 s)

$t = 300$ s için deney sonuçları değerlendirildiğinde, 5 N ve 10 N uygulanan kuvvetin aşınma miktarı üzerinde etkisinin her iki epoksi içinde yaklaşık aynı olduğu, ancak 15 N uygulanan kuvvette belirgin bir artış olduğu gözlenmiştir. Bu artış epoksi 1 için 2.3 kat, Epoksi 2 için 1,55 kat artış olarak gerçekleşmiştir. Epoksi 2 için 30 N uygulanan durumda ise 15 N uygulanan durumla yaklaşık aynı sonuçlar elde edilmiştir. Her iki epoksi uygulanan aynı yüklere göre değerlendirildiğinde ise aynı sürede Epoksi 2'nin daha az kütle kaybettiği, böylece aşınmaya karşı daha dirençli olduğu görülmüştür.

Şekil 4.5'te 600 s sabit süre içerisinde kuvvete göre meydana gelen aşınma miktarı verilmiştir.

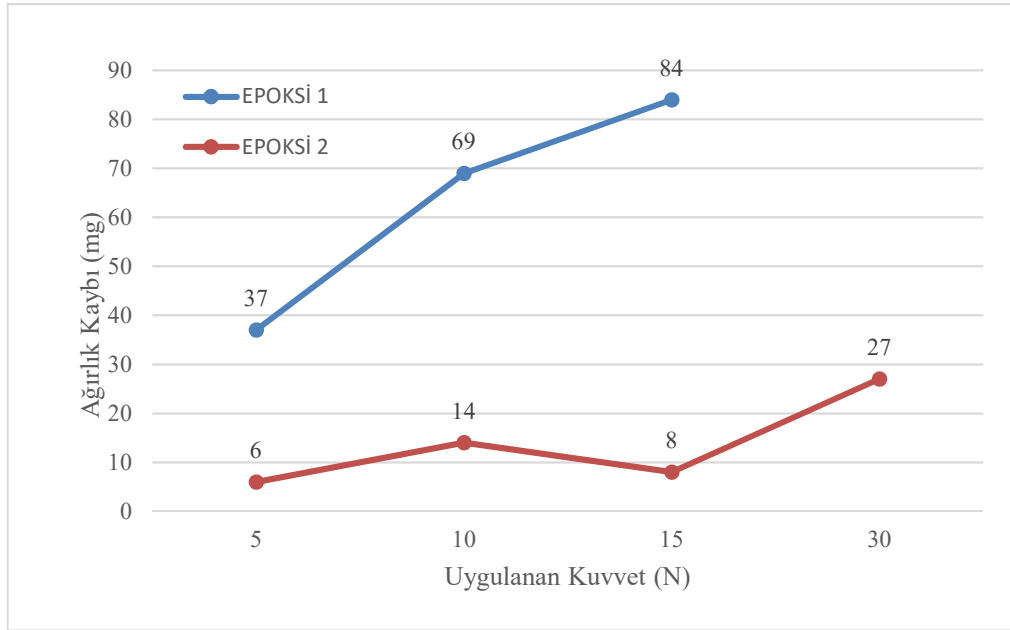


Şekil 4.5: Kuvvete göre kütle kaybı değişimi ($t=600$ s)

$t = 600$ s için deney sonuçları değerlendirildiğinde, her iki malzeme içinde aşınma miktarının kuvvet artışı ile arttığı söylenebilir. Epoksi 1, 5 N yük altında Epoksi 2'ye göre 2,9 kat daha fazla kütle kaybetmiştir. 15 N yük altında ise bu oran 4,6 kata kadar artmıştır. Epoksi 1 malzemesi 10 N yük altında 5 N yüke göre 1,4 kat daha fazla aşınmıştır. Ancak 15 N yük ile kıyasarsa bu değişim 2,85 kat olmuştur. Epoksi 2 için ise 5 N ve 10 N yük altında aşınma miktarının yaklaşık aynı olduğu,

ancak 15 yük altında kütle kaybının %75 arttığı görülmüştür. Uygulanan kuvvet 2 katına çıkarıldığında ise kütle kaybı yalnızca %34 artmıştır. Bu bulgulara göre her iki epoksi içinde 5 N ve 10 N yükün aşırma direncine etkisinin düşük olduğu, 15 N yükün ise kritik bir eşik değeri olduğu söylenebilir.

Şekil 4.6’da ise 900 s içerisinde uygulanan kuvvete göre meydana gelen aşırma miktarı verilmiştir.

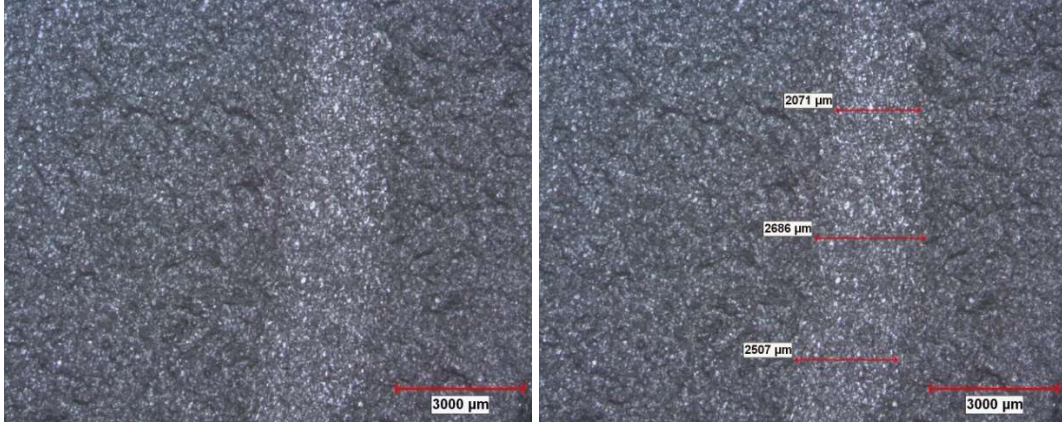


Şekil 4.6: Kuvvete göre kütle kaybı değişimi (t=900 s)

t = 900 s için deney sonuçları değerlendirildiğinde, 5 N yük altında Epoksi 1 malzemesinin Epoksi 2’ye göre 5,6 kat fazla aşındığı görülmektedir. Bu değer 15 N yük altında yaklaşık 10 kat olmaktadır. Epoksi 1 malzemesinde artan yük altında artan kütle kaybı net olarak görülmüştür. Kuvvet 2 kat arttığında aşırma miktarı %86 artmıştır. Kuvvet 3 kat arttığında ise bu artış %124 olmuştur. Epoksi 2 için değerlendirildiğinde aşırma miktarı tüm yükler için Epoksi 1’e kıyasla oldukça düşüktür. 5 N yük ile 30 N yük karşılaştırılırsa, aynı aşırma süresinde uygulanan kuvvet 6 kat arttığında aşırma miktarı 4,4 kat artmıştır.

4.2 Yüzey Görüntüleri

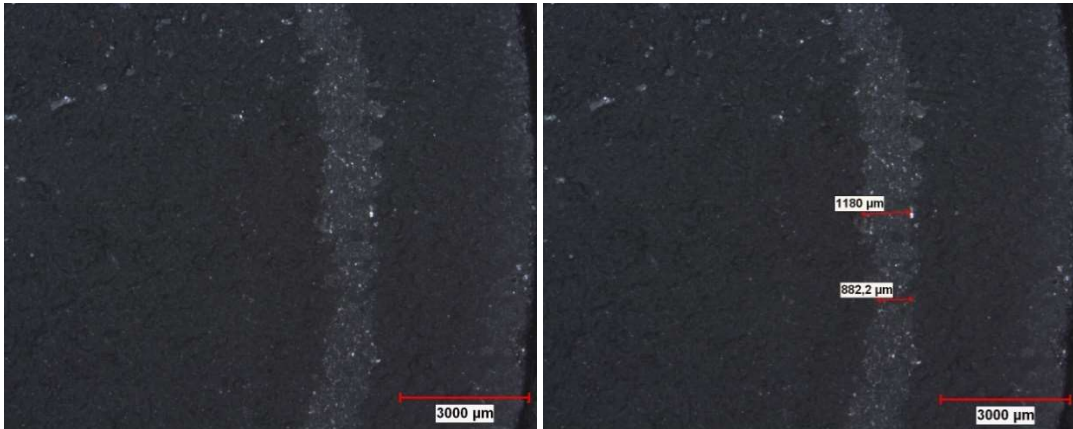
Yapılan deneyler sonrasında seçilen numunelere ait yüzey görüntüleri Stereo mikroskop altında 7,5 kat büyütülerek incelenmiştir. 10 N yük uygulanan ve 900 s süreyle aşındırılan numunelerin mikroskop altında aşınma izleri ölçülmüştür. Şekil 4.7'de Epoksi 1'e ait mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.7: Epoksi 1 kaplanmış numunelere ait mikroskop görüntüleri

Epoksi 1 ile kaplanmış numunelerede aşınma deneyleri sonrasında belirgin aşınma izleri görülmüştür. Bu izler mikroskop altında incelendiğinde, iz genişliği minimum 2071 µm, maksimum 2686 µm olarak ölçülmüştür.

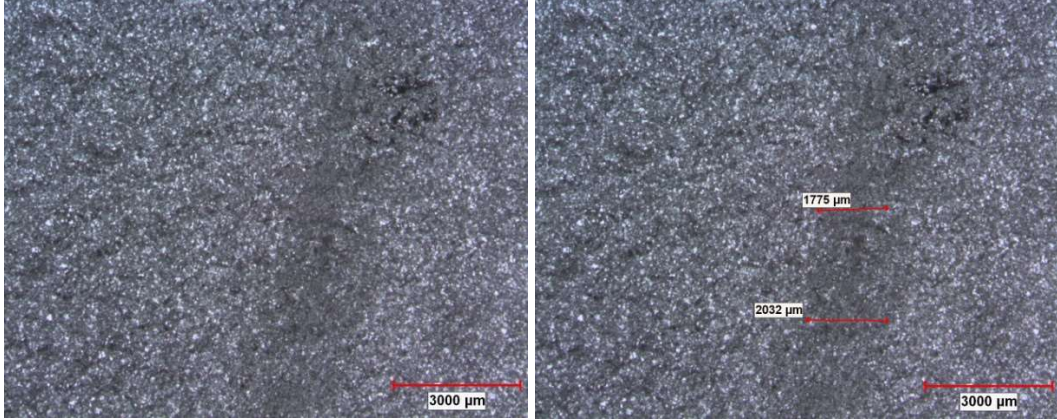
Epoksi 2'ye ailt mikroskop görüntüleri Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8: Epoksi 2 kaplanmış numunelere ait mikroskop görüntüleri

Epoksi 2 ile kaplanmış numuneler incelendiğinde, Epoksi 1'e göre daha silik izlerle karşılaşılmıştır. Bu izler mikroskop altında incelendiğinde, iz genişliği minimum 882 μm , maksimum 1180 μm olarak ölçülmüştür.

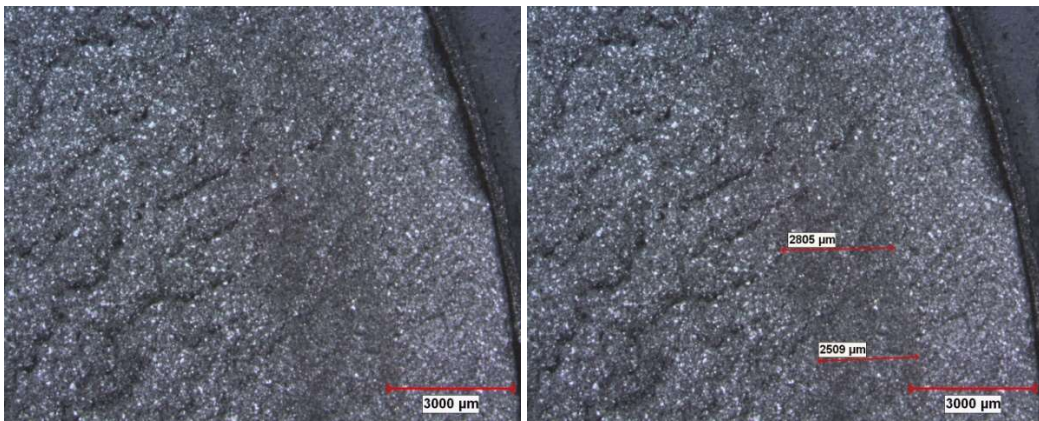
Epoksi 3'e ait mikroskop görüntüleri Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9: Epoksi 3 kaplanmış numunelere ait mikroskop görüntüleri

Epoksi 3 ile kaplanmış numuneler incelendiğinde yer yer silik izlerle karşılaşılmıştır. Bu izler mikroskop altında incelendiğinde, iz genişliği minimum 1775 μm , maksimum 2032 μm olarak ölçülmüştür.

Epoksi 4'e ait mikroskop görüntüleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10: Epoksi 4 kaplanmış numunelere ait mikroskop görüntüleri

Epoksi 4 ile kaplanmış numuneler incelendiğinde genellikle silik ve düzensiz izlerle karşılaşılmıştır. Bu izler mikroskop altında incelendiğinde, iz genişliği minimum 2509 µm, maksimum 2805 µm olarak ölçülmüştür.

Tüm numuneler değerlendirildiğinde iz genişliği en az olan numune Epoksi 2 ve iz genişliği en fazla olan numune Epoksi 4 olarak belirlenmiştir.

4.3 Sürtünme Katsayıları

Sürtünme kuvveti, temas eden iki cisim arasında oluşan ve harekete karşı koyan kuvvettir. Sürtünme katsayısı ise iki cisim arasındaki sürtünme kuvvetinin iki cismi birbirine bastıran kuvvete oranıdır. Bu katsayı 0 ile 1 arasında bir değerdedir ve temas eden cisimlere göre değişkenlik göstermektedir. Sürtünme katsayısı aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir. Bu denklemde μ_k kinetik sürtünme katsayısı, N tepki kuvveti ve F sürtünme kuvvetidir.

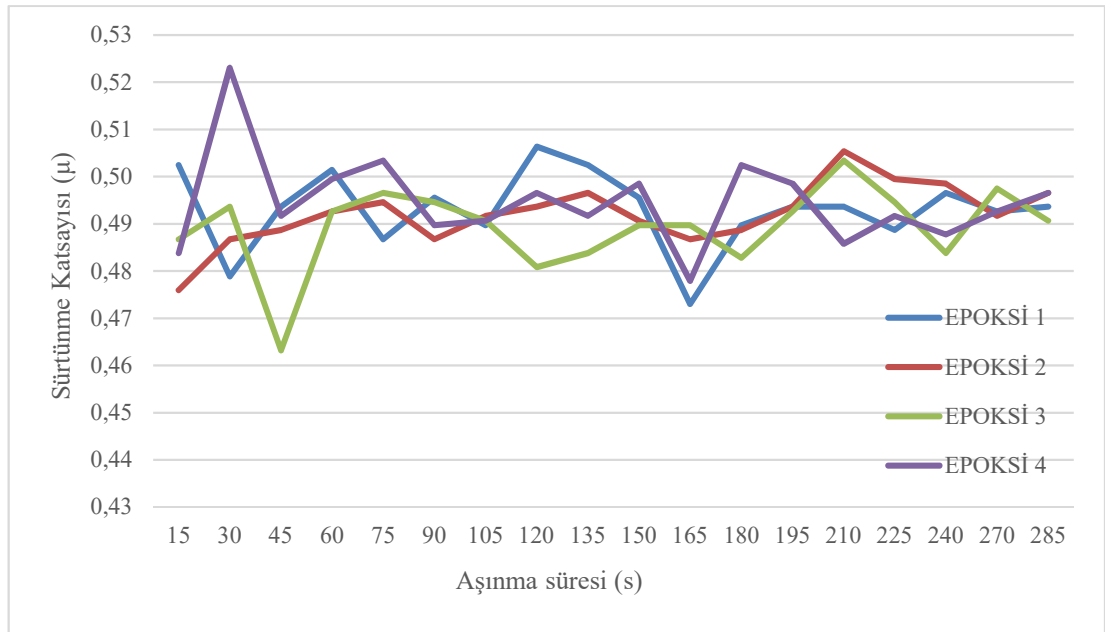
$$\mu_k = F/N \quad (4.1)$$

10 N yük altında ve 300 s aşınma süresinde test edilen numunelere ait sürtünme katsayıları ölçülmüştür. Tablo 4.10'da 4 farklı epoksiye ait ölçümler verilmiştir.

Tablo 4.10: Sürtünme katsayısı ölçümleri

Kayma Süresi (s)	Epoksi 1	Epoksi 2	Epoksi 3	Epoksi 4
15	0,50	0,48	0,49	0,48
30	0,48	0,49	0,49	0,52
45	0,49	0,49	0,46	0,49
60	0,50	0,49	0,49	0,50
75	0,49	0,49	0,50	0,50
90	0,50	0,49	0,49	0,49
105	0,49	0,49	0,49	0,49
120	0,51	0,49	0,48	0,50
135	0,50	0,50	0,48	0,49
150	0,50	0,49	0,49	0,50
165	0,47	0,49	0,49	0,48
180	0,49	0,49	0,48	0,50
195	0,49	0,49	0,49	0,50
210	0,49	0,51	0,50	0,49
225	0,49	0,50	0,49	0,49
240	0,50	0,50	0,48	0,49
270	0,49	0,49	0,50	0,49
285	0,49	0,50	0,49	0,50
300	0,48	0,49	0,47	0,48

Tablo 4.10'deki verilerle oluşturulan zamana bağlı sürtünme katsayısı değişim grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde Epoksi 1 için sürtünme katsayısı değeri 0,47-0,51 aralığındadır. Bu katsayı Epoksi 2 için 0,48-0,51, Epoksi 3 için 0,46-0,50 ve Epoksi 4 için 0,48-0,52 aralığında ölçülmüştür. Tüm kaplama malzemeleri için yaklaşık benzer sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Bu durum deneylerin benzer şartlar altında güvenli bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında dört farklı epoksi kaplamaya ait tribolojik özellikler ASTM G99 standardına göre test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler grafiklerle ifade edilerek değerlendirilmiştir.

Epoksi 1 ile kaplanmış numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde en düşük aşınma miktarı 10 N yük altında 300 s aşınma süresinde görülmüştür. En yüksek aşınma miktarı ise 15 N yük altında 900 s aşınma süresinde ölçülmüştür. Sabit yük altında aşınma süresi 2 katına çıktığında aşınma miktarı yaklaşık 2,1 kat, aşınma süresi 3 katına çıktığında ise aşınma miktarı yaklaşık 4,1 kata kadar artmıştır. Sabit aşınma süresinde ise kütlelerin 2 kat artışı aşınma miktarında 1,8 kat, kütlelerin 3 kat artışı ise aşınma miktarında 2,8 kat artışa neden olmuştur. Aşınma süresindeki artış, aşınma direnci üzerinde kuvvet artışına göre daha fazla etkiye neden olmuştur.

Epoksi 2 ile kaplanmış numuneler diğer tüm epoksi kaplamalarla kıyaslandığında en az kütle kaybeden malzemedir. Bu sebeple diğer malzemelerden farklı olarak 30 N yük altında ekstra testler yapılmıştır. En düşük aşınma miktarı 5 N yük altında ve 900 s aşınma süresinde görülmüştür. En yüksek aşınma ise 30 N yük altında ve 900 s aşınma süresinde ölçülmüştür. Epoksi 2 üzerinde aşınma süresinin önemli bir etkisinin olmadığı ancak uygulanan yükü artmasıyla kütle kaybının arttığı görülmüştür. Aşınma miktarındaki artış, uygulanan kuvvet 6 kat arttığında yaklaşık 4,4 kat olarak gerçekleşmiştir.

Epoksi 3 ve Epoksi 4 malzemeleri B₄C katkısının etkisini incelemek için, Epoksi 1 malzemesine sırasıyla ağırlıkça %10 ve %20 B₄C tozu eklenerek oluşturulmuştur. Epoksi 3 malzemesinde B₄C katkısının uzun aşınma sürelerinde aşınma dayanımı üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Epoksi 1'e kıyasla Epoksi 3, 900 s aşınma süresinde %50 daha az aşınmıştır. Epoksi 4 malzemesinde ise B₄C katkısı epoksinin fiziksel yapısını olumsuz etkilemiştir ve uygulamasını zorlaştırmıştır. Epoksi 4 malzemesi pürüzlü bir yüzeye sahiptir ve aşınma direnci oldukça düşüktür. Bu nedenle tüm epoksilere kıyasla en çok kütle kaybeden malzeme olmuştur.

Yapılan araştırmalar ve deney sonuçları ışığında, epoksi kaplamaların aşınmaya karşı oldukça dirençli olduğu ve çok az miktarlarda aşındığı için uzun

ömürlü kullanım için avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu kaplamalar hasar görmesi istenmeyen yüzeylere uygulanması halinde, aşınma kaynaklı oluşacak hasarları minimuma indirmektedir.

Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, aşınmaya karşı en dirençli malzemenin Epoksi 2 olduğu sonucuna varılmıştır. Uzun aşınma sürelerinde ve kuvvet artışlarında minimum kütle kaybı görülmüştür. Aşınmaya karşı dirençli yüzeyler oluşturmak için uygulanabilir. %10 B₄C tozu katkısının Epoksi 1 üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Uzun süre aşınmaya maruz kalacak yüzeylerde alternatif olarak kullanılabilir.

Yapılan deneylere ek olarak, kaplama malzemesine çeşitli katkı maddelerinin eklenmesi, daha uzun aşınma sürelerinde ve daha fazla yük altında deneylerin detaylandırılması ve epoksi kaplamaların tribolojik özellikleri hakkında daha detaylı bilgi edinmek adına önerilmektedir. Ayrıca yağlı sürtünme şartlarında deneyler gerçekleştirilebilir ve farklı ortam sıcaklıklarında epoksi kaplamaların aşınma davranışları değerlendirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abenojar, J., Martínez, M. A., Velasco, F., Pascual-Sánchez, V. and Martín-Martínez, J. M., “Effect of boron carbide filler on the curing and mechanical properties of an epoxy resin”, *The Journal of Adhesion*, 85(4,5), 216-238, (2009).
- Abenojar, J., Tutor, J., Ballesteros, Y., Del Real, J.C. and Martínez, M.A., “Erosion-wear, mechanical and thermal properties of silica filled epoxy nanocomposites”, *Wear*, 120, 42-53, (2017).
- ASTMG99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus1, (2017).
- Amiriyani, M., Alamdari, H. D., Blais, C., Savoie, S., Schulz, R. and Gariépy, M., “Dry sliding wear behavior of Fe₃Al and Fe₃Al/TiC coatings prepared by HVOF”, *Wear*, 342-343, 154-162, (2015).
- Avilés, M.D., Jiménez N. Saurín, A.E., Carrión, F.J., Sanes, J. and Bermúdez, M.D., “Tribological characterization of epoxy coatings modified with ionic liquids and graphene”, *Tribology International*, 149, (2018).
- Basavarajappa, S. and Ellangovan, S., " Dry sliding wear characteristics of glass–epoxy composite filled with silicon carbide and graphite particles", *Wear*, 296, 491-496, (2012).
- Bello, J.O. and Wood, R.J.K., “Wireline wear resistance of filled and unfilled polymeric coatings for downhole applications”, *Wear*, 267, 661-668, (2009).
- Bobby, S. and Samad, M.A., “Tribological characterization of epoxy hybrid nanocomposite coatings reinforced with graphene oxide and titania”, *Wear*, 466-567, (2020).
- Fernández-Álvarez, M., Velasco, F. and Bautista, A., “Epoxy powder coatings hot mixed with nanoparticles to improve their abrasive wear”, *Wear*, 448 – 449, (2020).
- Jakab, B., Panaitescu, I. and Gamsjäger, N., “The action of fillers in the enhancement of the tribological performance of epoxy composite coatings”, *Polymer Testing*, 100, (2021).
- Kan, W.H. and Chang, L., “The mechanisms behind the tribological behaviour of polymer matrix composites reinforced with TiO₂ nanoparticles”, *Wear*, 474-475, (2021).
- Kanchanomai, C., Noraphaiphaksa, N. and Mutoh, Y., “Wear characteristic of epoxy resin filled with crushed-silica particles”, *Composites Part B: Engineering*, 42, 1446-1452, (2011).

- Kim, S.S., Lee, H.G. and Lee, D.G., “The tribological behavior of polymer coated carbon composites under dry and water lubricating conditions”, *Composite Structures*, 77 (3), 364-372, (2007).
- Kumar, V., Sinha, S.K. and Agarwal, A.K., “Tribological studies of epoxy composites with solid and liquid fillers”, *Tribology International*, 105, 27-36, (2017).
- Lan, P., Gheisari, R., Meyer, J.L. and Polycarpou, A.A., “Tribological performance of aromatic thermosetting polyester (ATSP) coatings under cryogenic conditions”, *Wear*, 398-399, 47-55, (2018).
- Li, X., Gao, Y., Xing, J., Wang, Y. and Fang, L., “Wear reduction mechanism of graphite and MoS₂ in epoxy composites”, *Wear*, 257, 279-283, (2004).
- Luévano-Cabrales, O.L., Alvarez-Vera, M., Hdz-García, H.M., Muñoz-Arroyo, R., Mtz-Enriquez, A.I., Acevedo-Dávila, J.L. and Hernandez-Rodriguez, M.A.L., “Effect of graphene oxide on wear resistance of polyester resin electrostatically deposited on steel sheets”, *Wear*, 426-427, 296-301, (2019).
- Madhanagopal, A. and Gopalakannan, S., “Dry slide wear behavior of boron carbide filled epoxy composites”, *Materials Today Proceedings*, 5(2), 7289-7295, (2018).
- McCook, N.L., Burris, D.L., Kim, N.H. and Sawyer, W.G., “Cumulative damage modeling of solid lubricant coatings that experience wear and interfacial fatigue”, *Wear*, 262, 1490-1495, (2007).
- Medabalimi, S.R., Ramesh, M.R. and Kadoli, R., “Developing partially oxidized NiCr coatings using the combined flame spray and plasma spray process for improved wear behaviour at high temperature”, *Wear*, 478-479, (2021).
- Nine, M.J. and Losic, D., “Application of graphene in protective coating industry: prospects and current progress”, (eds: M. Aliofkhazraei, N. Ali, M. Chipara, N. B. Laidani and J.T.M. De Hosson), *Handbook of Modern Coating Technologies*, Avustralya: Elsevier, 453-492, (2021).
- Pan, G., Guo, Q., Ding, J., Zhang, W. and Wang, X., “Tribological behaviors of graphite/epoxy two-phase composite coatings”, *Tribology International*, 43, 1318-1325, (2010).

Poza, P. and Garrido-Maneiro M.A., “Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and wear behaviour”, *Progress in Materials Science*, 123, (2022).

Qi, H., Zhang, G., Wetzel, B., Österle, W., Wang, T. and Wang, Q., “Exploring the influence of counter part materials on tribological behaviors of epoxy composites”, *Tribology International*, 103, 566-573, (2016).

Rahsepar, M. and Mohebbi, F., “Enhancement of the wear resistance of epoxy coating in presence of MBT-loaded mesoporous silica nanocontainers”, *Tribology International*, 118, 148-156, (2018).

Sanes, J., Carrión, F.J. and Bermúdez, M.D., “Effect of the addition of room temperature ionic liquid and ZnO nanoparticles on the wear and scratch resistance of epoxy resin”, *Wear*, 268, 1295-1302, (2010).

Sharma, H., Misra, J.P. and Singh, I., “Friction and wear behaviour of epoxy composites reinforced with food waste fillers”, *Composites Communications*, 22, (2020).

Shi, G., Zhang, M.Q., Ronga, M.Z., Wetzel, B. and Friedrich, K., “Sliding wear behavior of epoxy containing nano- Al_2O_3 particles with different pretreatments”, *Wear*, 256, 1072-1081, (2004).

Srinivas, K. and Bhagyashekar, M.S., “Wear behaviour of epoxy hybrid particulate composites”, *Procedia Engineering*, 97, 488-494, (2014).

Symonds, N. and Mellor, B.G., “Polymeric coatings for impact and wear resistance”, *Wear*, 225-229, 111-118, (1999).

Taşyürek, M. ve Düzcukoğlu, H., “Epoksi reçinesinin bor karbür takviyeli aşınma davranışının iyileştirilmesi”, *İran Polym*, 31, 169–184 (2022).

Tahir, N.A.M., Abdollah, M.F.B, Hasan, R. and Amiruddin, H., “The effect of sliding distance at different temperatures on the tribological properties of a palm kernel activated carbon–epoxycomposite”, *TribologyInternational*, 94, 352-359, (2016).

Upadhyay, R.K. and Kumar, A., “A novel approach to minimize dry sliding friction and wear behavior of epoxy by infusing fullerene C_{70} and multiwalled carbon nanotubes”, *Tribology International*, 120, 455-464, (2018).

Url-1.(<https://www.ermepoksi.com/epoksi-zemin-kaplama/>)

Url-2.(https://www.weicon.com.tr/media/pdf/a2/5b/78/KAT_TR_Katalog.pdf)

Url-3.(https://www.weicon.com.tr/media/pdf/a2/5b/78/KAT_TR_Katalog.pdf)

Url-4.(https://www.weicon.com.tr/media/pdf/a2/5b/78/KAT_TR_Katalog.pdf)

Url-5.(https://www.researchgate.net/figure/Mechanisms-of-wear-in-general-adhesive-wear-abrasive-wear-fatigue-wear-corrosive-wear_fig1_321740989)

Url-6.(<https://malzemebilimi.net/asinma-nedir-adhezif-ve-abrazif-asinma-nedir.html>)

Url-7.(<http://reiloyusa.com/processing-tips/screw-barrel-wear/abrasive-wear/>)

Url-8.(https://www.researchgate.net/figure/Fatigue-and-pitting-wear-in-industrial-parts_fig5_347464033)

Url-9.(<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/corrosive-wear>)

Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F. and Friedrich, K., “Epoxy nanocomposites – fracture and toughening mechanisms”, *Engineering Fracture Mechanics*, 73(16), 2375-2398, (2006).

Xing, X.S. and Li, R.K.Y., “Wear behavior of epoxy matrix composites filled with uniform sized sub-micron spherical silica particles”, *Wear*, 256, 21-26, (2004).

Xu, Y.M. and Mellor, B.G., “A comparative study of the wear resistance of thermoplastic and thermoset coatings”, *Wear*, 255, 722-733, (2003).