

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİSYUM KARBÜRÜN SOĞUTMA SEKTÖRÜNDEKİ KULLANIMININ
İNCELENMESİ

YUNUS EMRE CANTEKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Önder AYER

EDİRNE - 2024

YUNUS EMRE CANTEKİN' in hazırladığı “**SİLİSYUM KARBÜRÜN SOĞUTMA SEKTÖRÜNDEKİ KULLANIMININ İNCELENMESİ**” başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri:

İmza

Doç. Dr. Önder AYER

.....

Doç. Dr. Gürkan İRSEL

.....

Doç. Dr. Ümit HÜNER

.....

Tez Savunma Tarihi: 10 / 01 / 2024

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Doç. Dr. Önder AYER

Tez Danışmanı

.....

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Özlem ÇETİN ERDOĞAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

.... / /

Yunus Emre Cantekin

İmza

Yüksek Lisans Tezi

Silisyum Karbürün Soğutma Sektöründeki Kullanımının İncelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada silisyum karbür malzemesinin soğutma sistemlerindeki kullanım alanları araştırılmıştır. Silisyum ve karbonun tek bileşiği silisyum karbürdür. Malzeme aşınmaya karşı dirençli ve aynı zamanda yüksek ısıya dayanıklıdır. Özetle Silisyum Karbür üstün bir aşındırıcı ve seramik bir malzemedir. Silisyum karbür uygulama alanları; kumlama enjektörleri, otomotiv su pompası contaları, rulmanlar, pompa bileşenleri, eşanjörler ve silisyum karbürünün yüksek sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci kullanan seramik malzemedir. Yüksek sıcaklık davranışından ziyade düşük sıcaklıkta aşınma ile çalışmak için daha fazla kullanılırlar.

Yıl : 2024

Sayfa Sayısı : 78

Anahtar Kelimeler : SiC, Aşındırıcı, Seramik.

Master Degree Thesis

Investigation of the Use of Silicon Carbide in the Cooling Systems Industry

Trakya University Institute of Natural Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this study, the usage areas of silicon carbide material in cooling systems have been investigated. The only compound of silicon and carbon is silicon carbide (SiC). The material is wear-resistant and at the same time resistant to high temperatures. In summary, Silicon Carbide is a superior abrasive and ceramic material. Application areas of SiC; it is a ceramic material used in sandblasting injectors, automotive water pump seals, bearings, pump components, heat exchangers and silicon carbide with high hardness, wear resistance and corrosion resistance. They are more used to work with low temperature wear rather than high temperature behavior.

Year : 2024

Number of Pages : 78

Keywords : SiC, Corrosive, Ceramic.

ÖNSÖZ

Soğutma sektöründe silisyum karbür malzemesinin farklı mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip olduğuna dair verilerin ortaya konulması endüstriyel ve bilimsel açıdan günümüzde büyük bir önem kazanmıştır. Bu çalışmada silisyum karbür malzemesini incelerken paslanmaz ile arasındaki farkları deneyler ile ortaya koyup, yapılmış diğer çalışmalarla desteklemeye odaklanılmıştır. Silisyum karbürün pompa üzerindeki bir sızdırmazlık elemanı olarak önemini ortaya koymak bu malzemenin sektöre sağlayacağı katkılar, mekanik ve fiziksel dayanımlarını yapılan deneyler ile ortaya koymuştur. Farklı üstün özelliklere sahip silisyum karbürün incelenmesinin endüstriye ve bilime katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Öncelikle danışmanlığımı üstlenen, tecrübeleriyle bana fikir veren, beni yönlendiren ve desteğini sunan değerli hocam Doç. Dr. Önder AYER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezin hazırlanmasındaki özellikle laboratuvar kullanımına verdikleri izinlerden ve deneylerde kullanılan malzemeler için desteklerinden dolayı Hacı Ayvaz Endüstriyel Mamuller Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi ile Malzeme Müh. Yunus YAZICI ve Kaynak Müh. Ümit ŞENTÜRK'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen eşime, anneme, babama ve Çevre Yüksek Mühendisi kardeşim Elif CANTEKİN'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1.Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. Literatür Çalışmaları	3
BÖLÜM 3	6
SİLİSYUM KARBÜR	6
3.1. Silisyum Karbür	6
3.2. Silisyum Karbürün Yapısı.....	7
3.2. Silisyum Karbür Üretimi.....	10
3.2.1. Acheson Prosesi	14
3.2.2. Diğer Yöntemler.....	15
3.3.Silisyum Karbür Çeşitleri.....	16
BÖLÜM 4	18

SİLİSYUM KARBÜRÜN KULLANIM ALANLARI.....	18
4.1. Genel Kullanım Alanları	18
BÖLÜM 5	24
SOĞUTMA SEKTÖRÜNDE SİLİSYUM KARBÜR.....	24
5.2. Soğutma Sektöründe Makine Ekipmanları	25
5.2.1. SiC İçeren Kaymalı Yataklar ve Rulmanlar.....	26
5.2.2. SiC Esaslı Isı Değiştiriciler	29
5.2.3. SiC Esaslı Sızdırmazlık Elemanları	30
BÖLÜM 6	33
MATERYAL METOD	33
6.1. Deneysel Çalışma Hakkında Teknik Bilgi	33
6.2. Deneysel Çalışma.....	37
6.2.1 Numunelerin Kütleli Ölçümü	37
6.2.2 Tuz Püskürtme (Tuz Korozyon) Testi	42
6.2.3. Hidroklorik Asit Testi	45
BÖLÜM 7	56
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	56
7.1 Sonuçlar ve Değerlendirme.....	56
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	Karbon
CO	Karbon monoksit
HCl	Hidroklorik asit
NaCl	Sodyum klorür
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
SiO	Silisyum oksit
SiO ₂	Silisyum dioksit
Si ₃ N ₄	Silisyum nitrür
SSiC	Sinterlenmiş silisyum karbür
%	Yüzde

Kısaltmalar

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
------	-----------------------------------

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. SiC tetrahedral yapısı.....	7
Şekil 3.2. Silisyum karbürün kristal kafes yapıları	8
Şekil 3.3. Tane yapısında nano SiC morfolojileri örnekleri	11
Şekil 3.4. Silisyum dioksit ve karbon parçacığının tepkimesinin gösterilmesi	13
Şekil 3.5. Sıcaklığa dayalı P _{SiO} /PCO değişimi.....	14
Şekil 5.1. Üç geleneksel rulmana sahip pompa maliyetlerinin üç silisyum karbür rulmanlı pompayla karşılaştırılması (KSB, 2023)	27
Şekil 5.2. Seramik kaymalı yataklar SiC	28
Şekil 5.3. Silisyum karbür mekanik salmastra	31
Şekil 5.4. Sıvı basıncı altında mekanik salmastranın tribolojik testinin geometrisi	32
Şekil 6.1. SiC+SiC salmastralı pompanın kesit görüntüsü (Masdaf, 2020).....	34
Şekil 6.2. Mekanik salmastra görseli	35
Şekil 6.3. Pompa döner milin hareketi	36
Şekil 6.4. Döner mil ile salmastra ilişkisi (AES, 2023)	36
Şekil 6.5. SiC/SiC/VİT/G60 numune görüntüsü.....	38
Şekil 6.6. 316/KAR/VİT/G13 numune görüntüsü	38
Şekil 6.7. Kumpas görüntüsü	39
Şekil 6.8. Elektronik dansimetre cihazı.....	41
Şekil 6.9. Numunelerin ilk ağırlık ölçüm değerleri.....	41
Şekil 6.10. Tuz püskürtme test makinesi	42
Şekil 6.11. Numunelerin kabin içerisinde yerleştirilmesi	44

Şekil 6.12. Tuz korozyon testi sonrası numune görüntüleri.....	44
Şekil 6.13. Tuz korozyon testi sonrası ölçüm görüntüleri	44
Şekil 6.14. Numunelerin HCI içine bırakılması.....	46
Şekil 6.15. Numunelerin incelendiği mikroskop - Nikon	46
Şekil 6.16. 316/KAR/VİT/G13 salmastranın 100X görüntüsü	47
Şekil 6.17. SİC/SİC/VİT/G60 salmastranın 100X görüntüsü	47
Şekil 6.18. Hassas kesme makinesi.....	48
Şekil 6.19. 48 saat HCI sonunda ölçüm değerleri.....	48
Şekil 6.20. 316/KAR/VİT/G13 - 1 ve 2 ağırlık ölçüm değerleri	49
Şekil 6.21. Zımpara makinesi.....	49
Şekil 6.22. Parlatma makinesi.....	50
Şekil 6.23. Dağlama makinesi.....	50
Şekil 6.24. 316/KAR/VİT/G13 numunelerin ağırlık karşılaştırmaları	51
Şekil 6.25. Mikroskopik görüntünün alındığı yüzey.....	51
Şekil 6.26. Numunelerin günlük ağırlık ölçüm değerleri.....	52
Şekil 6.27. 316/KAR/VİT/G13 - 1 numunesinin 100X görüntüsü	53
Şekil 6.28. SİC/SİC/VİT/G60 numunesinin 100X görüntüleri.....	54
Şekil 6.29. 316/KAR/VİT/G13 - 2 numunesinin 100X görüntüleri	54
Şekil 7.1. Tuz korozyon testi ağırlık sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 7.2. Tüm ağırlık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	58
Şekil 7.3. Zımparadan meydana gelen ağırlık kayıpları (316/KAR/VİT/G13)	59
Şekil 7.4. Ağırlık kaybı karşılaştırmasının şematik gösterimi	60
Şekil 7.5. Tüm ağırlık sonuçlarının yüzdesel değişimi	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Silisyum karbür türlerinin kristal yapısı	8
Çizelge 3.2. SiC mühendislik özellikleri	9
Çizelge 3.3. Farklı sic' lerin mukavemet değerleri	10
Çizelge 4.1. Üretim şekillerine göre SiC kullanım alanları örnekleri.....	20
Çizelge 6.1. Silisyum karbürü salmastra içeren pompanın teknik özellikleri.....	35
Çizelge 6.2. Deneysel çalışmada kullanılan salmastraların özellikleri (Başkurt, 2010) .	39
Çizelge 6.3. Numunelerin kumpas ölçüm değerleri.....	40
Çizelge 6.4. Tuz püskürtme test makinesi parametre değerleri	42
Çizelge 6.5. Tuz püskürtme test makinesinin özellikleri	43
Çizelge 6.6. Tuz korozyon testi sonrası ölçümler	45
Çizelge 6.7. Koroziyon ortam sınıfları (Fabmann, 2019).....	45
Çizelge 7.1. Tuz korozyon testi ağırlık sonuçları	57
Çizelge 7.2. Numunelerin toplam ağırlıklarının ölçüm sonuçları.....	58
Çizelge 7.3. Ağırlık kayıplarının ölçüm sonuçları	59
Çizelge 7.4. Ağırlık kaybı karşılaştırması.....	60

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kompozit malzemelerin tarihçesi çok eskiye dayanmaktadır. Kompozit; genel anlamda doğal ya da doğal olmayan bileşenlerin birleşmesi sonucu oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin uygulamaları, konvansiyonel malzemelerin tek başlarına belirli ihtiyaçları karşılayamadığı için artmaktadır (Çelebi Efe, 2010).

Endüstrinin ihtiyaç duyduğu ve ağır çalışma koşullarına karşı dayanımı yüksek seramik bir malzeme olan silisyum karbür (SiC) doğada arı halde bulunmamaktadır. Metaroidlerin üzerlerinde moissarit minerali olarak rastlanmaktadır. Yapay olarak ise ilk silisyum karbür üretimi uzun zamandan beri devam etmektedir. Önce İsveçli bilim adamı Jöns Berzelius tarafından bulunan, daha sonra 1885 yılında Acheson tarafından elektrikli ergitme fırınında üretilen ve tek kristal olarak da Leyl tarafından SiC üretimi gerçekleştirilmiştir (Balaban, 2005).

Elementlerin birçoğu, oldukça yüksek sıcaklıklarda karbon ile birleşmesi sonucu karbür isimli yüksek teknolojik seramikleri oluşturmaktadır. Karbürler, en yüksek erime sıcaklığına sahip malzemelerdir ve sertlikleri de epey yüksektir. Bu niteliklerinden ötürü karbürler nitelikli mühendislik malzemeleri olarak adlandırılırsalar da oksitlenme direncinin zayıflığı, özellikle nem içeren bölgelerde kullanım alanları sınırlanmaktadır. Fakat silisyum karbür yüksek oksidasyon dayanımı özelliği ile diğer karbür malzemelerden ayrılmaktadır. Bununla birlikte yüksek ısı iletkenlik, düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek sıcaklıklarda bile eşsiz kimyasal kararlılık ve korozyon dayanımı, elmas benzeri içeriğiyle yüksek sertlik ve iyi düzeyde aşınma dayanımı gibi niteliklerinden dolayı üzerinde detaylı çalışma ve araştırmaların yapıp incelendiği ileri teknolojik seramik malzemelerden biridir (Başkurt, 2010).

Metal matriksli kompozit sınıfında yer alan silisyum karbürün kullanımlarının hızla yaygınlaştığı görülmektedir. Sebebi ise yüksek mukavemetin yoğunluğa oranı ve yüksek elastik modülün yoğunluğa oranının elde edilmesi olmuştur. Bundan dolayı özel uygulamalarda da oldukça yaygın kullanıma sahip olmuştur (Çelebi Efe, 2010).

Yaygın kullanım alanına sahip SiC, yüksek sertlik ve aşınma direnci sebebi ile fren balatası, kontaktör ve yüzey sertliği gerektiren pompa, kompresör, mekanik sızdırmazlık elamanı olarak kullanılmaktadır. Yüksek korozyon dayanımı gerektiren makine elemanlarında, hava supapları otomasyon nozulları, roket nozul tutucularında, yataklarda kaplama malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Düşük termal genişmesi ve yüksek ısı iletkenliği mükemmel termal şok direnci sayesinde reküperatör, tüp gibi ısı iletim elamanı ve refrakter olarak kullanılmaktadır (Balaban, 2005).

1.1.Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma, silisyum karbür kompozit malzemesinin soğutma sektöründeki kullanımını arttırmaya yönelik yapılmıştır. Bu nedenle silisyum karbürün kullanım alanları araştırılarak soğutma sektöründeki kullanım yerleri belirlenmiştir. Silisyum karbürün mekanik özelliklerinden dolayı sağladığı avantajlar ortaya çıkarılmıştır. Malzemenin mekanik özellikleri literatürde yapılmış deneysel çalışmalar ile birlikte aktarılmıştır. Silisyum karbürün yüksek mukavemet etkisi ve diğer yüksek mekanik özellikleri sayesinde soğutma sektöründe sızdırmazlık elemanları, ısı değiştiriciler, rulmanlar gibi alanlarda kullanımlarının artması yönünde önerilerde bulunulmuştur.

Tez çalışmasının 1.Bölümünde silisyum karbürün potansiyeli ile ilgili giriş yapılmıştır. 2.Bölümde literatür araştırmalarına yer verilmiştir. 3.Bölümde silisyum karbürün tanımı, yapısı, özellikleri, çeşitleri ve üretimi hakkında kısaca bilgi verilmiştir. 4.Bölümde genel kullanım alanlarına değinilerek 5.Bölümde soğutma sektöründeki kullanım yerleri detaylandırılmıştır. 6.Bölümde silisyum karbür ile 316 paslanmaz salmastra malzemelerine uygulanan materyal metot aktarılmıştır. 7.Bölümde ise deney sonuçları değerlendirilerek sektöre katkı sağlayacağı ön görülmüştür.

Silisyum karbürün soğutma sektöründe; kullanımını için potansiyelini ön plana çıkarmak ve silisyum karbürün gelecekte yaygınlaşması amaçlanarak literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Literatür Çalışmaları

Silisyum karbür kompozitinin kullanım alanları çok çeşitli mühendislik uygulamalarında yer almaktadır. Ülkemizde ve dünyada kompozit malzemeler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Bunlardan birkaçı aşağıda özetlenmiştir.

Başkurt (2010) yaptığı çalışmada silisyum karbür ince filmlerin reaktif doğru akım manyetik alanda sıçratma metodu ile üretimi ve karakterizasyonunu incelemiştir. Yüksek yüzey performansına sahip kaplama teknolojilerini ön plana çıkararak, buhar fazından üretilen sert seramik ince film kaplamaların geniş kullanım alanları açıklanmıştır. Bu çalışmada, yüksek korozyon direncine ve tribolojik niteliklerde SiC, AISI M2 yüksek hız çeliği gibi malzeme üzerine reaktif doğru akım manyetik alanda sıçratma yöntemi ile ince filmler olarak biriktirildiği görülmüştür. Üretim değişkenlerinin, oluşan ince filmler üstündeki tesirlerine bakılmış ve üretim değişkenlerinin en iyi şartlara getirilmesi ile ilgili çalışma ve araştırmalar bitirilmiştir.

Yılmaz (2017) çalışmasında hegzagonal bor nitrürün işlenebilirliğinden yararlanarak silisyum karbüre daha basit şekil vermek ve nitelikleri artırmak için hBN-SiC kompozit üretimi araştırması yapılmıştır. Silisyum karbür parçacık büyümesinin aktivasyon enerjisi, sinterleme sıcaklığının bir fonksiyonu olarak hesaplanmış. Silisyum karbürün geniş kullanım alanlarından bahsedilerek SiC'lü bir kompozit malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir.

Çelebi Efe (2010) çalışmasında SiC takviyeli iletken bakır kompozitlerinin geliştirilmesi üzerine inceleme yapmıştır. Kompozit malzemelerin özelliklerine ve kullanım alanlarına değinilmiştir. Burada da bakıra SiC takviyesi sonucu bakırın kullanım alanının artacağı yönünde çıkarım yapılmıştır. Takviye fazında tane ebatları değiştirilerek özellikleri üstünde tesirleri incelenmiştir.

Balaban (2005) çalışmasında karbotermal redüksiyon yöntemiyle ön şekillendirilmiş silisyum karbür üretim parametrelerini incelemiştir. Bu yöntem ekonomik ve endüstride en çok kullanıldığı için üretim önemine değinilmiştir. Aynı zamanda bağlayıcılar (kolloidal silika ve etil silikat) kullanılarak pirolize pirinç kabuğundan şekillendirilmiş numuneler üzerinden silisyum karbür sentezi yapılmıştır. Silisyum karbürün özellikleri, üretimi yöntemleri ve kullanım alanları açıklanmıştır.

Turan (2004) çalışmasında bor karbür ve silisyum karbür kompozitlerinin sıcak presleme ile elde edilmesini incelemiştir. Düşük tane boyutlarındaki (6,5µm ve altındaki) bor karbür tozları ile 1,2 µm ve daha düşük silisyum karbür tozlarını yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta sinterlenmesi ile oluşan numunelerde mekanik özelliklerini değerlendirmiş. Bu çalışmada bor karbürün ve silisyum karbürün kullanım alanları ayrı ayrı açıklanarak özellikleri aktarılmıştır. Bor karbür-silisyum karbür kompozitlerinin türbin motorları, ısı ileten tüpler, savunma sanayi gibi de çok farklı alanlarda kullanıldığına değinilmiştir. Bor karbür kompozitinin kırılmaya karşı hassasiyeti ve düşük termal şok dayanımı gibi özelliklerinden dolayı ortaya çıkan zorlukları da göz önünde bulundurulmuştur. Silisyum karbür ile oluşturulan kompozitinde ise sıcaklığın yoğunluğa, sertliğe, mukavemete etkisi incelenmiştir.

Tülbez (2015) çalışmalarında karbon fiber takviyeli seramik matriksli (C/C-SiC) kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonunu incelemiştir. Bu kompozitin üretiminde sıvı silisyum emdirme metodu kullanılmıştır. Her bir üretim aşamasında emdirme işleminin verimliliği değerlendirilmiştir. Sıvı silisyum emdirme işleminin verimliliğini etkileyen tüm parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Üretilen C/C-SiC kompozitlerinin yoğunluk ve bükülme dayanımları üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Karbon/karbon ön kalıplara matris katkı malzemesi olarak karbon nanotüp eklenerek sıvı silisyum emdirilen kompozitlerin yoğunluk ve bükülme dayançlarında artış meydana gelmiştir. Burada silisyum karbürün kinetiği hızlandırdığı görülmüştür.

Öğünç (2006) çalışmasında sıcak presleme yöntemi ile sinterlenmiş α -SiC matrisli B₄C kompozitlerinin özelliklerinin üzerine inceleme yapılmıştır. Burada silisyum karbür için sahip olduğu yüksek sertlik, düşük yoğunluğu ve termal şok dayanımından dolayı günümüzde ileri teknoloji seramik malzemeler arasında dikkat çekici olduğuna değinilmiştir. Bu malzeme için basınçsız sinterleme yöntemi ile şekillendirmenin de kullanılmaya başlanması, malzeme üzerindeki ilginin çok arttığını göstermiştir. Burada önceki çalışma ve araştırmalarda silisyum karbüre belirli ölçekte yapılan bor karbür takviyesinin, değişik sıcaklıklarda silisyum karbürün yoğunluk ve kırılma tokluğu sonuçlarına yaptığı etkiler incelenerek pozitif sonuçlar çıkarıldığı için; SiC içine farklı oranlarda B₄C ilaveleri yapılarak farklı sıcaklıklarda sıcak preste sinterlenmiştir. Sinterleme sonucunda malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Silisyum karbürün geniş kullanım alanları olduğuna değinilmiştir.

Çağlar (2015) çalışmasında ise bor karbür / bor karbür silisyum tabakalı kompozitlerin spark plazma sinterleme tekniği ile üretimi ve karakterizasyonu incelenmiştir. Oluşturulan numunelerde yoğunluk, sertlik, kırılma tokluğu ölçüm değerleri yazılmıştır. Elde edilen fazlar ise elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Katkı maddesi ve sıcaklığın sinterleme davranışları üzerine olan etkisine değinilmiştir. Sinterleme davranışlarının incelendiğinde malzemelerde Si katkısının etkileri belirlenmiştir.

Yalçın ve Çanakçı (2022), çalışmalarında ise silisyum karbür ile güçlendirilmiş çinko-alüminyum alaşımının aşınma parametrelerini incelemişler. Bu çalışmada matris malzemesi çinko-alüminyum alaşım tozları içerisine takviye olarak silisyum karbür tozları ilave edilmesi ile ileri bir teknik olan toz metalürji yöntemi sayesinde kompozit numuneler üretmişler. Aşınma deneyleri sonrasında mikroskop yardımıyla resimlere bakılarak aşınma etkilerini belirlemişler. SiC takviyesinin kompozitler de fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirerek, aşınma dayanımında önemli katkılarının olduğunu tespit edilmiş.

Bu çalışmada ise soğutma sektöründeki kullanım alanları incelenerek, silisyum karbür malzemenin başlıca özellikleri ön planda tutularak yapılan deney sonuçları ile sektörel gelişimine yönelik öneride bulunulacaktır.

BÖLÜM 3

SİLİSYUM KARBÜR

3.1. Silisyum Karbür

Endüstrinin hızla gelişmesi ile birlikte doğal kaynakların tükenmesi riskini ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği oldukça önem arz eden bir konu olarak gündeme gelmektedir. Bir kızıl derili atasözünün dediği gibi doğa atalarımızdan bize miras değil, torunlarımızın bize emanetidir. Bu nedenle sürdürülebilirlik için kullanılan enerjinin mümkün olduğu ölçüde geri kazanılması gerekmektedir. Yapılacak enerji tasarrufu sayesinde hem çevreye duyarlı bir üretim gerçekleştirmek hem de ülke ekonomisine katkı sağlamak için ileri teknoloji malzeme seçimleri ile mümkün olabilecektir (Kocabaş ve Savaş, 2018).

SiC üretim sentez prosesi Acheson tarafından 1892 yılında başlatılarak konvensiyonel bir karbotermal indirgeme metodunu esas almaktadır. Bu metotta yüksek enerji tüketimi, üretim adımları mevcuttur ve çok kötü kalitede SiC elde edilmektedir. Bundan dolayı birçok alternatif metot bulunmuştur. SiC hazırlanması için kimyasal buhar çöktürme, fiziksel buhar biriktirme, sıvı hal sinterlemesi, sol jel, ve mekanik alaşımlandırma en çok kullanılan üretim yöntemleridir (Yılmaz, 2017).

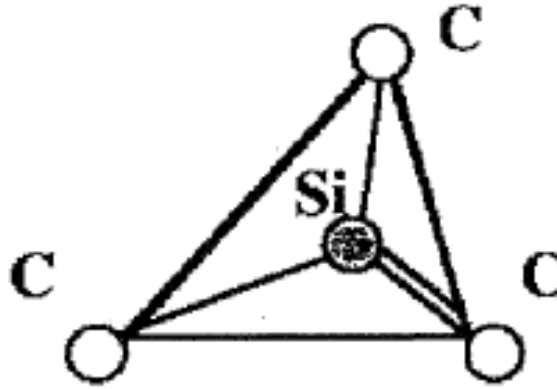
Young modülü (yüksek elastiklik modülü), yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanım, kimyasal kararlılık ve ısı iletkenliği ile silisyum karbür en mühim yüksek sıcaklık yapıları kompozitlerdendir. Silisyum karbürün mekanik özelliklerinin yanı sıra elektronik ve yarı iletken özelliklerinden ötürü birçok kullanıldığı yer vardır. SiC yüksek sıcaklıklarda çok iyi mekanik özelliklere sahiptir ancak işlenmesi zor bir malzemedir. Bu yüzden karışık şekle sahip parçaların hassas aletler ile işlenebilmesi kısıtlıdır.

Yüksek sertliği, düşük yoğunluğu, ısı iletkenliği, termal Şok dayanımı ve deđiŐmez eğme mukavemetinin sayesinde ileri teknolojik seramiklerdendir. (Bakar, 2009).

Silisyum karbürün ileri teknolojik bir malzeme olarak öne çıkmasına sebep birçok özelliği mevcuttur. Bu özelliklerinden bazıları; yüksek ısı iletkenliğinin olması, düşük ısı genleşme katsayısına sahip olması, muhteşem ısı Şok dayanımı göstermesi, yüksek sertliği, yarı iletkenliği, düşük yoğunlukta olması ve yüksek sıcaklıklarda bile yüksek direnç gösterebilmesinden dolayı, yüksek elastik modülü, yüksek sıcaklıklarda üstün kimyasal kararlılığı, korozyon direnci ve oksidasyon direnci, yüksek aşınma dayanımı, iyi derecede tribolojik özellikleri ve elmadan daha yüksek optik kırılma noktasına sahip olması gösterilebilir (Başkurt, 2010).

3.2. Silisyum Karbürün Yapısı

Si ve C atomları yapıda üç açılı kovalent bağları oluşturarak üstün molekül karakteri göstermektedirler. Bu sırada her komşu 4 tetrahedral tarafından sarılmaktadır (Balaban, 2005) (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. SiC tetrahedral yapısı

Silisyum karbür, kübik, hegzogonal veya rombohedral olarak kristalleşebilmektedir. Hegzogonal ve rombohedral yapısı α SiC formunda iken, β SiC ise kübik yapıdadır. α SiC'ler çinko sülfid ve wurtzite yapısıyla aynı yapıdadır.

β SiC ise kübik çinko sülfür ile aynı yapıdadır. Çinko sülfürün atomik düzeni elmas ile aynıdır. (Balaban, 2005).

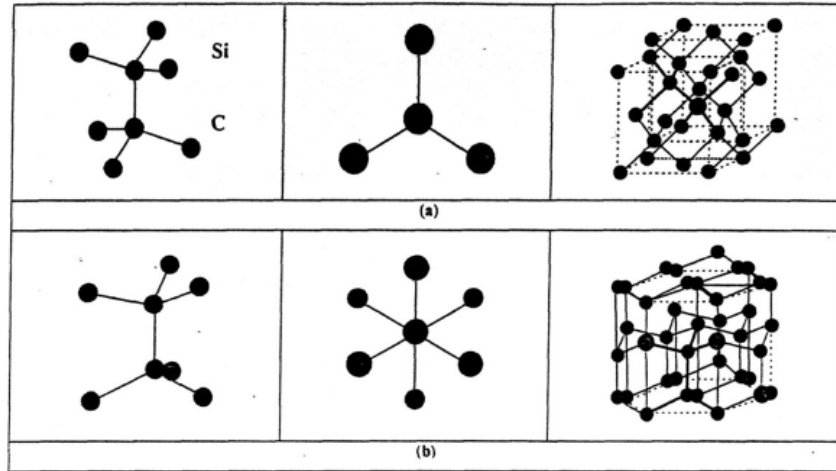
SiC'ün en belirgin özelliği çok kristalli olmasıdır. Bu kompozit bileşiğinin 100'den fazla türü vardır. Çizelge 3.1.'de en çok kullanılanları gösterilmiştir. Silisyum karbürüne sarı rengi 15R, yeşil rengi 6H, yeşil- sarı rengi ise 4H vermektedir.

Silisyum karbür kompozit bir madde olup, 1400 ila 1800°C'lerde " β " formunu alarak kübik biçimde, 2000°C'lerin üzerinde ise, " α " formunu alarak Hegzagonal ve rombohedral olacak şekilde bulunmaktadır (Çelebi Efe, 2010).

Çizelge 3.1. Silisyum karbür türlerinin kristal yapısı

SiC Türleri	Kristal Yapısı
α - SiC (Yüksek Sıcaklık Hali)	6H, 15R, 4H
β - SiC (Düşük Sıcaklık Hali)	3C

Silisyum karbürün kristal yapıları Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. En çok kullanılanı ve mühendislik uygulamalarında önerileni; '3C' kübik yapıya β -SiC dir. 4H, 6H, 15R gibi diğer tipleri ise; α - SiC kristal yapıdadırlar (Öğünç, 2006).



Şekil 3.2. Silisyum karbürün kristal kafes yapıları

a: Kübik, b: Hegzagonal (Gençkan, 2009)

Çizelge 3.2.'de silisyum karbürüne ait mühendislik özellikleri verilmektedir. Mekanik özelliklerinde sinterlenmiş silisyum karbürü, yükselen sıcaklıkla yüksek mukavemet değerleri göstermektedir. Zamana bağlı olarak mükemmel sürünme ve düşük

çatlak ilerleme hızı göstermektedir. Reaksiyona bağlı SiC’de, mikroyapıda serbest silisyum varlığı, sinterlenmiş silisyum karbürle karşılaştırıldığında ilerleyen sıcaklıklarda daha düşük mukavemet değerleri sergilemesine neden olmaktadır. (Başkurt, 2010).

Çizelge 3.3.’te silisyum karbürün oda sıcaklığındaki ve ilerleyen sıcaklıklardaki mekanik özellikleri gösterilmektedir (Balaban, 2005).

Çizelge 3.2. SiC mühendislik özellikleri

Kompozisyon	SiC
Moleküler Ağırlık	40.097 g/mol
Yoğunluk	α SiC 3.211 g/cm ³
	β SiC 3.214 g/cm ³
Latis Parametresi	3C-SiC a= 4.3596 Å ^o
	6H-SiC a= 3.0813 Å ^o c= 5.1198 Å ^o
Uzay Grubu	6H-SiC P6 ₃ mc
Ergime Noktası	2545 °C @ 1atm(β SiC)
	2830 °C @35 atm(β SiC)
Özgül Sıcaklık	α SiC 27.69 J/molK
	β SiC 28.63 J/molK
Termal İletkenlik	α SiC 41 W/m °C
	β SiC 25.5 W/m °C
Termal Genleşme	α SiC 5.12 x10-6/°C
	β SiC 3.8 x10-6/°C
Vickers Sertlik Değeri	30–35 GPa
Elastisite Modülü	300–475 GPa
Kesme Modülü	192 GPa (β SiC)
Hacim Modülü	96.6 GPa (β SiC)
Yüksek Sıcaklık Direnci	2000 °C
Eğme Direnci	350–600 Mpa
Poisson Katsayısı	0.183–0.192

Çizelge 3.3. Farklı SiC'lerin mukavemet değerleri

Malzeme Tipi	Young Modülü Gpa		Kırılma Tokluğu Mpa.m	Eğme Mukavemeti	
	20°C	1400°C		20°C	1400°C
Sıcak-Preslenmiş SiC aralık	440 430-450	380	3,9	650 300-800	500 175-575
Sinterlenmiş SiC aralık	410 375-420	372 300-400	4,6 3,5-5,5	460 345-485	460 345-485
Reaksiyon bağlı SiC aralık	380 360-400	275 200-320	4,9 3,5-6	310 175-450	190 70-450

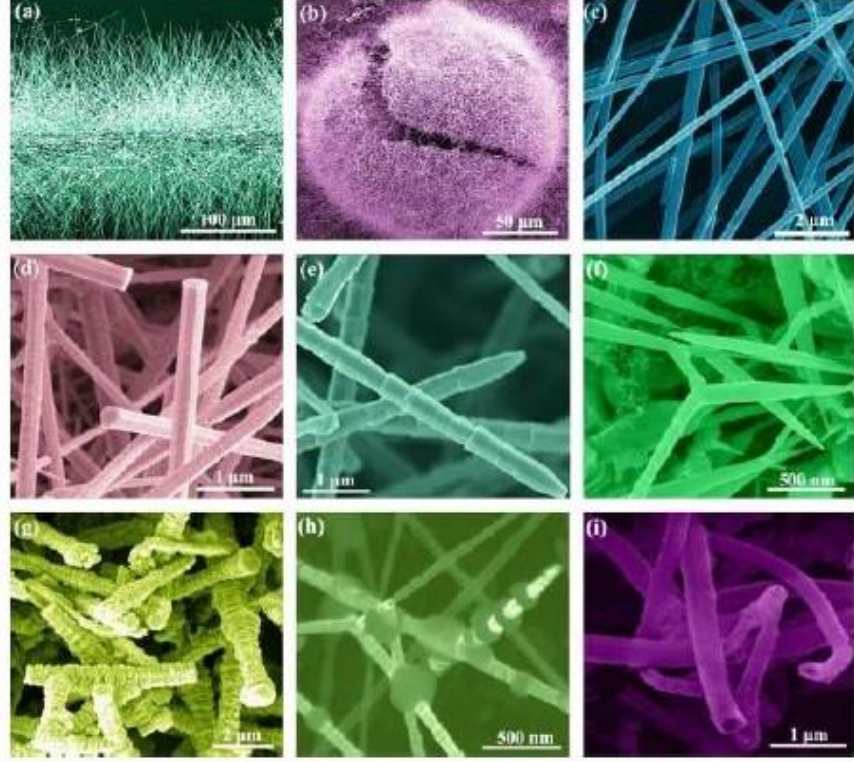
SiC seramikleri yüksek sıcaklıklı elektronik ekipmanlar için çok uygun bir malzemedir. Bunun sebebi tipik özelliklerinin yanı sıra ayırt edici özellikleridir. Silisyum karbürler üretilme yöntemlerine göre, katı veya gözenekli formda üretilmektedir (Bulucu, 2016).

3.2. Silisyum Karbür Üretimi

Silisyum karbür toz hal üretimi için birbirinden farklı birçok metot olmasının yanı sıra silikanın karbon termal indirgenmesi ve karbürlenmesi çok yaygın bir üretim şeklidir. Silisyumun dioksit veya silikanın karbo termal indirgenmesi sıcaklık, basınç, atmosfer, süre benzeri birçok değişkene bağlıdır. Cheng ile arkadaşları serpenti ekstraksiyon sonucu meydana gelen %97 oranında amorf silika kullanılarak yapılan silisyum karbür bileşiminde ilk oluşan malzemenin tepkiyen olması tepkime sıcaklığını düşüğe uğrattığı görülür. Tepkime süresinin uzaması ile silisyum karbür elde edilmesini arttırdığını raporlamışlardır. Silisyum karbürün 2100°C'de β -SiC halinden α -SiC haline evrildiği ve tam zıttına evrilmesinin azot ortamında 40 atm gibi yüksek basınçlara ulaşarak oluştuğu görülmüştür (Kocaman, 2016).

Siliskarbürün karbotermik tepkime ile birleşimi pahalı olmayan ve kolay bir metottur. Ancak yüksek tepkime sıcaklığı ve uzun tepkime zamanı ile elde edilen bileşimin topaklanması (aglomera) işlemin dezavantajı gibi gösterilebilir. SiC tepkimesi iki aşamada gaz-katı tepkimesi olarak oluşmaktadır.

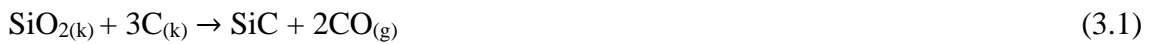
Tepkime sıcaklığı 1500°C ve altında iken silisyum oksit ile karbon tepkimesi sonucunda toz halinde SiC oluşur. Tepkime sıcaklığı 1600°C'nin üstüne çıkınca silisyum oksit ve karbon monoksit tepkimesi ile visker haline dönüşen malzemeler meydana gelmektedir. Şekil 3.3.'te oluşmuş nano ebatta SiC tane yapılarına örnekler gösterilmiştir (Kocaman, 2016).



Şekil 3.3. Tane yapısında nano SiC morfolojileri örnekleri

a) karbon fiber nanotelli yapılar b) ultra uzun nanotelleri c) nanotelleri d) nano prizmalar e) nano bambular f) nano iğnecikleri g) nano kemikleri h) nano zincirleri ve i) nano tüpleri

Denklem 3.1'deki tepkimedeki gibi ısıtılan bir tepkime olmasının yanında tepkime çok ağır şekilde devam etmektedir. Bu nedenle uygulamada bu tepkime bazı aşamalardan meydana gelmektedir; (Kocaman, 2016).



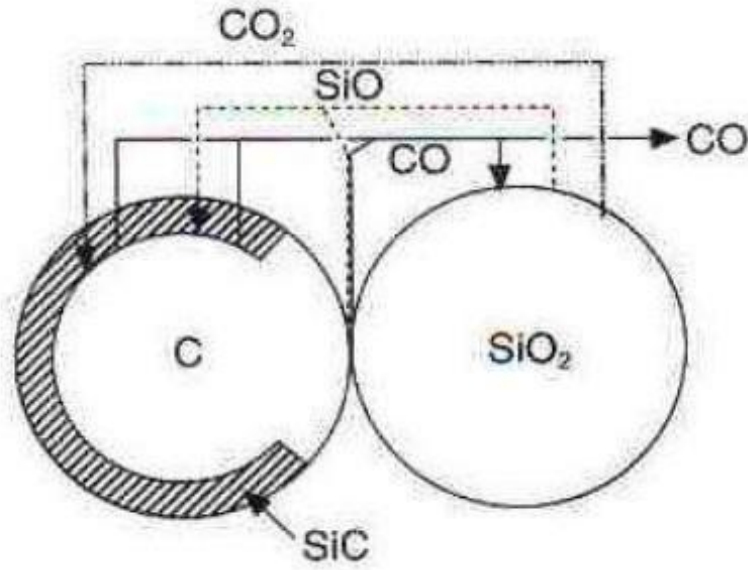
$$\Delta H^{298} = 618.5 \text{ KJ/mol}$$

Tepkimenin başlangıcı, katı ile katı ya da katı ile sıvı tepkimelerini barındıran ısıtılan bir tepkimedir. Silisyum dioksit ile karbon tepkimesi sonucunda silisyum oksit buharı ile karbon monoksit oluşur (Denklem 3.2). Kullanılan başlangıç malzemelerinin ürünün morfolojisi ve tepkime hızında bir tesiri bulunmaktadır. SiO₂ ve karbon kaynağı toz ebatının küçüklüğü tepkimeyi oldukça hızlandırmaktadır.

Tıpkı Si₃N₄'deki gibi SiO ara fazının oluşması ve süregelen tepkimeleri SiC üretiminde etkili olmuştur.



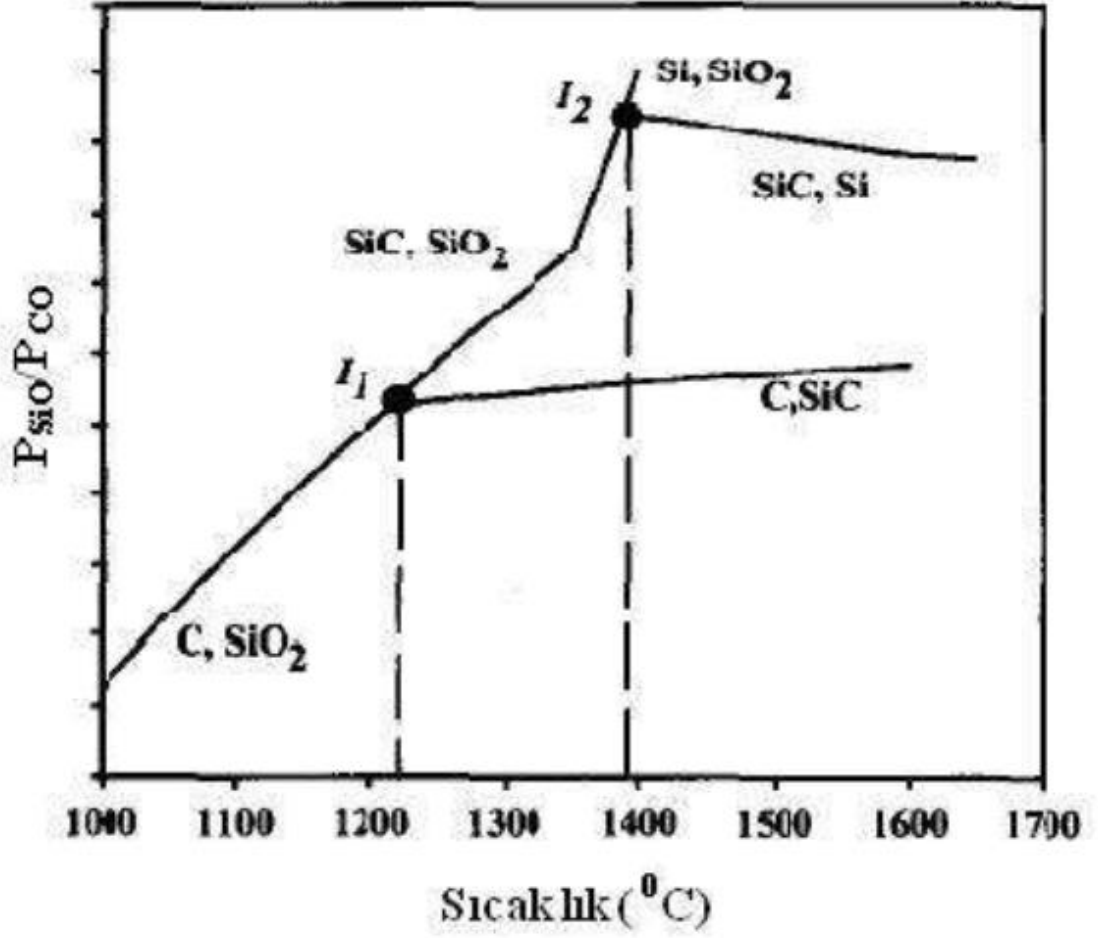
Tepkimenin sonraki adımında SiO buharı ile karbon tepkimeye sokulmaktadır. Ekzotermik tepkime sonucunda silisyum oksit ve karbon monoksit gazını oluşturmaktadır. Şekil 3.4.'te C ile SiO₂ tepkimesi meydana gelen gaz fazı şema halinde gösterilmiştir. Bu tepkimedenden sonra, meydana gelen silisyum oksit buharı, karbon ve karbon monoksit ile girdiği ısıveren katı-gaz tepkime sonucunda silisyum karbür bileşeni halini almaktadır. Meng ile arkadaşları yaptıkları araştırmada izole atmosfer gibi kullanılan argon gazının tepkimenin tam da şu adımında tesir ettiğini raporlamışlardır. Sistemdeki mevcut argon gazı basıncının silisyum oksitten düşüklüğü durumunda ise silisyum oksit kısmi basıncının yüksekliğinden ötürü silisyum oksit, silisyum ve silisyum dioksite ayrıştırılır. Argon basıncı silisyum oksit ve karbon monoksit basıncından yüksekte olduğunda denklem 3.3. ile visker halinde SiC oluşumu meydana gelir. Moshtaghioun ile arkadaşları yaptıkları araştırmada öğütmeden sonra denkleme dahil olan demirin bulaşmasının silisyum oksit buharı meydana getirmede olumlu etkilediği görülmüştür. Bunun da silisyum karbür oluşumunu pekiştirdiğini raporlamışlardır. Silisyum karbür gelişmesi tepkimesinin meydana geldiği yüzeyleri düşürmektedir. Ayrıca tepkime hızlarının düşmesine sebep vermektedir. (Kocaman, 2016).



Şekil 3.4. Silisyum dioksit ve karbon parçacığının tepkimesinin gösterilmesi



Denklem 3.2 ve 3.3 tepkimelerinin meydana gelmesi silisyum oksit ve karbon monoksitin kısmi basınçlarına (P_{SiO} , P_{CO}) ve de sıcaklığa dayalıdır. Şekil 3.5.'te toplam basıncın 1 kPa'a eşit olduğu denge şartlarındaki $P_{\text{SiO}}/P_{\text{CO}}$ oranının sıcaklığa dayalı bir fonksiyonu olarak belirtilmiştir. Eğride $P_{\text{SiO}}/P_{\text{CO}}$ oranı sıcaklıkla 1220°C 'deki I_1 değerine dek arttığı görülür. O değerde silisyum oksit ve karbon monoksitin (Karbon, Silisyum karbür, Silisyum dioksit) üç fazının dengede olduğu bir andır. Bu sıcaklık değerinin üzerini görmesiyle SiC meydana getirilebilir. 1200°C 'nin üzerine çıkması sonucu SiC meydana geldiği Şekil 3.5.'te görülebilmektedir (Kocaman, 2016).



Şekil 3.5. Sıcaklığa dayalı P_{SiO}/P_{CO} değişimi

3.2.1. Acheson Prosesi

Acheson prosesi geleneksel bir metot olmasının yanı sıra silisyum karbür üretimine açık bir yöntemdir. 2200°C ile 2400°C gibi yüksek sıcaklıklar altında silisyum ve petrokokun katı halinin tepkimesi sonucunda silisyum karbür kompozitinin birleşimi meydana getirilir.

Tepkimenin 1400 ile 2000°C aralığında oluşturulması durumunda β -SiC sentzlenebilmektedir. Aşağıdaki tepkimeye göre gerçekleşmesinin yanı sıra bu tepkime buhar fazında kütle taşınımına bağlı dört alt tepkimeyle meydana gelmektedir (Denklem 3.4).



Tepkimenin başında silisyum dioksit tepkime noktasındaki karbonla reaksiyona sokularak gaz halindeki silisyum monooksit ile karbon monoksit ayrışır (Denklem 3.5).



Daha sonra sistemdeki CO, mevcut olan SiO₂ ile tepkimeye girerek SiO ve CO₂ gazlarının oluşumunu meydana getirmektedir (Denklem 3.6).



Tepkime, meydana gelen karbon dioksitin karbonla indirgenerek yapıya karbon monoksit kazandırması ile sürer (Denklem 3.7). Başlangıçtaki malzemelerin nano boyutta olmasından, meydana gelen silisyum oksit katı olan karbonun yüzeyinde katı ve gaz tepkimesiyle heterojen çekirdeklenme ile nano β-SiC parçalarını meydana getirir. Ancak nano viskerler tepkime 3.3'teki karbon monoksit ve silisyum oksit gazlarının aralarında meydana gelen gaz ve gaz tepkimesi sonucunda meydana gelir.



Bu çevrim sürerken oluşturulan silisyum monooksit yapıdaki karbon tepkimeye sokularak silisyum karbür meydana gelir (Denklem 3.8). Tepkime sonucunda öncelikle 525°C'de β-SiC meydana gelmektedir. Ancak Acheson işlemiyle tepkime 1527 °C üstünde gerçekleşmektedir (Kocaman, 2016).



3.2.2. Diğer Yöntemler

Acheson işlemi enerji ihtiyacı ve yüksek sıcaklık ile birlikte üretilmiş malzemenin kullanılmadan önce öğütülmesi ve saflaştırılması nedeniyle kısa olmayan bir süreçtir. Acheson prosesi haricinde oda sıcaklığında daha düşük enerji tüketerek meydana getirilen yüksek enerji değirmeni emsal gösterilebilir.

Ayrıca SiC tozlarının sinterlenebilir ve nano ebatlarda üretme olanağı sağlayan metotlar; kimyasal buhar biriktirme metodu, sol-jel metodu ve oksijensiz ortamda yakma veya lazer buhar metodu örnek gösterilebilir (Kocaman, 2016).

Yüksek enerjiye sahip öğütülme metodu, öğütülme ve tepkimenin yüksek enerjiye sahip alanda aynı anda meydana getirildiği başka bir metottur. Bugünlerde aşırı doygun katı çözeltiler, amorf haller ve nanokristal katı seramik üretilmesinde çok yaygın bir metottur. Bu yöntem kullanılarak nitrürler, karbürler, silisler gibi 50'ye yakın farklı alaşım üretilmektedir. Öğütme işleminde metal veya seramik bilyelerin kullanılması nedeniyle yüksek enerjili öğütme ile % 100 saf Si_3N_4 seramik üretimi sınırlıdır. Ancak bu metotla silisyum karbürlerin üretilmesi görece basittir. Geleneksel öğütme ekipmanlarında kimyasal tepkimenin tam aktivasyonu sağlanamaz. Yüksek enerjili öğütülme sistemi, güçlü ivme alanı nedeniyle yer çekimi alanını göz ardı eder. Bu tür ekipmanlar aynı zamanda mekanik alaşımlama ve kimyasal mekanik uygulamalar için de kullanılabilir. Sürekli mekanik aktivasyon, katı haldeki kimyasal tepkime hızını artırır. Başlangıç aşamasında tepkime olmaz, bir zaman sonra parça ebatı düşer ve kimyasalların bazılarında kusurlu alanlar meydana gelir ve daha sonra tepkime oluşur. Çok ince ürünlerin üretilmesinde, mineral ve atık işlemlerinde metallerin arıtılması gibi yöntemler uygulanabilir. Bu tür mekanik alaşımlama işlemi, mekanokimyasal proses olarak da geçen bu metot, grafit ile titanyum, krom, mangan, demir, kobalt, nikel, zirkonyum, molibden, tantal, tungsten ve renyum benzeri birçok elementin karbürle reaksiyonu için test edilmiştir. SiC'ün birleşiminde yapılmış araştırmalarda 300 saat zamanın ardından kübik halde SiC meydana gelmiştir. Bununla birlikte bu metot ile mikron altı ebatlarında kristalin SiC üretimi de meydana getirilmiştir. Fakat bu işlemin en büyük dezavantajı, üründe demir barındıran kontaminasyonları içermesidir.

SiC toz üretiminde uygulanan bir başka yöntem ise Sol-jel metodudur. Bu metot ile görece daha az maliyet ile saflığı yüksek, kimyasal homojenliği yüksek, görece daha düşük sıcaklıkta gereğinden fazla incelikte SiC toz üretilmesine olanak verir (Kocaman, 2016).

3.3.Silisyum Karbür Çeşitleri

Açık gözenekli silisyum karbürler olarak kendi içinde, Silikat Bağlı SiC, Kristal SiC, Nitrür Bağlı SiC, Sıvı Fazda Sinterlenmiş SiC, Reaksiyon Bağlı Silisyum Sızdırılmış SiC, Sıcak Preslenmiş SiC, Sinterlenmiş SiC olarak sınıflandırılmaktadır.

Silikat Bağlı SiC: Büyük ebatlardaki silisyum karbürü %5 ila 15 oranlarında oksit bağı eklenir. Silikat bağı SiC üretilmesi metodu pahalı değildir. Ancak yapılarında oksit olması korozyon ve yüksek sıcaklık dirençlerini düşürür (Bulucu, 2016).

Kristal SiC: Katkısız haldeki SiC tozları oluşturur. Bağlayıcılık özelliği olan katkıları eklenmediğinden üretim sinterleme sıcaklıkları çok yüksektir (2300-2500 °C).

Bundandır ki bu malzemeler 1650 °C gibi yüksek sıcaklığa dayanabilirler. Kristal SiC seramik malzemeler içeriklerindeki mevcut %10 ila 15 oranında açık gözenekleri ile yüksek termal şok direnci gösterirler. Ancak içerik gözenekliliği sebebi ile korozyon dayanımları ve mukavemet sıkı silisyum karbürlere oranla azdır.

Nitrür Bağlı SiC: Öncelikle azot sonrasında ise oksitleyen gaz atmosferinde sinterlenmiş SiC ve silisyum tozlarından meydana gelir. Oluşan ürün %5 gibi minik gözeneklere sahiptir. Bu seramikler, kristal SiC seramiklere oranla daha yüksek korozyon dayanımı ve mukavemet gösterirler. Ancak çalışma sıcaklık değerleri görece düşük seviyededir (1500 °C). Bir başka özelliği ise demir dışındaki ergime gösteren metallere ıslatılmasının zor olmasıdır.

Sıvı Fazda Sinterlenmiş SiC: 2000 °C üzeri sıcaklık ve 30 MPa üstünde yüksek basınçlarda sinterlenmiş toz SiC ve oksitin birleşiminden meydana gelirler. Tane yapısının inceliği ve yapısının gözeneksizliği sebebiyle iyi bir mukavemet direnci sergilerler.

Reaksiyon Bağlı Silisyum Sızdırılmış SiC: Ergimiş fazdaki silisyumun, silisyum karbür ile tepkimeye sokularak SiC ile bir birleşim meydana getirir. Böyle oluşturulmuş SiC kompozitleri 1380 °C sıcaklık altındaki değerlerde yüksek mukavemet, korozyon dayanımı, aşınma ve ısıl şoka direnç sergilerler.

Sıcak Preslenmiş SiC: 2000 atm üstündeki basınçta baskılanırlar bununla birlikte mükemmel mukavemet gösterirler.

Sinterlenmiş SiC: Silisyum karbürler inert gaz ortamında ve doğal basınçta eski bir sinterleme metoduyla ve 2000 ila 2200 °C sıcaklıkta meydana gelmektedir. Bu ürün 1600 °C'ye kadar sertliği yüksek, korozyona yüksek dayanım ve mekaniksel direnç gösterir (Bulucu, 2016).

BÖLÜM 4

SİLİSYUM KARBÜRÜN KULLANIM ALANLARI

4.1. Genel Kullanım Alanları

Silisyum karbür, yüksek sertlik ve aşınma direnci özellikleri sayesinde fren balatası, kontaktör ve yüzey sertliği gerektiren pompa, kompresör, mekanik sızdırmazlık elemanı olarak çok yaygın kullanım alanlarına sahiptir (Balaban, 2005).

Yüksek aşınma ve korozyona karşı dayanım, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek ısıl iletkenlik, termal şoklar karşısında yüksek dayanım ile alçak bir sürtünme katsayısı gibi özellikleri gösterir. Bu özellikleri ile endüstride sızdırmazlığı ve sürtünmeyi sağlayan parçalarda kullanıldığı görülmektedir (Yılmaz, 2017).

Yüksek korozyon dayanım özelliği olduğu için bu dayanım gerektiren ortamlardaki makine elemanlarında kullanılırken, hava sübapları, otomizasyon nozüllerinde, yataklarda kaplama malzemesi ve zırh malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Balaban, 2005).

Soğutma sektöründe yüksek ısı iletkenliği, düşük termal genleşmesi ve mükemmel termal şok direnci sayesinde reküperatör (ısı değiştirici), tüp gibi ısı iletim elemanı ve refrakter olarak kullanım alanları mevcuttur (Balaban, 2005).

Silisyum karbür saflık seviyelerine göre üç ana grupta (metalürjik, abresif, sinter amaçlı) sınıflandırılmaktadır. Yüksek saflıkta olan (yeşil renkli) silisyum karbür, mühendislik seramiklerinde sinter amaçlı kullanılırken, saflığının %97,5 veya daha düşük olduğu durumlarda malzeme abresif ve refrakter amaçlı olarak, saflığı %90'ın altına düştüğünde ise metalürjik uygulamalarda kullanılmaktadır. İleri teknoloji malzemelerin ihtiyaç duyulduğu birçok yerde kullanılmaktadır (Turan, 2004).

Yüksek performanslı seramiklerde en yaygın olarak sinterlenmiş ve reaksiyonla sinterlenmiş silisyum karbür kullanılır. Sertlik özellikleri, kimyasal saflığı ve aşınma direnci nedeniyle ticari uygulamalarda kullanılır (Turan, 2004).

Havacılık endüstrisinde aşınmaya dayanıklı silisyum karbür, pompalarda, petrolde, ulaşımda, kalıplarda, yakıt tanklarında ve pompa malzemelerinde kullanılmaktadır. Isı direnci nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde yüksek sıcaklıktaki roket nozullarını bağlamak için, ısı eşanjör borularında ve kaplama fırınları bileşenlerinde kullanılmaktadır (Turan, 2004).

Isı transferi gaz türbinleri, kanal izolasyonu, bacaların izolasyonu, ısıtıcıların kaplamaları, borulama, ısıtma astarı, fırın ve arka yalıtım, depolama ünitesi izolasyonu, otomotiv egzoz ısı kalkanları, alüminyum transferi oluk kapakları SiC'ün başlıca uygulamalarındandır. Bununla birlikte fırın kirişleri, plakalar, termokupl boruları, doğrudan olmayan ısıtıcı uygulamalarında cam, metal ve kimya sanayisinde ergime potalar, brülör nozulu ve alev yönlendiriciler olarak, gaz türbinleri ve jet fanların motorunda kompozit ürünler şeklinde de kullanılmaktadır (Yılmaz, 2017).

Ek olarak silisyum karbürü solüsyonlar, korozyon etkili sıvı daha çok aşındırmayı sağlayan süspansiyon görevi görecektir şekilde kullanımı görülmektedir. Sürekli akış reaktörlerinde ve ısı değiştiricilerde sinterlenmiş silisyum karbür kullanımı ile ilaç ve kimya sanayisinde de yer alır. Aşındırıcı olarak kullanıldığı yerler; taşlama, su jeti ile kesme, kumlanma ve taşlamadır (Yılmaz, 2017).

Ayrıca seramik motorlarında ve turbo şarj kısımlarında da silisyum karbür uygulamalarının deneme aşamasında olduğu bilinmektedir. Türbin motorlarında da uygulamaları artmaktadır. Aynı zamanda bilgisayar ciplerinde de kullanılmaktadır. Yüksek termal iletkenliklerinden dolayı savunma sanayinde de çalışmalar yapılmaktadır (Turan, 2004).

Son zamanlarda silisyum karbürün yüksek aşınma ve sıcaklık dayanımı özelliğinden faydalanılarak, karbon fiberle güçlendirilmiş seramik fren disklerinde uygulandığı görülmektedir. Otomotiv endüstrisinde ise fren diski yanı sıra sürtünme ve yayılımı düşürücü yağların takviyesi ile dizel parçacık tutucu uygulamalarında da görülmektedir (Yılmaz, 2017).

Haberleşme sistemlerinde çeşitli amplifikatörler olarak kullanılarak, mikrodalgalar ve radyo frekansı gibi güç artırıcılar için de elverişli olduğu bilinmektedir (Yılmaz, 2017).

Son yıllarda biyomedikal endüstrisine uygun bir malzeme olarak göze çarpmaktadır. Bu uygulamalarda silisyum karbür, yüzeyinin kimyasal, tribolojik ve elektriksel özelliklerinden dolayı altlık olarak kullanılır. Ayrıca çip sistemi, mikro cihazların üretiminde alt tabaka olarak aktif kullanılan silisyum karbür üzerine bütünleştiriliyor (Yılmaz, 2017).

Silisyum karbür nükleer alanında eskilerden beri hem teorik hem de pratik uygulamalarda öne çıkmaktadır. Son zamanlarda, atıkların atılması sorununun çözülmesi ve nükleer reaktör güvenliği yükseltme amaçlarına hizmet etmesi hedefiyle silisyum karbür tercih haline gelmiştir. Silisyum karbürün olağan dışı radyasyon stabilitesinin yanı sıra fisyon ve füzyon uygulamalarına yönelik silisyum karbür uygulamalı olarak izlenmektedir. Üretim şekillerine bakılarak silisyum karbürün kullanıldığı alanların örnekleri Çizelge 4.1.'de verilmektedir (Yılmaz, 2017).

Çizelge 4.1. Üretim şekillerine göre SiC kullanım alanları örnekleri

İmalat Türü	Kullanılan Alanlar
Seramik bağlayıcı içeren refrakter SiC	Metalurji ve seramik endüstrisinde yüksek sıcaklığa karşı koruma için refrakter parçalar
Yeniden kristalize edilmiş SiC	Yarı iletken endüstrisi için ince alt tabakalar ve seramik endüstrisi için fırın destekleri
İnfiltr edilmiş SiC	Sızdırmazlık parçaları, yatak, brülör parçalar
Basıncısız-sinterlenmiş SiC	Contalar, rulmanlar, balistik kalkanlar, optik bileşenler, ısı eşanjörleri, kimyasal reaktörler, yarı iletken endüstrisi için alt katmanlar, aynalar
Sıcak preslenmiş SiC	Zırh, silikon işlemleri için bileşenler
Buhar biriktirme yöntemi ile üretilmiş SiC	Optik sistemler, silikon imalatı

SiC seramiklerinin endüstride çok geniş kullanım alanlarına sahip olduğu görülmektedir. Farklı formlarda silisyum karbürler çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Önek uygulamaları ise aşağıdaki gibi verilmektedir (Başkurt, 2010).

SiC seramikleri toz halinde kullanılır. Çelik yapımında oksijen emici olarak, diğer metalurjik işlemlerde aşındırıcı olarak ve refrakter macunlarda dolgu maddesi olarak kullanılır.

SiC seramiklerin, refrakterlerin, elektrikli ısıtıcıların ve dirençli elemanların, gaz uygulamalarına yönelik ateşleyicilerin, seramik brülörlerin, radyasyon sensörlerinin, hafif ve yüksek mukavemetli aynaların, yüksek güçlü ve yüksek sıcaklıklı yarı iletken cihazların ve radyasyona dayanıklı yarı iletkenlerin imalatında kullanıldığı görülmektedir.

Kaplama olarak SiC seramikler, füzyon reaktörü uygulamalarında, nükleer atık kaplarında, seramik bazlı ısı değiştirici tüplerinde, oksidasyon dayanımı gerektiren uygulamalarda, mavi ışık yayan LED'lerde ve X-ışını filtrelerinde kullanılmaktadır (Başkurt, 2010).

Silisyum karbürün kullanım alanlarına detaylı değinirsek en çok hangi özelliklerinden dolayı nasıl uygulamalarda kullanıldığını aşağıdaki gibi aktarabiliriz.

Aşınma yüzeylerinde kullanımı; silisyum karbür yüksek sertliği, aşınma direncinin önemli olduğu kesit hatlarında veya elektrik kontaklarında ve kayma olmaması gereken taban ve merdiven uygulamalarında, güverte boyası formülasyonlarında vb. uygulamalarda kullanımına uygunluk sağlar. Silisyum karbür yüksek korozyon direnci sayesinde, korozif ortamlarda çalışan karıştırıcılarda ve kompresörlerin veya pompaların sızdırmazlık contalarında kullanılmaktadır. Silisyum karbürün son zamanlardaki birçok uygulamaları otomotiv su pompalarının sızdırmazlık contaları üzerindedir. Diğer uygulamaları ise üfleme ve atomizasyon nozüllerinde, roket nozüllerinde, magnetik hareketli pompalarda sürgülü veya hareketli rulmanlarında, pompa gömlekleri, valf yuvaları gibi alanlarda kullanılmaktadır (Balaban, 2005).

Zırh malzemelerinde kullanımı; silisyum karbür kompozit zırh koruma sistemlerinin kullanımına cazip kompozit bir malzemedir. Yüksek sertliği, basma mukavemeti ve elastik modülü sayesinde yüksek hız mermi testlerinde mükemmel balistik özellik göstermektedir. Ek olarak düşük spesifik yoğunluğu ağırlığın kritik olduğu uygulamalarda da kullanımını sağlamaktadır.

Yüksek sıcaklık malzemelerinde kullanımı; düşük termal genişleme katsayısı ve yüksek ısı iletkenliği mükemmel termal şok direncini ortaya koymaktadır. Dikkat çekici korozyon direnciyle birleştiğinde, reküperatör tüpler gibi ısı değiştirici komponentlerde, termokopul koruma tüpleri gibi fırın elemanlarında, kayıkçılarda ve yakıcı komponentlerde kullanılabilir.

Refrakter malzemelerde kullanımı; düşük termal genişleme, yüksek termal iletkenlik ve genel kimyasal ve fiziksel kararlılık silisyum karbürü refrakter malzeme olarak kullanımını sağlamaktadır. Silisyum karbürün refraktör olarak kullanımına uygun şekiller, buhar kazanları duvarını, kontrol tuğlalarını, gürültü kesicileri, fırın kızak raylarını gibi uygulamaları içermektedir.

Elektrik malzemelerde kullanımı; fırınlarda kullanılan ısıtıcı elemanlar rekristalize silisyum karbürden yapılmaktadır ve 1600°C civarlarında kullanılabilir. Isıtıcı elemanlar aynı zamanda gaz veya yağ yakıcılarında ateşleyici olarak veya kurutma proseslerinde kızılötesi radyasyon yoluyla kurutma işlemlerinde kullanılabilir.

Silisyum karbürün yarı iletkenlik özelliğinden yararlanılarak termistör (sıcaklık duyarlı cihazlar) ve varistör (voltaj duyarlı cihazlar) olarak da kullanımı mümkündür. Termistörler sıcaklık ölçümü ve kontrolünde ve zaman erteleyici uygulamalarda kullanılmaktadır.

Varistörler, röle ve solenoidlerdeki kontakları ve bobinleri yüksek voltaj dalgalanmalarına karşı koruyarak, yağ yakıcıların ateşleyici devrelerinde endüksiyonu limitler. Yüksek sıcaklık termokupullarında da silisyum karbür kullanılabilir.

Aşındırıcılarda kullanımı; Silisyum karbür tesviye için geniş formlarda kullanılmaktadır. Organik veya inorganik bağlayıcılarla karıştırılarak aşındırıcı tekerlek veya sürtme külçeleri halinde şekillendirilirler ve kağıtla karıştırılıp aşındırıcı diskler, kemerler halinde şekillendirilir.

Silisyum karbür, alümina gibi diğer aşındırıcılardan daha sert olmasına rağmen daha kırılımandır. Tane kırılmaları kolay olduğundan ve keskin kesme hareketini sağlamak için, silisyum karbür aşındırıcılarla genelde öğütülmesi zor, düşük gerilme mukavemeti malzemeler aşındırılır. Bunlara örnek olarak, mermer, granit ve fiber bakır gibi keskin kesme hareketine ihtiyaç duyan malzemeler verilebilmektedir.

Metalurji sektöründe kullanımı; silisyum karbür demir-çelik metalürjide çok geniş alanda kullanılır. Ergimiş metale eklendiğinde, güçlü bir ekzotermik reaksiyon meydana gelir ve silisyum karbür parçalanmaktadır. Deoksidasyonu ve metali temizleme ve akışkanlığı artırıcı etkisi vardır. Bu yüzden arzu edilen grafit dağılımı elde edilir ve işlenebilirliği iyi malzeme üretilmektedir. Pratikte silisyum dökme demire silisyum karbür ilavesi kupol ocaklarda briket, indüksiyon ocaklarında geniş granüler formdadır. Ergimiş çeliğe pota içinde granüller eklendiğinde, istenmeyen inklüzyonların sayısının düşer ve daha iyi fiziksel özellikli ürünler elde edilir. Bazı oksijen fırında çelik içinde granüller eklendiğinde ekzotermik reaksiyona bağlı olarak fırın kapasitesi artar ve daha fazla hurda ergitilebilir. (Balaban, 2005).

BÖLÜM 5

SOĞUTMA SEKTÖRÜNDE SİLİSYUM KARBÜR

5.1. Soğutma Sektöründeki Yeri ve Önemi

Soğutma ve iklimlendirme sistemleri günümüzün vazgeçilmez bir ihtiyacı haline gelmiştir. Son zamanlarda ise bu sistemlerin gerekliliği ön plana çıkmıştır. Endüstriyel kurum ve kuruluşlarda hatta veri merkezlerine yapılan iklimlendirme sistemlerinde soğutma sektörüne olan ilgi artmaktadır. Değişen ve gelişen ileri teknolojiler, enerji verimliliğinin öneminin artması ve çevre duyarlılığının önemli hale gelmesi en önemli etkenlerden olmuştur.

Endüstriyel soğutma sistemlerinde birçok farklı teknikler kullanılmaktadır. Bunlardan bazılarını merkezi ısıtma soğutma sistemleri, harici soğutma sistemleri, bölgesel soğutma sistemleri şeklinde sıralamamız mümkündür. Soğutma sistemlerinde kullanılan elemanlardan sızdırmazlık elemanları (mekanik contalar, salmastra gibi), ısı değiştiriciler (eşanjör, kondenser, evaporatör gibi), kompresör veya pompa, fan ve motor olarak sektörde silisyum karbür içeren / içerebilecek makine ekipmanları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Silisyum karbür endüstride aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı özelliği nedeni ile soğutma sektöründe birçok ekipmanda kullanılmaktadır (Kocaman, 2016).

Silisyum karbürün yüksek ısı dayanımından dolayı ısı değişim tüplerinde kullanılır. Basıncsız sinterleme yöntemi ile üretilen silisyum karbür eşanjörlerde kullanılır. SiC yüksek sıcaklıklarda mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Karışık şekillerin hassas cihazlarla işleme yeteneği kısıtlıdır. Kırılganlığı fazla olduğundan ötürü işleme maliyetleri düşük değildir. SiC'ün bu dezavantajlarının üstesinden gelmek için değişik metotlar vardır.

Elastikliği ayarlayabilmek üzere çeşitli gözenekleri bulunan sistemlerin takviyesiyle gözeneğe sahip yapılar oluşturulabilir veya düşük elastik modüllü malzemeler ilave edilebilir.

Araştırmaların bazılarında ince SiC tozlarının durağan ortamda birleştirici olması için polistren ile sinterlenmesi sonucu işlenebilir nitelikte SiC meydana gelmiştir. Oluşmuş olan ürün 20 °C ile 1500 °C gibi sıcaklık değerlerine kadar mekanik dayanımı yüksek olan değerler (> 200 MPa) gösterir (Yılmaz, 2017).

5.2. Soğutma Sektöründe Makine Ekipmanları

Çoğu endüstriyel sektörde bir aletin, ekipmanın veya makinenin kullanım süresi, o sistemi oluşturan yapıların ömrüne göre belirlenmektedir. Bakım onarım maliyetleri ile uygulanan yöntemin ekonomik yapılabilirliği bu ömre bağlıdır.

Makine elemanlarında hasarın, yıpranmanın, kopmanın meydana gelmesine sebep olan başlıca nedenler; aşınma ve korozyona bağlı gerçekleşen deformasyon, mekanik yorulma, termoşok ve kavitasyon gibi konulardır. Bu sebepten, seramik içerikli malzemeler birçok soruna çözüm olabilir. İlgili malzemenin özenli seçimi burada önem kazanmaktadır. Çünkü malzeme özelliklerine dikkat edilmez ise sorun daha büyük bir hal alabilir.

Silisyum karbür tıpkı günlük hayatta kullanılan porselen gibi bir seramiktir. Endüstriyel seramikler karbürler, nitrürler ya da saylonlar gibi modern veya ileri seramikler olarak adlandırılmaktadırlar. Mukavemet değerlerinin dalgalı olması ve birçok durumda istenmeyen kırılma durumu, diğer taraftan seramik malzemelerin özellikleri hesaplama yöntemi ve dizayn kriterleri, metal malzemelerde olduğu gibi, bilinmediğinden bu malzemelerin kullanılmasını azaltmaktadır.

1970'li yıllarda rulmanlı yataklarda silisyum nitrür ve zirkonyum oksit kullanımının uygun olduğu ortaya çıkmıştır. O zamanlardan bu yana korozyon ve aşınma etkisi altındaki pompalarda sinterlenmiş silisyum karbür (SSiC) malzemenin meydana gelen kaymalı halkalar (rulmanlar) ve yataklar tercih edilmektedir (Rende ve Hanyaloğlu, 2012).

Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan mekanik salmastralar akışkanın cinsine ve pompa şartlarına göre seçilmektedir. Genellikle santrifüj pompalarda kullanılmaktadır. Enerji verimliliğini arttıracak şekilde kullanılan bir makine ekipmanıdır (Uludağ Rulman, 2019).

Soğutma sistemlerinde yaygın olarak çeşitli korozyon koşullarında ve ısı transfer katsayısını yükseltmek ve ısı transfer verimini paslanmaz çeliğe göre yaklaşık 4,5 kat arttırmak için silisyum karbür ısı eşanjörü kullanılmaktadır (Duratec, 2023).

Gelişen imalat teknolojileri ile seramik malzemeleri kullanarak yeni dizaynlar oluşturarak edinilen tecrübe ile bu malzemelerin piyasadaki kullanımları aktifleşecektir (Rende ve Hanyaloğlu, 2012).

5.2.1. SiC İçeren Kaymalı Yataklar ve Rulmanlar

Oksit seramiklerden olan silisyum karbürün, yüksek sertliği, ısıya dayanımı, iyi korozyon dayanımı, termal ve yalıtkan olması, yüksek erime sıcaklığı ve yüksek aşınma direncinden dolayı sanayide birleşik makine elemanlarında kullanılmaktadır. Farklı yönde dönen makinelerin birbirine bağlı şekilde sürtünmeyi azaltarak sorunsuz şekilde çalışmasına olanak sağlaması rulmanın en önemli işlevinden biridir (Rende ve Hanyaloğlu, 2012).

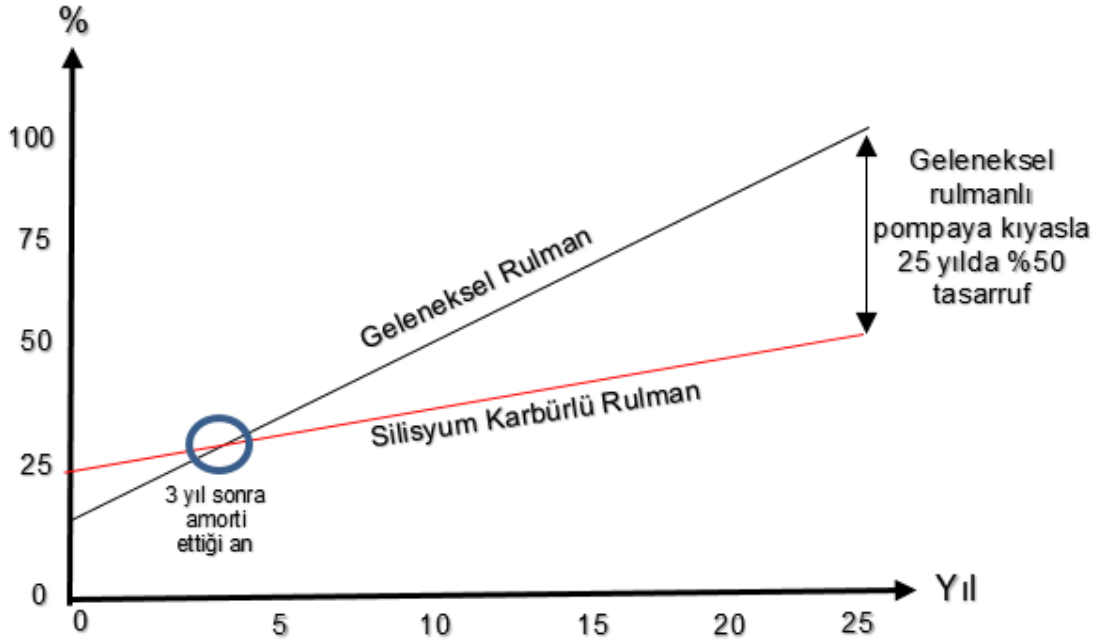
Borulu pompalarda kullanılan radyal yataklar, pompalanan sıvı ile devamlı olarak direkt temas halindedir ve en yüksek gerilim ile zorlamalara dayanabilecek kapasitede olmalıdır. Bu tür görevlerde sık olarak kullanılan kauçuk yataklar susuz çalışmaya karşı oldukça hassastır. Bundan dolayı yataklara daima yağlayıcı besleme sağlamak için pompanın ayrı bir temiz su veya filtrelenmiş servis suyu kaynağı ile donatılması gerekir. Bunun için kullanılan yardımcı elemanlar genellikle arızalanmaya daha yatkın, yüksek bakım gerektiren maliyetli bir malzemedir. 1980'lerin başından bu yana özel olarak geliştirilmiş seramik esaslı malzemeler pompa yataklarında kullanılmaktadır (KSB, 2023).

Bu özel kaymalı yatakların avantajı pompalanan sıvı ile yağlanmalarıdır. Bileşenin parçaları silisyum karbürden yapılmıştır. Özellikle birçok enerji santralinin soğutma suyu devrelerinde bulunan çok zorlu şartlara maruz kaldıklarında değerlerini kanıtlıyorlar.

Bu özel seramik rulmanların dikkat çekici esneklik özellikleri sayesinde, darbeleri ve titreşimleri sıkıntısız bir şekilde absorbe etme özellikleri vardır. Elyafı güçlendirilmiş seramik yatak burçlarının yapıldığı kumaş benzeri malzeme, silisyum karbür elyaflardan ve kristalin silikondan oluşur, bu da bunların kırılma kırılmaya karşı çok eğilimli olmamasını sağlar.

Seramik rulmanlar, her türlü boru gövdeli pompaya sonradan montaja uyum sağlarlar. Bundan dolayı geleneksel rulmanlara göre bu rulmanlarla mümkün olan büyük maliyet tasarrufundan faydalanılmaktadır.

Yaklaşık üç yılda yatırılan parayı geri kazanan ve yirmi beş yıl sonra sulu veya gresle yağlamalı türdeki geleneksel rulmanlara kıyasla %50'lik kayda değer bir maliyet farkı sağlayan bu rulmanlar, bu rulmanları seçmek için yeterlidir. 100.000 saatten fazla çalışma ömrüyle birçok maliyete sebep olabilecek aksama sürelerini ortadan kaldırabilir. Özetle kaliteli, uzun hizmet ömürlü ve az aksama süresi avantajları vardır. Bu nedenle bu rulmanların boru gövdeli pompalara montajı kesinlikle faydalıdır. Şekil 5.1.'de üç geleneksel rulmana sahip pompa maliyetlerinin üç silisyum karbür rulmanlı pompayla karşılaştırılması gösterilmiştir (KSB, 2023).



Şekil 5.1. Üç geleneksel rulmana sahip pompa maliyetlerinin üç silisyum karbür rulmanlı pompayla karşılaştırılması (KSB, 2023)

Yıllardır korozyona ve aşınma etkisinde kalan pompalarda sinterlenmiş silisyum karbür (SSiC) malzemeden oluşan kaymalı halkalar ve yataklar kullanılmaktadır (Rende ve Hanyaloğlu, 2012).

Olağandışı aşınmaya ve korozyona karşı dayanımları ve iyi tribolojik özelliklerinin yanında bu malzemelerin üretim prosesleri karışık olduğundan, ucuza imal edilememeleri ve tasarımdaki tecrübe eksikliği kullanımlarını sınırlamaktaydı.

Fakat son yıllarda üretim teknolojilerinin gelişmesi ve seramik malzemeler ile dizayn hususunda yeterli tecrübenin kazanılmasından dolayı seramik malzemelerin kullanılması yaygınlaşmıştır (Rende ve Hanyaloğlu, 2012).

Minimum sürtünme ve maksimum aşınma direnci gösteren seramik malzemeler, kaymalı yataklarda uygulanmaktadır. Pompalarda uygulanan kaymalı halkalar ve kaymalı yataklar, sinterlenmiş silisyum karbür malzemeden oluşabilmektedir.

Korozif ortamda ve yağlamanın yeterli olmadığı zamanlarda SiC malzemeden oluşan kaymalı yataklar, oldukça emniyetli ve bakım gerektirmeyen yataklar olarak yorumlanır ve Şekil 5.2.'de gösterilmiştir (Rende ve Hanyaloğlu, 2012).



Şekil 5.2. Seramik kaymalı yataklar SiC

SiC rulmanların özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir; (KSB, 2023)

- Aşınmaya dayanıklı,
- Kuru çalışma özelliği,
- Termal şoktan etkilenmeme,
- Kullanıldığı agresif ortamlara karşı dirençli,
- Kum gibi aşındırıcı parçacıklara karşı duyarsız,
- Harici yağlayıcı tedariki gerekliliği yok,
- Çevre dostu ve yağlayıcılığundan dolayı su kirliliği riski olmaması,
- Pompanın sabit verimliliğini sağlaması

Seramik rulmanlar diğer çelik rulmanlara göre daha yüksek hızlarda kullanılması, kullanım ömrünün uzunluğu, aşınma ve sürtünme dayanımının düşüklüğünden dolayı daha geniş yelpazede kullanım imkanı sunmaktadır. Endüstriyel seramik malzemelerin özelliklerinden dolayı seramik yatağın bireysel maliyeti çelik yatağa göre daha yüksek olsa da sistematik olarak ele alındığında bu bileşenlerle daha ucuz çözümler elde edilebilir. Seramik malzemelerden üretilen kaymalı ve rulmanlı yatakların kullanımı arttıkça üretim maliyetleri de azalacaktır (Rende ve Hanyaloğlu, 2012).

5.2.2. SiC Esaslı Isı Değiştiriciler

Silisyum karbürler, soğutma sırasında katılaştıran ve ısı etkisiyle olgunlaşan erimiş kütleden oluşmaktadır. İnorganik metalik olmayan maddelerden üretilen kompozit bir seramik malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. SiC 'ün günümüzde kullanımı, yüksek sıcaklık uygulamalarında çelik ve alüminyum geride bırakan mükemmel bir sıcaklık dayanımına sahip olduğu için ısı değiştirici olarak üretilmektedir (Pachaiyappan, Gopinath ve Gopalakannan, 2015).

Isı değiştiriciler, birbirine karışmayan, sıcaklıkları farklı iki akışkan arasında ısı değişimini gerçekleştiren ekipmanlardır. Isı değiştiriciler, evlerdeki ısıtma ve havalandırma sistemlerinde, büyük fabrikalardaki kimyasal işlemlerde ve güç üretimi gibi farklı alanlarda uygulamaları yaygın olarak görülmektedir (BTÜ, 2023).

Silisyum karbürlü ısı değiştirici (eşanjörü), iklimlendirme için evaporatif soğutma sistemindeki evaporatörler ve iklimlendirme için soğutuculardaki jeneratörlerde kullanılarak bu sistemlerin ısı aktarım hızını, mevcut ısının değiştirilmesiyle iyileştirebilirler (Pachaiyappan vd., 2015).

Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) seramik malzemeyi “esasen inorganik, metalik olmayan maddelerden üretilen ve soğuduğunda katılaşan erimiş bir kütleden oluşan veya aynı anda oluşan bir eşya gövdesi” olarak tanımlamaktadır.

Isı eşanjörü olarak silisyum karbürün sečilmesinin arkasındaki etken, mükemmel mekanik mukavemet etkisi, iyi kimyasal direnç, yüksek ısı iletkenliği, düşük ısı genleşme katsayısı ve yüksek termal řok direnci olarak göze çarpan özellikleridir.

İyi bir termal şok direncine sahip olan silisyum karbür, yüksek sıcaklıklarda bile bükülme mukavemetini korumaktadır. Kimyasal olarak inerttir ve çelikten dört kat daha fazla termal iletkenliğe sahiptir. Dezavantajı olarak görülen yanı ise seramik metalik mekanik sızdırmazlık, üretim maliyeti ve gerilmedeki kırılgnalığıdır.

Yüksek sıcaklıkta ısı transferi uygulaması için silisyum karbür esaslı ısı eşanjörlerine ihtiyaç duyulacaktır. Seramik bloğun içindeki tüm bağlantı noktaları sinterlenmişe, basınca dayanıklı contalara gerek yoktur. Uygun contalar şu ana kadar mevcut olmadığından bu durum bu uygulamanın açık bir avantajı olduğu görülmektedir.

Plakalı eşanjörde plakaların değiştirilmesi mümkün iken, silisyum karbür plakalı eşanjörlerdeki plakalar sinterlendiği için değiştirilmesi mümkün değildir (Pachaiyappan vd., 2015).

5.2.3. SiC Esaslı Sızdırmazlık Elemanları

Bir sızdırmazlık elemanı olan mekanik salmastralar akışkanın cinsine ve makine şartlarına göre sečilmektedir. Genellikle temiz sıvılarda karbon-seramik ve karbon-metal, kirli sıvılarda ise silisyum karbür-silisyum-karbür yüzey kombinasyonu kullanılmaktadır. şekil 5.3.'te silisyum karbür mekanik salmastra gösterilmektedir (Uludaę Rulman, 2019).



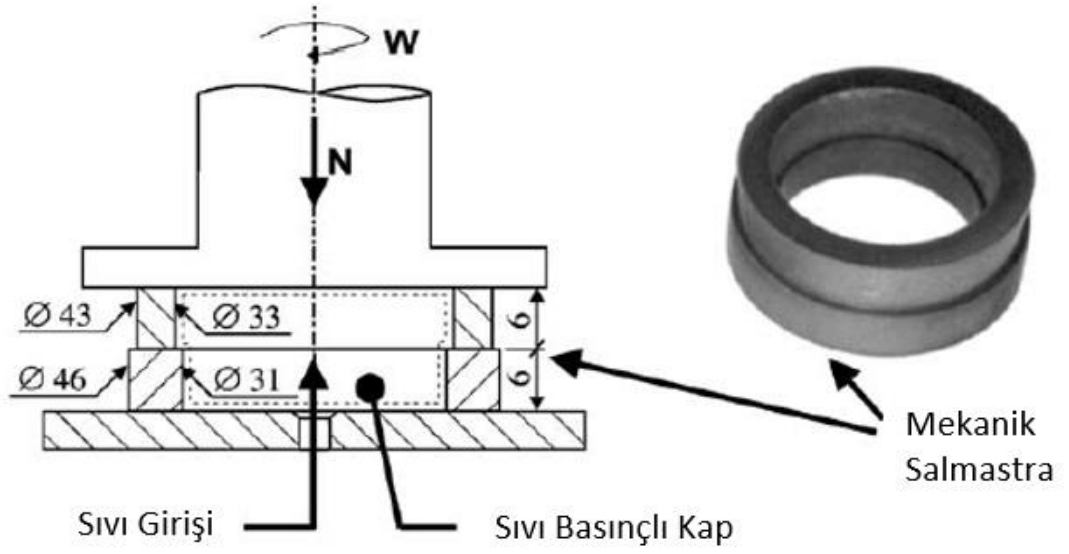
Şekil 5.3. Silisyum karbür mekanik salmastra

Mekanik salmastralar, dönen şaftlara veya alternatif hareket parçalarına (örn. pompalar, karıştırıcılar, otomotiv motorları, kompresörler, türbinler vb.) sahip ekipmanlardaki ürün sızıntısından dolayı çevreyi korumada öneme sahiptir. Çıkış kontrollerinde sızıntıyı engellediği görülmektedir (Carrapichano, J.M., Gomes, J.R., Oliveira, F.J., ve Silva, R.F., 2003).

Seramikler, yüksek sıcaklık sertliği, yüksek temas yorulma direnci, korozyon direnci ve düşük atalet kütlesi kombinasyonundan dolayı dolaşımdaki sıvıların sızdırmazlığı için uygun bir aday olduğu görülmektedir.

Bu sınıftaki malzemelerden olan silisyum karbür (SiC) mevcutta mekanik halkalar olarak uygulanmaktadır. Ancak kırılma tokluğunun düşük olması dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ayrıca, SiC'ün çok yüksek sinterleme sıcaklıkları gerektiğinden tamamen yoğunlaştırmak için ileri bir teknolojiye ihtiyaç duyulur ve bu da bu seramiği (silisyum karbürü) pahalı ve güç bir ürün haline getirmektedir (Carrapichano vd., 2003).



Şekil 5.4. Sıvı basıncı altında mekanik salmastranın tribolojik testinin geometrisi

Özellikle korozif sıvılar içinde makine ekipmanlardaki sızıntıyı engelleyen seramik olarak soğutma sektöründe kullanımı uygundur. Şekil 5.4.'te sıvı basıncı altında mekanik salmastranın tribolojik testinin geometrisi gösterilmiştir (Carrapichano vd., 2003).

BÖLÜM 6

MATERYAL METOD

6.1. Deneysel Çalışma Hakkında Teknik Bilgi

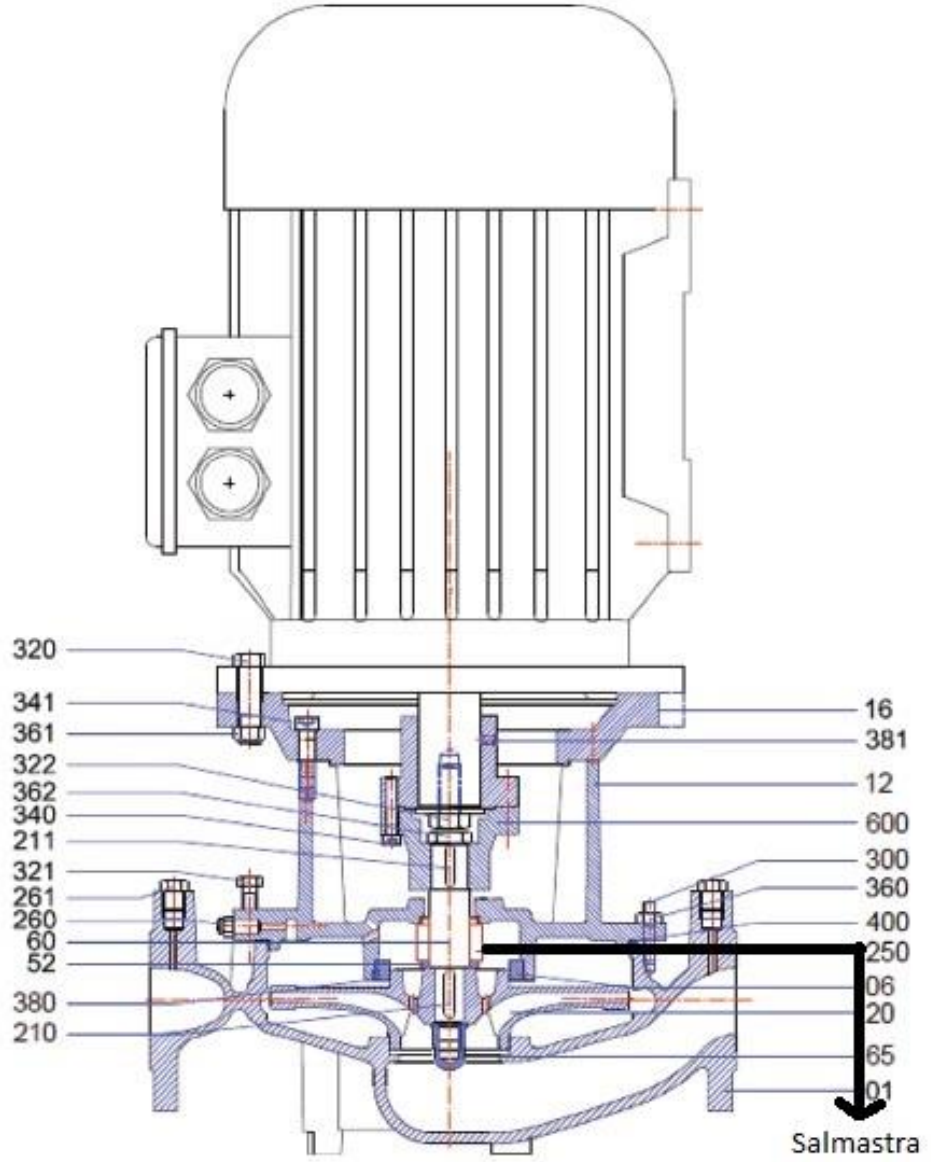
Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan salmastraların kullanımı hakkında genel bilgilendirme yapılmaktadır.

Mekanik soğutma sistemlerinde mekanik salmastralar sirkülasyon pompalarında kullanılır. Kullanımı oldukça yaygın olduğundan sızdırmazlık elamanlarının önemi yüksektir. Sistemin verimli bir şekilde çalışabilmesi için uygun malzemelerin kombinasyonu gerekmektedir.

Bu deneysel çalışmada kullanılan sabit ve döner parçaları silisyum karbürden oluşan salmastra, incelenen 7,5 kW gücündeki pompa (Şekil 6.1.) üzerindeki salmastra ile aynı malzeme içeriğine sahiptir.

İncelenen bu binada soğutma işlemi iki adet chiller ünitesine bağlı olarak iki ayrı hat üzerinden sağlanmaktadır. Bir hat fan-coil üniteleri ile soğutma yaparken diğer hatta ise hassas üniteli klimalar ile bina soğutması sağlanmaktadır.

Şekil 6.1.'de sabit ve döner tarafı silisyum karbür malzeme yapısına sahip olan salmastranın bulunduğu pompanın kesit görüntüsü verilmektedir (Masdaf, 2020). Bu salmastra pompa modelinde (INM Serisi) kullanılmaktadır.



Şekil 6.1. SiC+SiC salmastralı pompanın kesit görüntüsü (Masdaf, 2020)

Bu sirkülasyon pompaları (Şekil 6.1.), tek kademeli kendinden emişli olmayan inline (hat tipi) santrifüj pompalar standart motorlarla mekanik salmastralı olarak üretilmiştir. Ana boyutları ve anma debileri DIN 24255 ve EN 733’de önerilen değerlerle uyum içindedir. Flanşlar DIN 2535 standartlarına uygun PN 16 basınç sınıfındadır. Emme ve basma flanşları birbirinin kopyası ve aynı eksen üzerinde yer almaktadır. Motor ise bir adaptör ve flanş kullanılarak motor milinin pompa miline geçirilmesiyle pompaya montajı yapılmıştır. Bu pompaya ait teknik özellikler ise Çizelge 6.1.’de verilmektedir (Masdaf, 2023).

Çizelge 6.1. Silisyum karbürü salmastra içeren pompanın teknik özellikleri

Teknik Özellikleri	Değerleri
Emme Flanşı	DN 40 - DN200
Basma Flanşı	DN 40 - DN200
İşletme Basıncı	10 Bar
Gövde Test Basıncı	13 Bar
Çalışma Sıcaklığı	-25 – 120 °C
Debi Aralığı	2 – 650 m ³ /h
Man.Yük.Aralığı	2 -100 m
Hız Aralığı	900 – 3600 d/dk

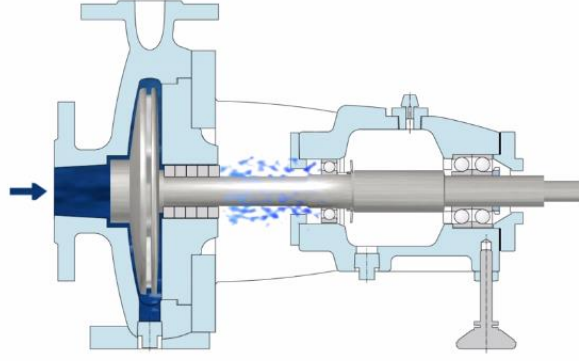
İnce, temiz, aşındırıcı olmayan, iri katı parçacıklar veya elyaf içermeyen temiz ve hafif kirli, sıcaklığı 120 °C' ye kadar olan sıvıların basınçlandırılmasını sağlayan alanlar, hat tipi santrifüj pompaları, ısıtma ve soğutma sistemlerinde, sıcak veya soğuk su sirkülasyonunda, su şebekeleri ve basınçlandırma tesislerinde, sulama, yağmurlama ve su boşaltmada, kondens pompalarında, yüzme havuzlarında su sirkülasyonunda kullanılmaktadır (Masdaf, 2023).

Pompada kullanılan mekanik salmastralar, biri hareketli biri sabit iki dinamik yapı arasında akışkan sızıntılarının giderilmesi, basınç kayıplarının önlenmesi için kullanılan ve parçacıkların ortama girmelerini engelleyen sızdırmazlık elemanıdır. Genellikle -20 ile +120 °C arasında çalışmaya elverişlidir (Rota, 2022).

Pompada kullanılan komponent salmastra çeşidi elastomer körüklü salmastra olup, Şekil 6.2.'de verilmiştir (Mekanikmarkt, 2023). Deneysel çalışmada da aynı salmastranın incelemesi yapılmıştır.



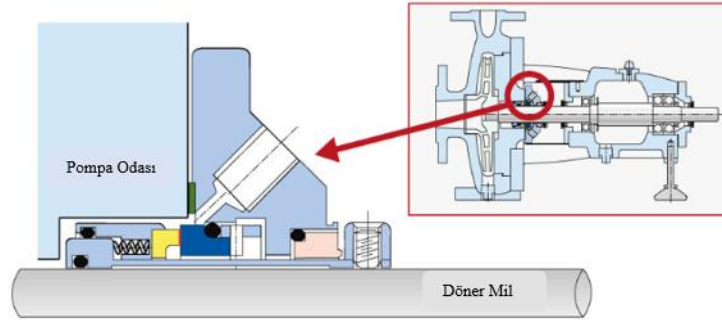
Şekil 6.2. Mekanik salmastra görseli



Şekil 6.3. Pompa döner milin hareketi

Santrifüj pompanın sızdırmazlığı sağlanırken en zor kısım, büyük basınç altındaki suyun sızmasını engellerken ayrıca döner milin pompanın ‘nemli’ alanına ulaşmasını sağlamaktır. Bu zorluğu yenebilmek için mil ve pompa gövdesi arasında, pompalanan sistem basıncını tutabilecek ve mil dönüşünden kaynaklanan sürtünmeye dayanabilecek bir salmastra olması gerekmektedir. Şekil 6.3.’te pompadaki döner mil hareketi gösterilmektedir.

Sızıntıyı azaltmak için kullanılan mekanik salmastralar döner mile etki ederek pompada suyun akışını sağlamaktadır. Şekil 6.4.’te kırmızı ok ile gösterilen kısım elastomer körüklü salmastranın detay kesiti olarak verilmiştir (AES, 2023).



Şekil 6.4. Döner mil ile salmastra ilişkisi (AES, 2023)

Bu çalışmada soğutma sistemindeki sirkülasyon pompalarında kullanılan silisyum karbür malzemeden yapılmış salmastranın korozyon (aşınma) dayanımı ve mikroskobik yapı kriterleri üzerinden inceleme yapılarak değerlendirilmiştir.

Bu malzemenin soğutma sisteminin çalışmasına sızdırmazlık açısından etkin rol aldığı görülmüştür. Bu nedenle malzeme özelliğinden dolayı sektörde yerini arttırmaya yönelik inceleme yapılmıştır.

6.2. Deneysel Çalışma

Sektörde sirkülasyon pompalarında en çok kullanılan modellerin malzeme yapıları silisyum karbür, tungsten karbür, 316 kalite paslanmaz çelik, karbon ve seramik gibi aşınmaya dayanıklı malzemelerden üretilmektedir.

Bu deneysel çalışma için silisyum karbürü malzemedan yapılan salmastra ile paslanmaz ve karbon malzeme içeren mekanik salmastralara laboratuvar ortamında incelemeler yapılmıştır.

Laboratuvar ortamında iki farklı mekanik salmastranın yüzey yapıları, ağırlık ölçümleri ile korozyon (aşınma) dayanımı testleri yapılarak malzemeler incelenmiştir.

Bu incelemeler için yapılan deneysel çalışmalar; korozyona dayanımı ölçmede en yaygın yöntem olan tuz püskürtme korozyon testi ile başlanmıştır. Ardından korozyon dayanımını daha zorlu şartlara tabi tutmak için %4 derişiklikte HCI sıvısı bulunan cam beher içine bırakılarak gözlemlenmiştir. Sonrasında korozyona uğramış halleri üzerinden malzemelere hassas kesme, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri yapılmıştır. Ayrıca her 24 saatte bir cam beherden çıkarılan numunelerin mikroskop görüntüleri alınmıştır. Tüm alınan görüntüler ve ölçüm değerleri incelenerek analiz edilmiştir.

6.2.1 Numunelerin Kütlesel Ölçümü

Laboratuvar ortamında silisyum karbür ve 316 kalite paslanmaz salmastra numunelerinin ağırlıkları hassas terazide ölçülmüştür. Şekil 6.5.'te sabit ve hareketli tarafı silisyum karbür malzemedan üretilmiş G60 modelinde elastomeri viton olan salmastranın görüntüsü verilmiştir. Bu görüntü deneysel çalışmada kullanılan salmastranın görüntüsüdür.



Şekil 6.5. SiC/SiC/VİT/G60 numune görüntüsü

Şekil 6.6.'da sabit tarafı karbon malzemededen, hareketli tarafı silisyum karbür malzemededen üretilmiş G13 modelinde elastomeri viton olan salmastranın görüntüsü verilmiştir. Bu görüntü deneysel çalışmada kullanılan salmastranın görüntüsüdür.



Şekil 6.6. 316/KAR/VİT/G13 numune görüntüsü

Çizelge 6.2.'de deneysel çalışmada kullanılan salmastraların özellikleri verilmiştir. Çizelge 6.3.'te numunelerin kumpas ölçüm değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.2. Deneysel çalışmada kullanılan salmastraların özellikleri (Başkurt, 2010)









Parametreler	Mekanik Salmastra	
Ürün Kodu / Malzeme Yüzeyleri:	7300-016/G13.V.R - 316/KAR/VİT/G13	7061-016/G60.V - SiC/SiC/VİT/G60
Basınç / Hız:	12 Bar - 10 m/s	16 Bar - 20 m/s
Sıcaklık:	- 20 / + 250 C	- 50 / + 250 C
Mil Çapı:	16 mm	16 mm
Döner Eleman Yüzey Seçenekleri:	316 Paslanmaz	Silisyum Karbür
Sabit Eleman Yüzey Seçenekleri:	Karbon	Silisyum Karbür
Elastomerler:	Fkm (Viton)	Fkm (Viton)
Çalışma Alanları:	Sirkülasyon pompaları, boyahaneler, kimya, atık su pompaları	Sirkülasyon pompaları, boyahaneler, kimya, atık su pompaları

Numuneler Absolute Digimatic marka 150 mm kumpas ile ölçülmüştür. Şekil 6.7.'de ölçüm yapılan kumpasın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.7. Kumpas görüntüsü

Çizelge 6.3. Numunelerin kumpas ölçüm değerleri

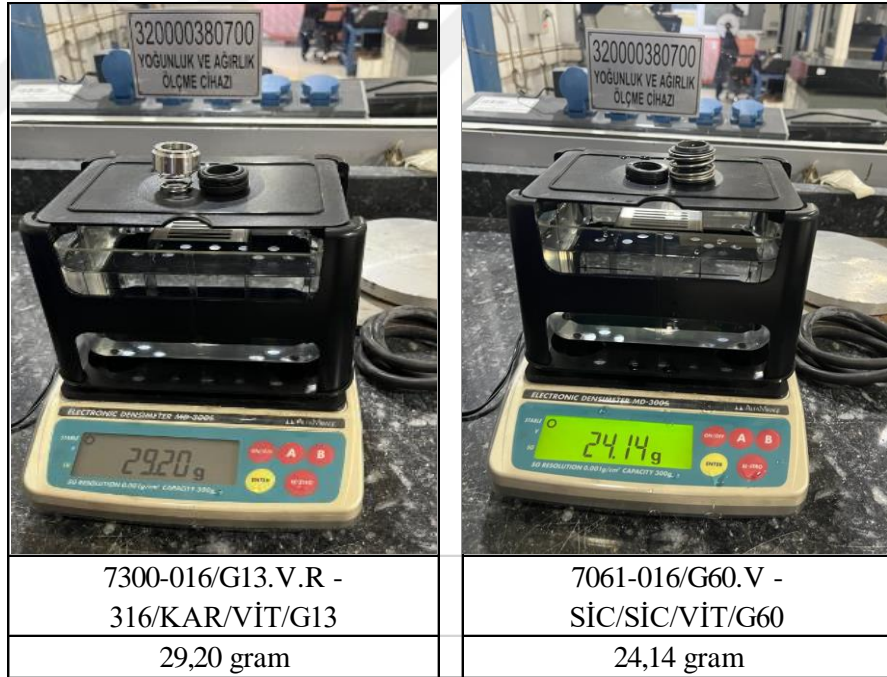
Ürün Kodu / Malzeme Yüzeyleri:	7300-016/G13.V.R - 316/KAR/VİT/G13	Ölçüm Değeri (mm)	7061-016/G60.V - SİC/SİC/VİT/G60	Ölçüm Değeri (mm)
Sabit Taraf (yatay)		28,06		27,14
Sabit Taraf (dikey)		11,55		6,51
Hareketli Taraf (yatay)		26,02		28,63
Hareketli Taraf (dikey)		12,44		21,24

Numuneler 20°C sıcaklıktaki laboratuvar ortamına alınmıştır. Numunelerin 0.001 g/cm³ hassasiyetindeki Şekil 6.8.'de gösterilen Alfa Mirage marka MD-300S modelinde 300 gr kapasiteli elektronik dansimetre cihazı ile ağırlıkları ölçülmüştür.



Şekil 6.8. Elektronik dansimetre cihazı

Elektronik dansimetre cihazı ile numunelerin ağırlık değerleri sırasıyla; 316/KAR/VİT/G13 numunesinin 29 gram, SİC/SİC/VİT/G60 numunesinin 24,14 gram olarak ölçüm sonuçları Şekil 6.9.'da verilmiştir.



Şekil 6.9. Numunelerin ilk ağırlık ölçüm değerleri

6.2.2 Tuz Püskürtme (Tuz Korozyon) Testi

Parçaların doğal yöntemler ile korozyon dayanımını ölçmek yıllar alabilir. Bu yüzden mühendisler tarafından özel olarak tasarlanan hızlandırılmış korozyon testleri uygulanmaktadır. Bu test tuz püskürtme korozyon testi olarak adlandırılmıştır. Tuz püskürtme testi 1898 yılında Charles Benjamin Dudley liderliğinde dizayn edilmiş olan korozyon test cihazı olup halen tercih edilmektedir.

DeneySEL çalışmanın ilki olan tuz püskürtme testi Hacı Ayvaz Arge Test Doğrulama Laboratuvarı'nda, EN 9227 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

Tuz püskürtme test makinesi, parça yüzeyine etkileyebilecek parametre değerlerini sabit tutarak yüzeye tuz püskürtme olarak kapalı bir kabin içerisinde gerçekleşmektedir. Çizelge 6.4.'te tuz püskürtme test makinesi parametre değerleri tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 6.4. Tuz püskürtme test makinesi parametre değerleri

Parametre	Değerler
Saf Su Kabin Sıcaklığı	35 ± 2 °C
NaCl Solüsyon Oranı	5%
Doyma Kabin Sıcaklığı	47 °C
Çözelti pH Değeri	6,5 - 7,2
Hava Basıncı	4,5 bar
Püskürtme Basıncı	0,7 - 1,7 bar



Şekil 6.10. Tuz püskürtme test makinesi

Ağırlık kaybı yöntemiyle tuz püskürtme test makinesine (Şekil 6.10.) konulan numunelerin korozyon oranlarını karşılaştırmak amacıyla salmastra numunelere (Şekil 6.11.) 24 saat boyunca tuz püskürtme testi (EN 9227) uygulandı. Elektrokimyasal korozyon testleri 5 litre suya 250 gr tuz konularak elde edilen %5 NaCl çözeltisinde yapıldı. Bu çalışmanın sonuçları, yapısının bölgesel korozyon üzerindeki rolünü ve farklı kimyasal bileşimlere sahip alaşımlar için farklı bölgesel korozyon davranışı elde etme ihtimalini açıkça göstermiştir (Seçgin, 2012).

Çizelge 6.5. Tuz püskürtme test makinesinin özellikleri

Makine Adı	Tuz Korozyon Test Kabini
Kurulu Elektrik Gücü	6,6 Amper
Tehlikeli Enerjinin Büyüklüğü	9,9 Amper
Tehlikeli Enerji İzolasyon Aparatı	Çok fonksiyonlu endüstriyel elektrik emniyet kilidi
İzolasyon Yeri	Elektrik Panosu
Zamanlama Göstergesi	Var
Püskürtme Basınç Göstergesi	Var/0-5 bar
Saf Su Kabin Sıcaklığı Göstergesi	Var
Doyma Kabin Sıcaklığı Göstergesi	Var
Kapak Konum Kolu	Var

Test süresi 2 ila 1008 saat arasında olmak üzere talep doğrultusunda seçilmektedir. Test bittikten sonra numune durulanmış ve 24 saat ortam sıcaklığında bekletilmiştir (Doğdu, 2021).

Tuz testi aslında bir sis testidir, tuzlu suya maruz kalma testi değildir. Soğutma sektöründe şartnamelerde yer alan 48 saatlik test döngüsünün (24 saat sis ve 24 saat kurutma) malzeme üzerinde daha yıkıcı etkileri olduğu kanıtlanmıştır (EUROLAB, 2017).

Eurolab kaynağından alınan öneri üzerine tuz püskürtme testi 48 saatlik döngüde tamamlanmıştır.

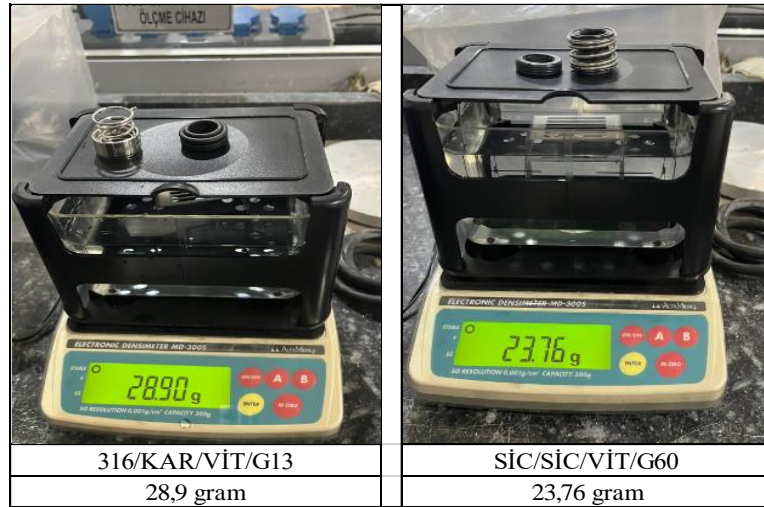


Şekil 6.11. Numunelerin kabin içerisinde yerleştirilmesi



Şekil 6.12. Tuz korozyon testi sonrası numune görüntüleri

Şekil 6.12.'de görülen çıkarılan numuneler 24 saat ortam sıcaklığında kurumaya bırakıldı. 24 saat püskürtme ve 24 saat kurutulmasının ardından yeniden ağırlık ölçümüne alındı. Ölçüm değerleri Çizelge 6.6.'da kaydedilmiş ve Şekil 6.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Tuz korozyon testi sonrası ölçüm görüntüleri

Çizelge 6.6. Tuz korozyon testi sonrası ölçümler

Salmastra	İlk Ağırlık (g)	Tuz Korozyon Testi Sonrası Ağırlık (g)	Ağırlık Farkı (%)
SİC/SİC/VİT/G60	24,14	23,76	1,58
316/KAR/VİT/G13	29,2	28,9	1,03

Tuz korozyon testinde ağırlık kayıplarının oluşması malzemelerin matris alaşımının çözünmesi sonucunda gerçekleşmiştir. Korozyon dayanım testlerinin en yaygını olan bu yöntemde aralarındaki ağırlık farkının yüzdesel olarak çok düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle daha zor koşullara maruz bırakarak ağırlık kayıplarının artışı gözlemlenmek amacıyla HCl asit testine geçilmektedir.

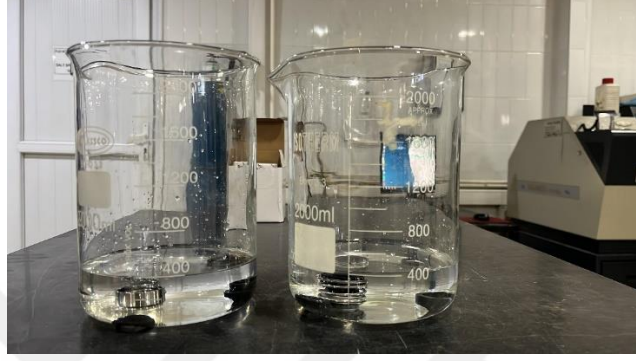
6.2.3. Hidroklorik Asit Testi

ISO'nun test standartları, değişik korozif ortamlarda uzun süreler boyunca malzeme kilo kaybı ve yüzeylerinin bozulması testleri ile geliştirilmiş ve ilerletilmiştir. ISO12944'e dayanarak bu malzeme kaybını Çizelge 6.7.'de gösterildiği gibi C1 ile C5-M veya C5-I olarak kategorize etmiştir.

Çizelge 6.7. Korozif ortam sınıfları (Fabmann, 2019)

Aşındırıcılık Sınıfı	Tanımı	Kullanım Yeri
C1	Çok Düşük	Ofis ya da konut benzeri temiz ortamlar
C2	Düşük	Düşük kirlilikteki ortamlar, kırsal bölgeler
C3	Orta	Kentsel ve endüstriyel ortamlar, ılımlı kükürt dioksit kirliliği ya da az tuzluluktaki kıyılar
C4	Yüksek	Endüstriyel ortamlar ve az üstü tuzluluktaki kıyılar
C5-I	Çok Yüksek (endüstriyel)	Yüksek neme sahip, çok zor şartlardaki endüstriyel tesisler
C5-M	Çok Yüksek (denizcilik)	Tuzluluğu yüksek kıyılar ve açık denizler

Numuneler tuz korozyon testinin ardından aynı standarda bağılı kalarak aşındırıcılık sınıfını şiddetlendirerek hidroklorik asit testine tabi tutulmuştur. Aşınma deneyi, ortalama 18-20 °C ortam koşullarında ve %4 derişik HCl çözelti içinde yapılmıştır. İki adet cam behere iki farklı salmastra ayrı ayrı yüzeylerini geçecek şekilde içine konulmuştur. Numunelerin tüm yüzeylerine asidin nüfuz etmesi esas alınarak yaklaşık 400 ml HCl içinde Şekil 6.14.'te gösterildiği gibi 48 saat bekletilmiştir.

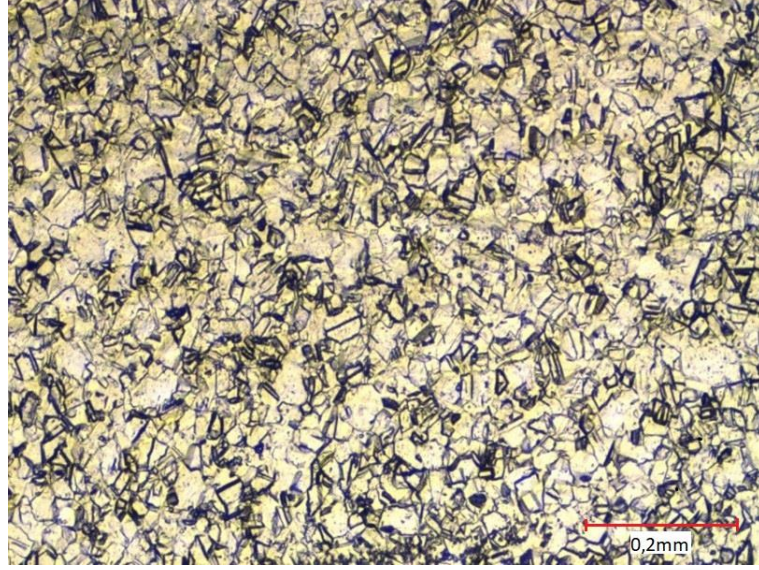


Şekil 6.14. Numunelerin HCl içine bırakılması

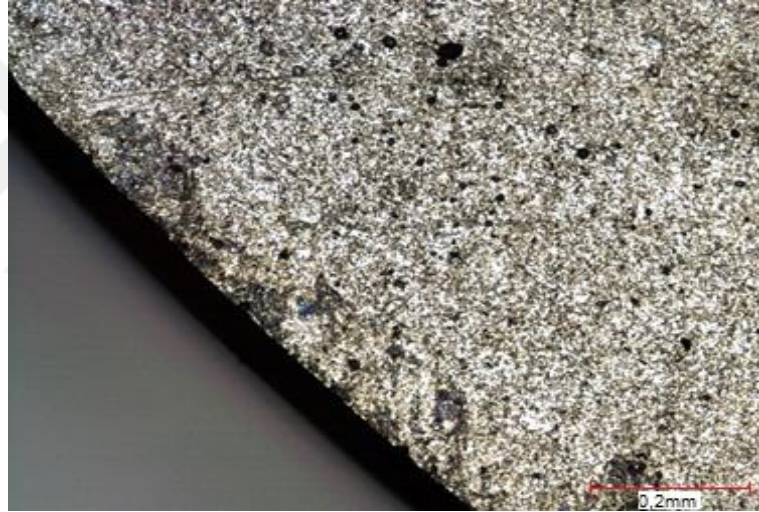
Deney sonrasında numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izleri Şekil 6.15.'teki Nikon marka Eclipse LV150NL model mikroskop cihazında incelenmiş ve görüntüler kaydedilmiştir.



Şekil 6.15. Numunelerin incelendiği mikroskop - Nikon



Şekil 6.16. 316/KAR/VİT/G13 salmastranının 100X görüntüsü



Şekil 6.17. SİC/SİC/VİT/G60 salmastranının 100X görüntüsü

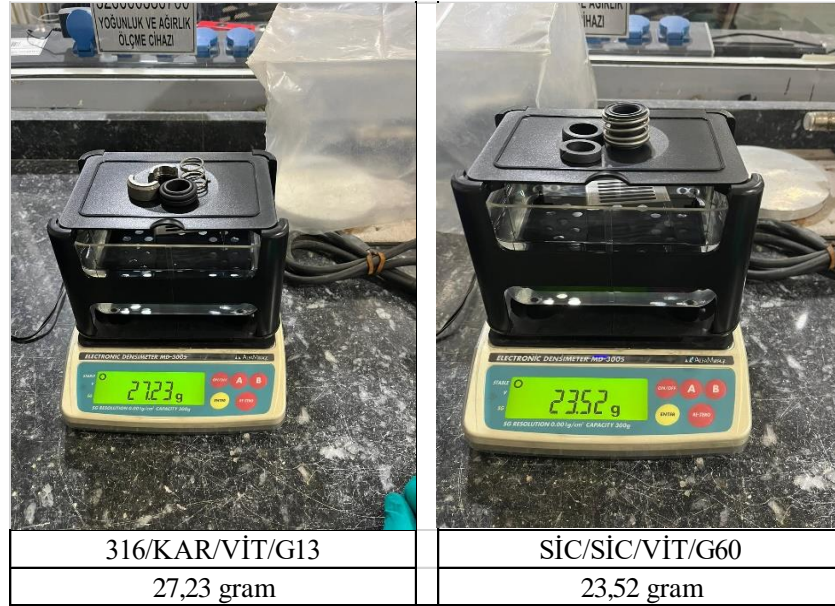
Numunelerin 48 saat süre HCl asit çözeltisinin içerisinde bekletilmesinin ardından numunelerden mikroskop altındaki görüntülerinde 316/KAR/VİT/G13 numunede (Şekil 6.16.) alaşımların 100X ölçekli görüntüsünün asit etkisi ile çözünerek bazı noktalarda koyu renk oluşumu gözlenmiştir. Silisyum karbür numunede (Şekil 6.17.) alaşımların 100X ölçekli görüntüsünün asit etkisi ile çözünerek koyu renk oluşumları ve bazı noktalarda oyuklar oluştuğu gözlemlenmiştir.

48 saat HCl asitte kalan numunelerin yüzeylerinde asitin korozyona olan etkisini tespit edebilmek ve mikroskobik inceleme amacıyla numunelere hassas kesme işlemi aynı makinede uygulanmıştır. Deneysel çalışmada Şekil 6.18.'de görülen Impro marka Procut-Med kesme makinesinde 2 mm kalınlığındaki taş kullanılarak kesim yapılmıştır.



Şekil 6.18. Hassas kesme makinesi

Çalışmada kullanılan numunelerde kesme işlemi x ekseninde yapılmıştır. Hassas kesme işleminde 316 kalite paslanmaz çelik kesilebilmiştir. Silisyum karbürlü salmastranın sabit kısmı, paslanmazı kesebilecek özellikteki taş ile kesilmeye çalışıldığı için kırılmıştır. Şekil 6.19.'da kesilen 316/KAR/VİT/G13 ve kırılan SİC/SİC/VİT/G60 numunelerinin ağırlık ölçümleri verilmiştir.



Şekil 6.19. 48 saat HCl sonunda ölçüm değerleri

316/KAR/VİT/G13 numunesinin ayrılan iki parçası 316/KAR/VİT/G13 - 1 ve 316/KAR/VİT/G13 - 2 olarak adlandırılmıştır. Şekil 6.20.'de 316/KAR/VİT/G13 - 1 ve 316/KAR/VİT/G13 - 2 numunelerinin ağırlık ölçüm değerleri verilmiştir.



Şekil 6.20. 316/KAR/VİT/G13 - 1 ve 2 ağırlık ölçüm değerleri

316/KAR/VİT/G13 salmastranın döner kısmının yaysız hali iki parçaya kesildiği için ayrı ayrı ağırlık ölçümüne gerek duyulmuştur.

Parçalar kesildikten sonra HCl içinde 24 saat bekletilmesinin ardından numuneler zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemi Impro marka Propol-VTD makinesinde (Şekil 6.21.) 2 farklı tanecik yapısındaki zımpara ile yapıldı. Öncelikle 339 rpm devirde 600'lük zımpara ile ön zımparalama arkasından 348 rpm devirde 2000'lik zımpara ile daha derin zımparalama işlemi yapılmıştır.



Şekil 6.21. Zımpara makinesi

Zımparalama işleminin ardından parlatma prosesine geçilmiştir. Şekil 6.22.'de görülen Impro marka makinede, Metkon marka su bazlı mono kristal elmas spreyi damlatılarak 339 rpm devirde numunenin kesilen yüzeyine parlatma uygulanmıştır.



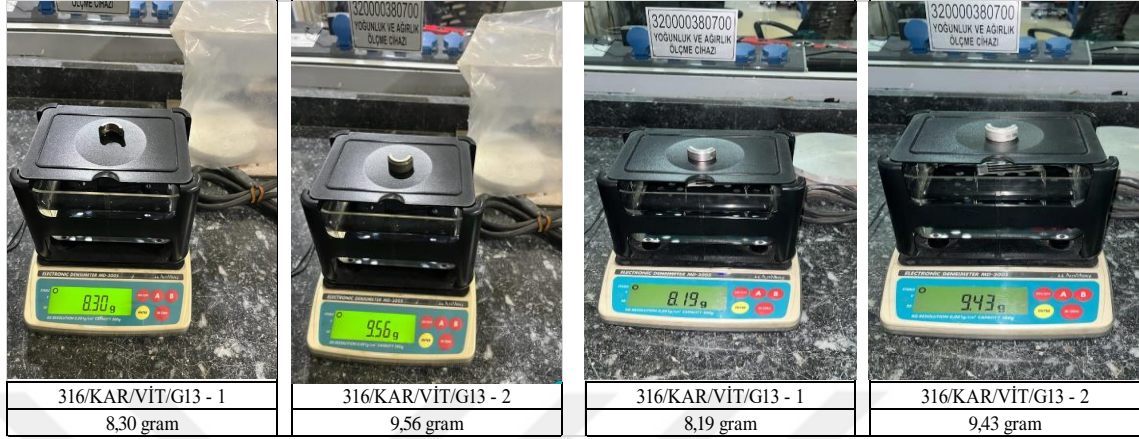
Şekil 6.22. Parlatma makinesi

Parlatma işleminden sonra numunenin mikro yapısını mikroskopta görünür hale getirebilmek amacıyla dağlamaya tabi tutulmuştur. Dağlama işlemi, 400 ml saf su ile 10 gr oksalik asit bulunan kap içerisinde yaklaşık 60 saniye tutularak Şekil 6.23.'te görülen TT Technic marka KXN-3020D cihazda 7,5 amper ve 31,2 voltaj altında çalıştırılmak suretiyle yapılmıştır.



Şekil 6.23. Dağlama makinesi

Dağlama işleminin ardından ürün mikroskop altında görüntülenmeye hazır hale getirilmiştir. Kesilen 316/KAR/VİT/G13 parçaların mikroskopta görülmeleri için yukarıda uygulanan işlemlerde Şekil 6.24.'te görülen ağırlık kayıpları yaşanmıştır.



Şekil 6.24. 316/KAR/VİT/G13 numunelerin ağırlık karşılaştırmaları

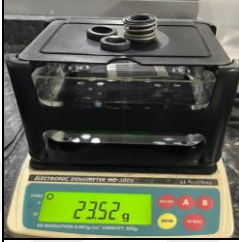







316/KAR/VİT/G13 numunelerinin kesilen yüzelerindeki alaşımları zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinin etkisi ile ağırlık kaybına uğramıştır.

Görüntüler kasıtlı olarak, korozyon belirtilerinin öncelikle yüzey noktalarından başlayacağı ve o noktalarda görülebileceği ön görüldüğü için Şekil 6.25.'te görüldüğü gibi köşe yüzey kısımlarından alınmıştır.



Şekil 6.25. Mikroskobik görüntünün alındığı yüzey

316/KAR/VİT/G13 salmastranın hareketli parçasının yaysız kısmının bir yarısı HCl asit içerisine bırakılmış olan 316/KAR/VİT/G13 - 2 numunesidir. Diğer yarısı ise HCl asit içerisine bırakılmamıştır. HCl asit içine bırakılmayan parçaya ise 316/KAR/VİT/G13 – 1 denilmiştir. Bırakıldıktan sonra ağırlık kaybı gözlenen bu iki numune her 24 saatte bir tekrar ağırlık ölçümüne alınmıştır. Alınan ölçüm değerleri Şekil 6.26.'da alındığı saatler üstlerine yazılarak belirtilmiştir.

72.Saat Sonrası Ağırlık Ölçüm Değerleri		96.Saat Sonrası Ağırlık Ölçüm Değerleri	
			
SİC/SİC/VİT/G60	316/KAR/VİT/G13 - 2	SİC/SİC/VİT/G60	316/KAR/VİT/G13 - 2
23,52 gram	9,43 gram	23,50 gram	9,20 gram
120.Saat Sonrası Ağırlık Ölçüm Değerleri		144.Saat Sonrası Ağırlık Ölçüm Değerleri	
			
SİC/SİC/VİT/G60	316/KAR/VİT/G13 - 2	SİC/SİC/VİT/G60	316/KAR/VİT/G13 - 2
23,48 gram	9,18 gram	23,41 gram	9,16 gram

Şekil 6.26. Numunelerin günlük ağırlık ölçüm değerleri

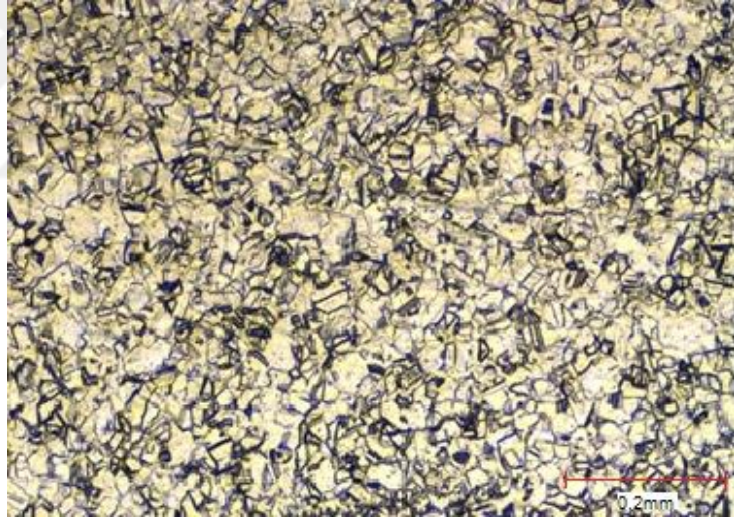
Şekil 6.26.'da görülen SİC/SİC/VİT/G60 salmastra numunesinin 48.saat sonundaki ağırlığı ile HCl içerisinde beklediği 24 saatlik süre ile beraber toplamda 72.saat sonundaki ağırlığı aynıdır. Dolayısıyla ağırlık kaybına uğramadığı görülmüştür. 72.saat sonunda, HCl içerisine bırakılan 316/KAR/VİT/G13 – 2 numunesinin ise 9,56 gram ağırlığından 9,43 gram ağırlığına düştüğü görülmüştür.

96.saat sonunda, SİC/SİC/VİT/G60 salmastra numunesinin 0,02 gram bir ağırlık değişimi meydana gelmiştir. 316/KAR/VİT/G13 – 2 numunesi ise 9,43 gram ağırlığından 9,20 gram ağırlığına düşmüştür. Yüzdesel olarak paslanmaz içerikli malzemenin asit etkisiyle tüm yüzeylerinden matris alaşımının çözünmesi sonucunda silisyum karbür malzemesine oranla daha fazla ağırlık kaybına uğradığı tespit edilmiştir.

120.saatin sonunda SİC/SİC/VİT/G60 salmastra numunesinin ağırlığının 0,02 gram düştüğü görülmüştür. Dolayısıyla tüm yüzeyini kaplayan asit etkisinin korozyona bağlı ağırlık kaybına uğratma konusunda düşük bir etki gösterdiği tekrar görülmüştür. 316/KAR/VİT/G13 – 2 numunesinin 9,20 gram ağırlığından 9,18 gram ağırlığına düşmesi ile ağırlık kaybına uğradığı ancak kayıp oranının azaldığı görülmüştür.

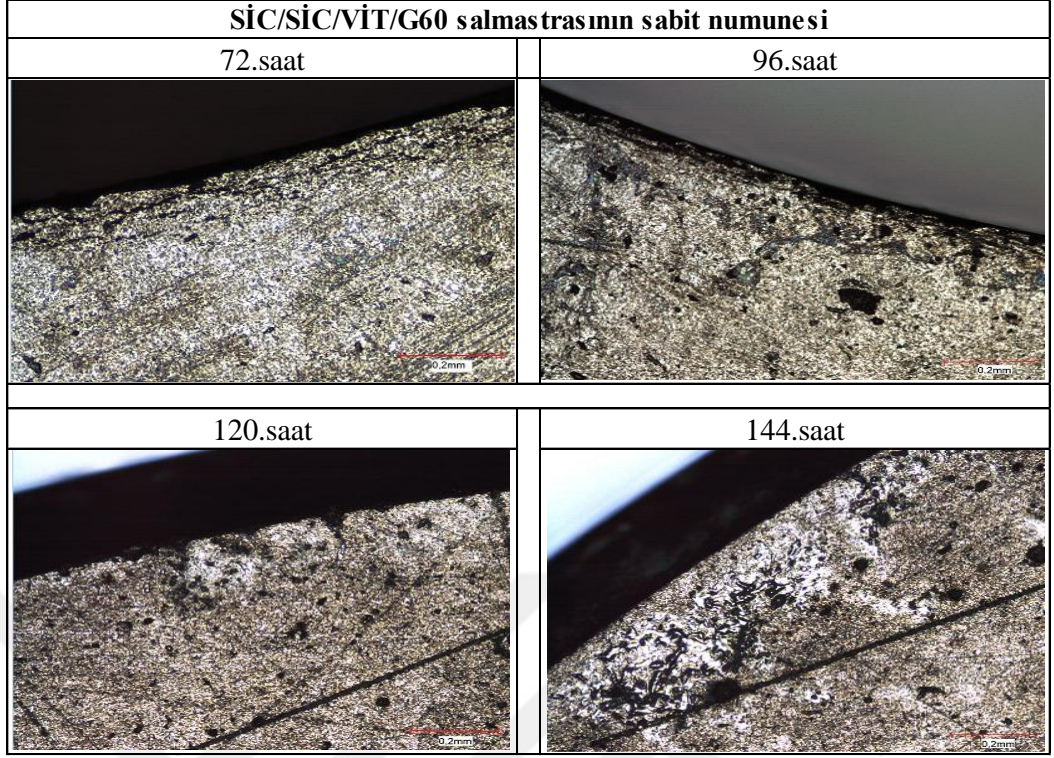
144.saatin sonunda SİC/SİC/VİT/G60 salmastra numunesinde 0,07 gram bir ağırlık farkı meydana gelmiştir. HCl asit numunenin yüzeyindeki tanecikler erozyona uğramış ve taneler arasında bazı çatlaklar oluşturarak ağırlık kaybına uğratma konusunda düşük oranda da olsa etki gösterdiği görülmüştür. 316/KAR/VİT/G13 – 2 numunesinin ise 9,18 gram ağırlığından 9,16 gram ağırlığına düşmüştür. Numunenin yine ağırlık kaybına uğradığı ancak kayıp oranının sabit kaldığı görülmüştür.

316/KAR/VİT/G13 - 1 numunesi ise HCl çözeltisi içerisine atılmadığından tek bir görüntüsü 100X ölçeğinde Şekil 6.27.'de gösterilmiştir.

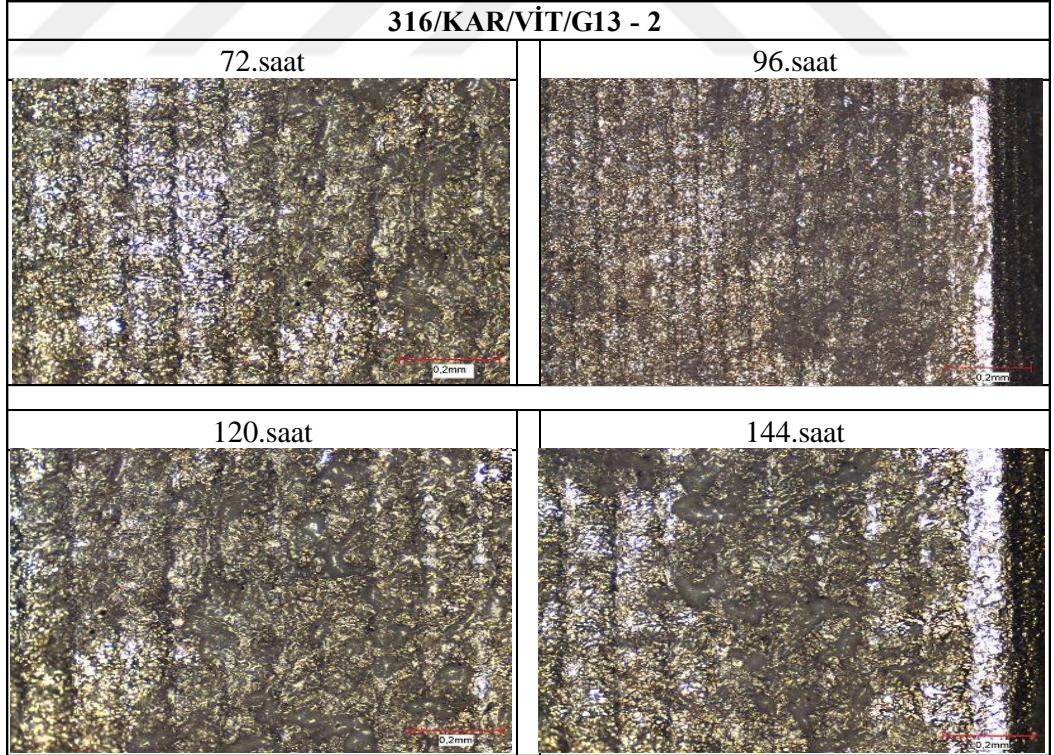


Şekil 6.27. 316/KAR/VİT/G13 - 1 numunesinin 100X görüntüsü

Tüm bu ölçümlerin ardından numunelerin her 24 saatte bir mikroskop görüntüleri alınmıştır. Şekil 6.28.'de SİC/SİC/VİT/G60 salmastrasının sabit tarafına ait görüntüler 100X ölçeğinde verilmiştir. Şekil 6.29.'da 316/KAR/VİT/G13 salmastrasının sabit tarafına ait görüntüler 100X ölçeğinde verilmiştir.



Şekil 6.28. SİC/SİC/VİT/G60 numunesinin 100X görüntüleri



Şekil 6.29. 316/KAR/VİT/G13 - 2 numunesinin 100X görüntüleri

Şekil 6.27.'de 316/KAR/VİT/G13 - 1 numunesinin 48 saatlik tuz korozyon sonrası mikroskopik görüntüsüdür.

Şekil 6.28.'de SİC/SİC/VİT/G60 sabit numunesinin 72.saatten 144.saaate kadar oluşan mikroskopik görüntüleri verilmiştir. HCl çözeltisinde kalmasının ardından Şekil 6.25.'te gösterildiği gibi mikroskopik görüntünün alındığı yüzeye bakılmıştır. Çünkü numune üzerinde korozyon kaynaklı bir kopma, kırılma veya oyuk oluşursa bu yüzeyden başlayarak gerçekleşeceği ön görülmektedir.

Şekil 6.29.'da 316/KAR/VİT/G13 – 2 numunesinin 72.saatten 144.saaate kadar oluşan mikroskopik görüntüleri verilmiştir.

Deneysel çalışmanın mikroskop görüntü analizleri ve korozyondan kaynaklanan ağırlık kayıpları sonuç bölümünde değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1 Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada silisyum karbür ve 316 paslanmaz çeliğinden oluşan iki numune kullanılmıştır. AISI standardına göre silisyum karbür seramik salmastranın sabit ve döner kısımları silisyum karbürden yapılmış malzemedir. Diğer salmastranın sabit kısmı karbon, döner kısmı yayları dahil 316 kalite paslanmaz çeliği malzemelerinden elde edilen malzemelerdir. Bu salmastralardan, silisyum karbür salmastranın sabit kısmı, diğerinin ise döner kısmının yaysız hali alınarak deneylere tabi tutulmuştur.

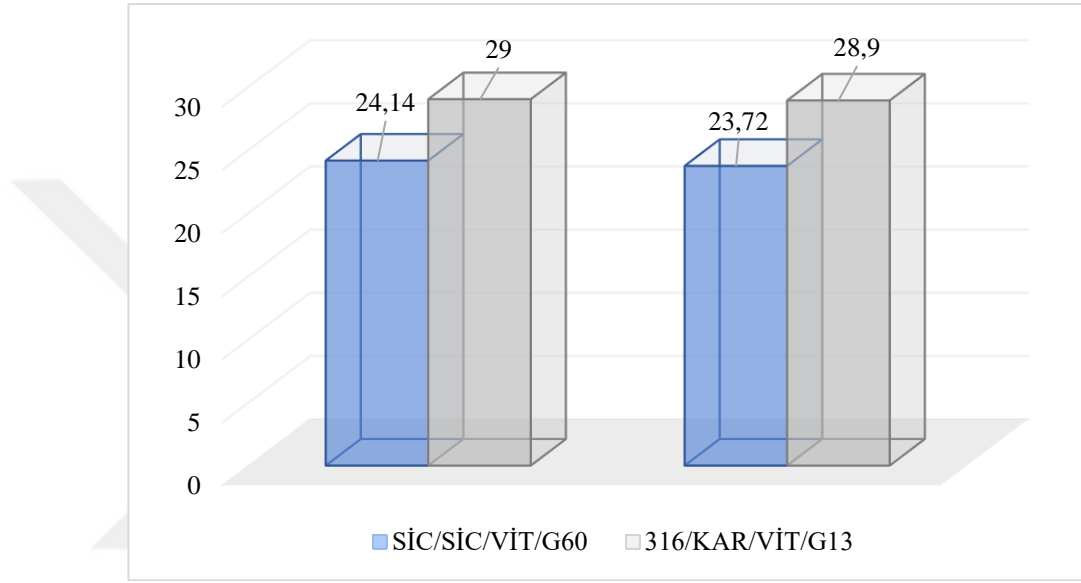
Yapılan tuz testi çalışması sonucunda aynı anda tuz testine atılan numuneler arasında korozyon başlangıcı emareleri ve renk değişimi en erken olan numune 316 kalite malzemedен üretilmiş numune olduğu değerlendirilmiştir.

Malzemelerin içerdiği kimyasal bileşime ve deney sonucunda alınan mikroskop görüntülerine göre malzemelerde bulunan silisyum karbür ve 316 kalite paslanmaz elementlerinin korozyon dayanımlarının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çok etkili ve sürekli kullanılan bir yöntem olan tuz korozyon testinde her iki numunenin de yalnızca renk değişimine uğradıkları sonucuna ulaştıktan sonra hidroklorik asit testine tabi tutarak numuneler izlenmiştir.

Yapılan hidroklorik asit deneyinde izlenen ağırlık kaybı miktarları ve mikroskop görüntüleri incelendiğinde silisyum karbür alaşımı bulunan malzemenin aynı parametrelerde daha büyük bir korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.1. Tuz korozyon testi ağırlık sonuçları

Numune Adı	Tuz Korozyon Testi öncesi	Tuz Korozyon Testi Sonrası
SİC/SİC/VİT/G60	24,14 gr	23,72 gr
316/KAR/VİT/G13	29 gr	28,9 gr



Şekil 7.1. Tuz korozyon testi ağırlık sonuçlarının karşılaştırılması

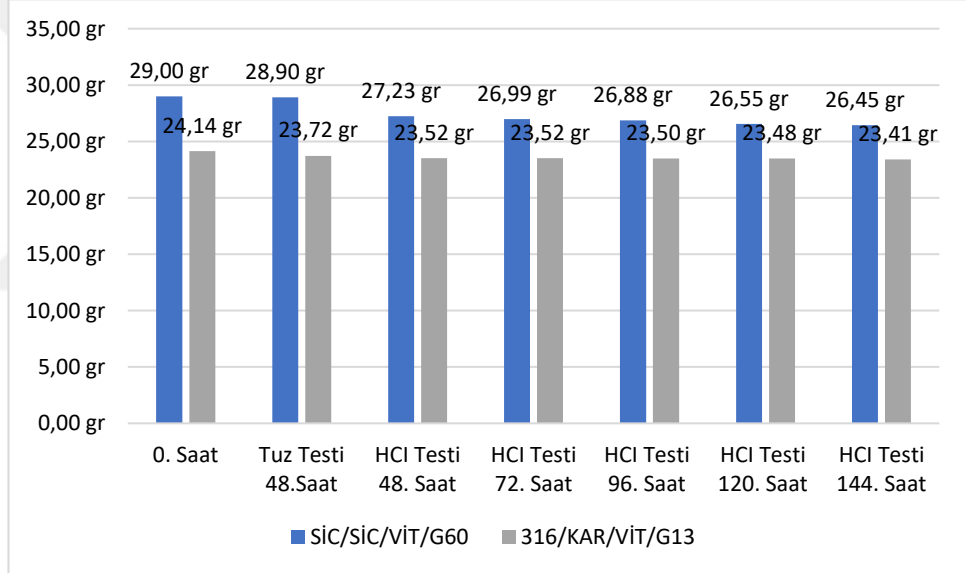
Çizelge 7.1. ve Şekil 7.1.’deki gibi silisyum karbürlü salmastra ve 316 paslanmaz karbon salmastra tuz püskürtme korozyon testi sonuçlarına göre dayanıklı oldukları görülmüştür. Numunelerin ağırlıklarında meydana gelen kütle kayıplarının çok düşük oranlarda olduğu gözlenmiştir. Tuz korozyon testi sonucunda her iki malzemede de fiziksel herhangi bir değişim görülmemiştir.

Tuz korozyon testi sonrasında hidroklorik asit çözeltisine bırakılan numunelerin her 24 saatte bir alınan ölçüm değerleri kaydedilmiştir.

DeneySEL çalışmada sırasıyla alınan tüm ağırlık ölçüm sonuçları ve yapılan işlemler Çizelge 7.2.’de verilmiştir ve grafiği Şekil 7.2.’de belirtilmiştir.

Çizelge 7.2. Numunelerin toplam ağırlıklarının ölçüm sonuçları

Numune Durumu	316/KAR/VİT/G13	SiC/SiC/VİT/G60
0. Saat	29,00 gr	24,14 gr
Tuz Korozyon Testi 48.Saat	28,90 gr	23,72 gr
HCl Testi 48. Saat	27,23 gr	23,52 gr
HCl Testi 72. Saat	26,99 gr	23,52 gr
HCl Testi 96. Saat	26,88 gr	23,50 gr
HCl Testi 120. Saat	26,55 gr	23,48 gr
HCl Testi 144. Saat	26,45 gr	23,41 gr

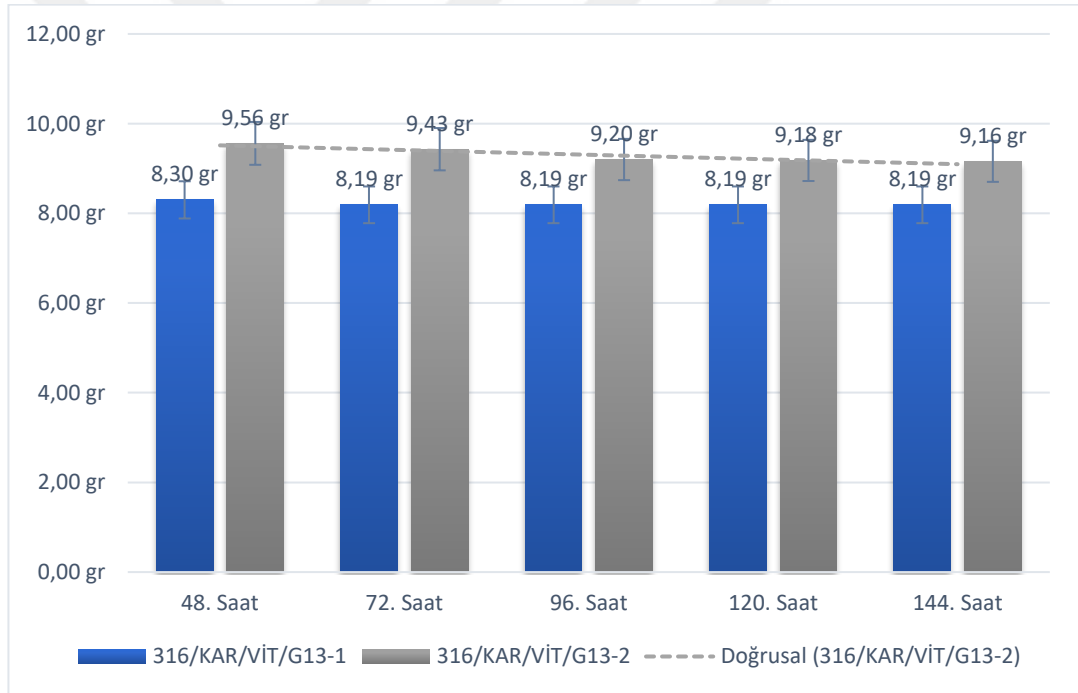


Şekil 7.2. Tüm ağırlık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Zımparadan dolayı meydana gelen ağırlık kayıplarının ölçüm sonuçları Çizelge 7.3.'te verilmiştir. Bu ölçüm sonuçları Şekil 7.3.'teki grafikteki gibi gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. Ağırlık kayıplarının ölçüm sonuçları

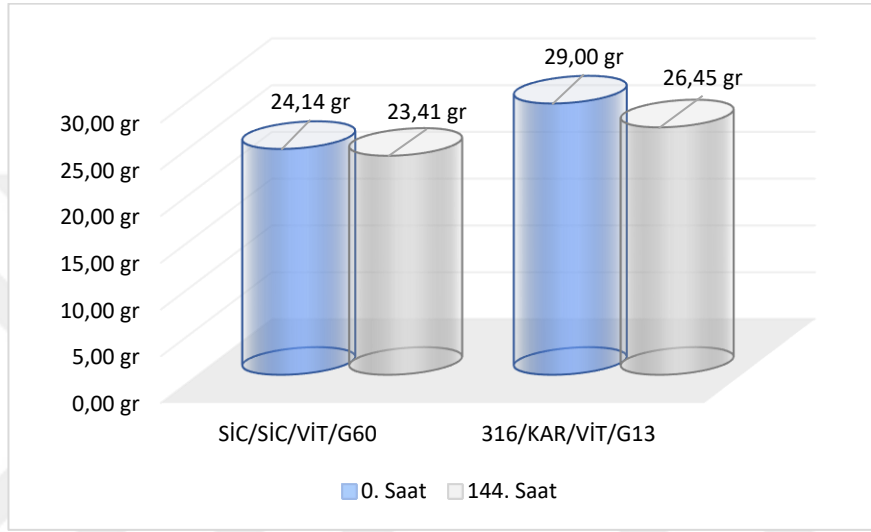
Durum	316/KAR/VİT/G13-1	316/KAR/VİT/G13-2
HCI Testi 48. Saat	8,30 gr	9,56 gr
HCI Testi 72. Saat	8,19 gr	9,43 gr
HCI Testi 96. Saat	8,19 gr	9,20 gr
HCI Testi 120. Saat	8,19 gr	9,18 gr
HCI Testi 144. Saat	8,19 gr	9,16 gr



Şekil 7.3. İşlemler sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları (316/KAR/VİT/G13)

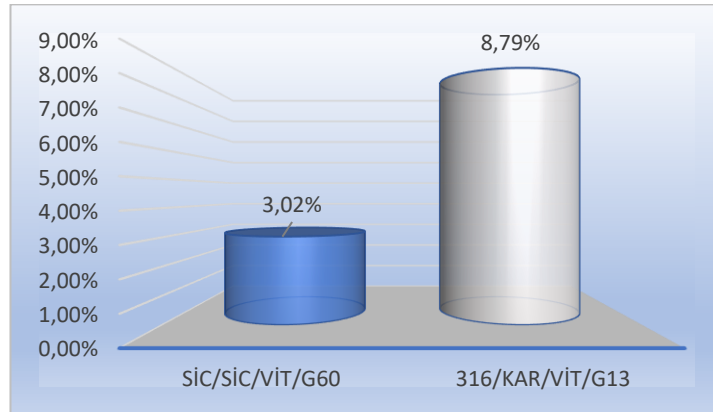
Çizelge 7.4. Ağırlık kaybı karşılaştırması

Zaman	SiC/SiC/ViT/G60	316/KAR/ViT/G13
0. Saat	24,14 gr	29,00 gr
144. Saat	23,41 gr	26,45 gr
% Değişim	3,02%	8,79%



Şekil 7.4. Ağırlık kaybı karşılaştırmasının şematik gösterimi

Çizelge 7.4.'te deneysel çalışmanın 0. Saat ile 144. Saat arasındaki ağırlık kaybı karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada silisyum karbür içerikli malzemede %3,02 oranında ağırlık kaybı yaşandığı görülürken 316 kalite paslanmaz malzemede %8,79 oranında kayıp meydana geldiği Şekil 7.4.'teki grafikteki gibi gösterilmiştir.



Şekil 7.5. Tüm ağırlık sonuçlarının yüzdesel değişimi

Şekil 7.5.'te görüldüğü üzere yüzdesel değişimi en az görülen SİC/SİC/VİT/G60 salmastranın sabit parça numunesi olmuştur. Şekil 7.2.'deki ölçüm sonuçlarına göre 0. Saat ile 144. Saat arasında meydana gelen ağırlık kayıplarına baktığımızda silisyum karbürü salmastranın korozyona daha dayanıklı sağlam bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

Her 24 saatte bir incelenen mikroskobik yapılarına bakıldığında ağırlık kayıp oranları göz önünde bulundurularak aşınmaya karşı daha dirençli olduğu görülmüştür.

Mikroskobik görüntülerinin sonucunda 316/KAR/VİT/G13 - 1 numunesinin HCl çözeltisi içerisine atılmadığından açık koyu renkli tane yapıları görünmüştür. Koyu renkler korozyona uğrayan tanecikli yapıyı göstermektedir. Kopma veya kırılma başlangıcı görülmemiştir.

SİC/SİC/VİT/G60 sabit numunesinde ise HCl çözeltisinde kalmasının ardından numunenin 72. saat sonrasında köşe yüzeylerinden ufak ufak kopmalara uğradığı görülmüştür. İlerleyen zamanlarda bu kopmaların arttığı ve asit etkisi ile çizik olarak görülen çubuk görüntüleri ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan görüntüler numunenin köşe yüzeylerinden başlayıp orta noktalara doğru ilerleyerek oyuk konsantrasyonu yarattığı izlenmiştir. Sonrasında bu çubuk şekilleri derinleşmiş ve daha büyük oyuklara yol açarak çukur görünimleri daha net olarak görülmüştür.

316/KAR/VİT/G13 – 2 numunesinin 72.saatın sonunda HCl çözeltisinde kalmasının ardından mikroskop altında görünen yüzeylerinde aşınmadan kaynaklı koyu renk ve açık renk izlenmiştir. Numunede görünen dikey çizgiler kesici izleri temsil etmektedir. Sonrasında numunede köşe yüzeylerden orta yüzeylere doğru koyuluğun arttığı görülmüştür. Koyuluk artışı taneler arasında oluşan aşınmaya bağlı yüzey değişiminin getirdiği gibi mikro yapıyı bozarak ağırlık kaybetmeye başlamıştır. Asit etkisinde kalmasından dolayı aşınma yaratan yüzeylerde koyu renk dağılım oranı artmıştır.

Mekanik salmastralar soğutma sektöründe sürekli su teması içerisinde olduğundan malzemeleri genellikle 316 kalite paslanmaz çelik, silisyum karbür, tungsten gibi korozyona dayanıklı ürünlerden seçilir. Soğutma sektöründe malzeme yapılarına uygun pompalarda kullanılan iki salmastra ile eş zamanlı olarak deney gerçekleştirilmiştir.

316 kalite paslanmaz çelik ve silisyum karbür malzeme içeren her iki numune de korozyona karşı yüksek bir direnç göstermiştir. Öyle ki en yaygın kullanılan tuz korozyon testinden neredeyse herhangi bir fiziki değişim ve ağırlık kaybına uğramadan çıkmışlardır. Her ikisi de çok dayanıklı ürünler oldukları için ağırlık kayıpları birbirlerine çok yakın sonuçlanmıştır. Mikroskop görüntülerinde ise numunelerde yüzey noktalarında asit etkisiyle aşınmadan kaynaklı, kopmalar, kırılmalar ve kesici izlerin kaybolduğu gözlemlenmiştir.

Her iki ürünün malzeme yapısı da çok üstün özelliklerdedir. Ancak ağırlık kayıplarına bakıldığında yaklaşık olarak %5 kadar daha az ağırlık kaybederek bütünlüğünü koruyan ürünün silisyum karbür içerikli salmastra olduğu görülmüştür.

Sektördeki kullanımının pratikte de incelendiği, 2020'den bu yana çalışan sirkülasyon pompasının silisyum karbür içerikli mekanik salmastra ile etkin bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Sistemin sürekliliğini ve özellikle sızdırmazlığını doğrudan etkileyen bu mekanik salmastranın incelemesi tezdeki deneysel çalışmalar ile yapılmıştır. Mevcut durumda sistemde silisyum karbür salmastralı pompa aktif olarak çalışmaya devam etmektedir.

Bu çalışma ile silisyum karbürün soğutma sektöründe kullanımının yaygınlaşacağı ve literatüre katkı sağlayarak beraberinde sektörü olumlu etkileyeceği ön görülmektedir.

KAYNAKLAR

- AES, (2023). Erişim <https://www.aesseal.com/tr/resources/academy/mekanik-salmastra-nedir>
- Bakar, B. (2009). *Alüminyum Katkılı β Silisyum Karbürün Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Balaban, C. (2005). *Karbotermal Redüksiyon Yöntemiyle Ön Şekillendirilmiş Silisyum Karbür Üretim Parametrelerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Başkurt, E. (2010). *Silisyum Karbür İnce Filmlerin Reaktif Doğru Akım Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bulucu, E. (2016). MBM 301 Seramikler Ders Notları. Erişim <https://avesis.erciyes.edu.tr/resume/downloadfile/nuriburak?key=78fffaaf-71cc-4c1f-82e3-f82790ab8f98>
- BTÜ, (2023). KMB405 Kimya Mühendisliği Laboratuvarı II Isı Değiştiriciler. Erişim [https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/kimyamuh/Dosyalar/3-ISI%20DEGISTIRICI\(1\).pdf](https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/kimyamuh/Dosyalar/3-ISI%20DEGISTIRICI(1).pdf)
- Carrapichano, J.M., Gomes, J.R., Oliveira, F.J., ve Silva, R.F., (2003). Si_3N_4 and Si_3N_4/SiC composite rings for dynamic sealing of circulating fluids. *Wear* 255(2003), 695-698.
- Çağlar, E. (2015). *Bor Karbür / Bor Karbür Silisyum Tabakalı Kompozitlerin Spark Plazma Sinterleme Tekniği İle Üretimi ve Karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çelebi Efe, G. (2010). *SiC Takviyeli İletken Bakır Kompozitlerinin Geliştirilmesi*. (Doktora Tezi), T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Doğdu, S. (2021). *Çelik Malzemelerde Kimyasal Bileşimin Kaplamaya ve Korozyona Etkisinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), T.C. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Duratec, (2023). Erişim <http://tr.ceramicduratec.com/silicon-carbide/silicon-carbide-ceramic/silicon-carbide-heat-exchanger.html>

- ETNA, (2023). Erişim <https://www.etna.com.tr/faydali-bilgiler/pompalarda-kurucalisma>
- EUROLAB, (2017). Erişim <https://www.eurolab.com.tr/sektorel-test-ve-analizler/endustriyel-testler/tuz-sisi-testi>
- Fabmann, (2019). Erişim <https://tr.fabmann-es.com/news/corrosivity-classification-and-selection-of-co-23080290.html>
- Gençkan, D. (2009). *Reaktif Spark Plazma Sinterleme Yöntemi İle B₄C / SiC Kompoziti Eldesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Göçer, A., Nair, F., ve Aydın, M. (2015). Fonksiyonel kademelendirilmiş Al-SiC kompozit malzemelerinin termal şok etkisi altında mekanik özelliklerinin incelenmesi. *XIX. Ulusal Mekanik Kongresi* 24-28 Ağustos, Trabzon.
- Kocabaş, C. ve Savaş, A. (2018). Isı değiştirici performansının deney tasarımı metoduyla analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2018), 1174-1180).
- Kocaman, E. (2016). *Karbotermik Redüksiyon Yöntemiyle Silikadan Tek Fazlı Alfa Si₃N₄ ve Çift Fazlı Si₃N₄ – SiC Teknolojik Seramik Tozlarının Sentezi ve Karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi), T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- KSB, (2023). Erişim https://www.tulumbapompa.com.tr/KSB_Urun_Dokuman/ResidurCeramicBearings.pdf
- Kumar, N.S. (2018). ZA-27/SiC/Gr Hybrid Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(2018), 19969-19975.
- Masdaf, (2020). Erişim https://masdaf.com/_upload/pdf/INM_KB_TR.pdf
- Masdaf, (2023). Erişim <https://masdaf.com/inm-serisi>
- Mekanikmarkt, (2023). Erişim <https://www.mekanikmarkt.com/urun/7062-20-mm-sic-sic-nbr-g60>
- Öğünç, H. (2006). *Sıcak Presleme İle Sinterlenmiş α-SiC Matriksli B₄C Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pachaiyappan, R., Gopinath, R., ve Gopalakannan, S. (2015). Processing techniques of a silicon carbide heat exchanger and its capable properties – a review. *Applied Mechanics and Material*, 787(2015), 513-517.
- Posarac-Markovic, M., Veljovic, Dj., Devcerski, A., Matovic, B. ve Volkov-Husovic, T. (2013). *Materials and Design*, 52(2013), 295-299.

- Rende, H. ve Hanyaloğlu, C. (2012). Rulmanlarda ve kaymalı yataklarda seramiklerin kullanımı. *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, 53(633), 28-35.
- Rota, (2022). Erişim <https://rotaseal.com/mekanik-salmastra/#:~:text=MEKANİK%20SALMASTRA%20NEDİR%3F,ortama%20girmelerini%20önleyen%20sızdırmazlık%20elemanıdır>
- Seçgin, G. (2012). *İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş AZ31 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi*. (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Turan, E. (2004). *Bor Karbür – Silisyum Karbür Kompozitlerinin Sıcak Presleme İle Elde Edilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tülbez, S. (2015). *Karbon Fiber Takviyeli Silisyum Karbür Seramik Matrisli (C/C – SiC) Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uludağ Rulman, (2019). Erişim: <http://www.uludagrulman.com.tr/katalog1.pdf>
- Yalçın, E. ve Çanakçı, A. (2022). Silisyum karbür (SiC) ile güçlendirilmiş çinko – alüminyum (ZA40) alaşımının aşınma parametrelerinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2022), 207-213.
- Yılmaz, Z. (2017). *Bor Nitrür Silisyum Karbür Kompozitlerin Sentezi ve Özelliklerinin Araştırılması*. (Doktora Tezi), Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve Lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2011 yılında T.C. Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2013 yılında stajlarını Bersey Kazan Limited Şirketi'nde tamamladı. 2016 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu ve yılın aynı ayında şantiyelerde mekanik tesisat alanında çalışma hayatına girdi. 2021 yılından sonra fabrikalarda üretim bölümlerinde mühendis / sorumlu pozisyonlarında çalışmaya devam etti. 2021 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2023 yılında Hacı Ayvaz Endüstriyel Mamuller Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi'nde Makine Mühendisi olarak çalışmaya başladı. Halen çalışmaya devam etmektedir.