

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNA KATKILI β SİLİSYUM KARBÜRÜN
SİNERLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak BAKAR

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Müh.

EYLÜL 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNA KATKILI β SİLİSYUM KARBÜRÜN
SİNERLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak BAKAR

(506071202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 Eylül 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Eylül 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Okan ADDEMİR (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ercan AÇMA (İTÜ)

Prof. Dr. Engin ERKMEN (MÜ)

EYLÜL 2009

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin yönetimini üstlenen, her türlü desteğini esirgemeyerek fikir ve önerileri ile çalışmalarına katkıda bulunan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Okan ADDEMİR'e sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez deneylerimin yapılması sırasında yönetimindeki laboratuvarları kullanmama izin veren Sayın Prof.Dr. Lütfi ÖVEÇOĞLU'na ve Sayın Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerimin yapılışı sırasında bana vermiş oldukları destek için arkadaşlarım ve meslektaşlarım Araştırma Görevlisi Önder Güney, Met. Yük. Müh. Ali Cem Akarsu'ya, Met. Müh. Çağlar Çelik'e, Met. Müh. H. Onur Ateşer'e ve Met. Müh. Sercan Aktop'a sonsuz teşekkürler.

Tüm çalışmalarım esnasında yanımda olan, destek veren ve benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Evrim Dömekeli'ye ve bana moral vererek çalışma arzumun ayakta tutan arkadaşlarım Kerem Karapekmez, Fazlı Bulut, İlmay Karamanlar, Batuhan Belik, Enes Tekir, Burak Hasırcıoğlu, Orhan Sönmez ve Beşiktaş Jimnastik Kulübü'ne çok teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, her zaman büyük destek veren ve yanımda olan aileme ve kardeşime minnettarım.

Eylül 2009

Burak BAKAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÖZET	xi
SUMMARY.....	xiii
1. GİRİŞ ve AMAÇ.....	1
2. TEORİK BİLGİ.....	3
2.1 Kompozit Malzemeler	3
2.2 Alümina	5
2.2.1 Alüminanın özellikleri	5
2.2.2 Alümina mineralleri	7
2.2.3 Alüminanın fazları.....	8
2.2.4 Alüminanın kullanım alanları	11
2.3 Silisyum Karbür (SiC).....	12
2.3.1 Silisyum karbürün özellikleri.....	13
2.3.2 Silisyum karbürün kristal yapısı.....	15
2.3.3 Silisyum karbürün üretim prosesi.....	17
2.3.4 Silisyum karbürün şekillendirme ve sinterlenmesi	18
2.3.5 Silisyum karbürün kullanım alanları	20
2.4 Sinterleme	21
2.4.1 Katı hal sinterlemesi	23
2.4.2 Sıvı faz sinterlemesi	25
2.4.3 Reaksiyon sinterlemesi	28
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
3.1 Kullanılan Hammaddeler.....	29
3.2 Kullanılan Alet ve Cihazlar	33
3.3 Deneylerin Yapılışı.....	36
4. DENEY SONUÇLARI.....	43
4.1 Toz Karışımlarının Karakterizasyon Sonuçları.....	43
4.2 Sıcaklığın Yoğunluğa Etkisi	44
4.3 Sıcaklığın Sertliğe Etkisi	46
4.4 Sıcaklığın Eğme Mukavemetine Etkisi	47
4.5 Al ₂ O ₃ İlavesinin Yoğunluğa Etkisi	49
4.6 Al ₂ O ₃ İlavesinin Sertliğe Etkisi.....	49
4.7 Al ₂ O ₃ İlavesinin Eğme Mukavemetine Etkisi.....	50
4.8 Numunelerin X-Işınları Analizi	51
4.9 Mikroyapılara ait SEM fotoğraflarının İncelenmesi	54
4.10 EDS Analizi	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	69

5.1 Sonuçlar.....	69
5.2 neriler.....	70
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : %85,0-99,7 saflıkta alüminaların fiziksel ve mekanik özellikleri	7
Çizelge 2.2 : Alüminyum mineralleri.....	8
Çizelge 2.3 : Korund ve geçiş alüminaların yapısal özellikleri	11
Çizelge 2.4 : Silisyum karbürün tipik özellikleri	12
Çizelge 2.5 : Endüstride kimyasal içeriğine göre (%) SiC'ün sınıflandırılması.....	14
Çizelge 2.6 : Silisyum karbür malzemelerin fiziksel özellikleri.....	14
Çizelge 3.1 : Sinterleme deneylerinde kullanılan silisyum karbür tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	30
Çizelge 3.2 : 1. bileşim için tozların yüzde miktarları	31
Çizelge 3.3 : 2. bileşim için tozların yüzde miktarları	32
Çizelge 3.4 : 3. bileşim için tozların yüzde miktarları	32
Çizelge 3.5 : 1.deneyde kullanılan toz karışımlarının dağılımı	38
Çizelge 3.6 : 2.deneyde kullanılan toz karışımlarının dağılımı	39
Çizelge 3.7 : 3.deneyde kullanılan toz karışımlarının dağılımı	40
Çizelge 4.1 : Toz karışımlarının ortalama tane boyutu	43
Çizelge 4.2 : Üç farklı bileşim için farklı sıcaklıklarda ölçülen yoğunluk değerlerinin teorik değerlerle kıyaslanması.....	45
Çizelge 4.3 : Üç farklı bileşim için farklı sıcaklıklarda ölçülen sertlik değerleri	46
Çizelge 4.4 : Üç farklı bileşim için farklı sıcaklıklarda ölçülen eğme mukavemeti değerleri	48
Çizelge 4.5 : 1450-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu	62
Çizelge 4.6 : 1450-5 numunesinde 2 nolu bölgenin EDS analizi sonucu	63
Çizelge 4.7 : 1450-5 numunesinde 3 nolu bölgenin EDS analizi sonucu	63
Çizelge 4.8 : 1450-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu	65
Çizelge 4.9 : 1450-5 numunesinde 2 nolu bölgenin EDS analizi sonucu	65
Çizelge 4.10 : 1500-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.....	66
Çizelge 4.11 : 1500-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.....	67
Çizelge 4.12 : 1500-15 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.....	68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kompozit çeşitleri.....	4
Şekil 2.2 : a) α - Al_2O_3 'nın yapısı, b) α - Al_2O_3 'nın bazal düzlemi	9
Şekil 2.3 : Alüminyum hidroksitlerin termal değişimleri.....	10
Şekil 2.4 : Kübik ve hegzogonal SiC yapısı	16
Şekil 2.5 : SiC'ün SEM görüntüsü.....	17
Şekil 2.6 : "Acheson" prosesinde kullanılan fırının genel görünümü	18
Şekil 2.7 : Sinterlemede taneler arasında meydana gelen büzülme	22
Şekil 2.8 : Sinterleme sırasında partiküller arası bağ oluşumunun iki küre modeliyle açıklanması	23
Şekil 2.9 : Sinterlemeye bağlı olarak oluşan boyun teşekkülüne ait SEM fotoğrafı..	24
Şekil 2.10 : Klasik sıvı faz sinterlemesinin kademelerine ait şematik diyagram.....	27
Şekil 2.11 : Sıvı faz sinterlemesinde yoğunluk ile sıvı faz miktarı arasındaki değişim	28
Şekil 3.1 : Deneyleerde kullanılan Al_2O_3 tozunun XRD analizi	29
Şekil 3.2 : Deneyleerde kullanılan Al_2O_3 tozunun tane boyut dağılımı.....	29
Şekil 3.3 : Deneyleerde kullanılan SiC tozunun XRD analizi.....	30
Şekil 3.4 : Deneyleerde kullanılan SiC tozunun tane boyut dağılımı	30
Şekil 3.5 : Deneyleerde kullanılan 5% Al_2O_3 -95% SiC tozunun tane boyut dağılımı	31
Şekil 3.6 : Deneyleerde kullanılan 10% Al_2O_3 -90% SiC tozunun tane boyutdağılımı	32
Şekil 3.7 : Deneyleerde kullanılan 15% Al_2O_3 -85% SiC tozunun tane boyutdağılımı	33
Şekil 3.8 : Sartorius tartı cihazı.....	33
Şekil 3.9 : Szegvari atritör	34
Şekil 3.10 : ElektroMag etüv	34
Şekil 3.11 : Autograph çekme basma cihazı.....	34
Şekil 3.12 : Buehler kesici	35
Şekil 3.13 : Shimadzu sertlik ölçüm cihazı	35
Şekil 3.14 : Apex marka hidrolik pres.....	35
Şekil 3.15 : Mettler Toledo yoğunluk ölçme cihazı	36
Şekil 3.16 : Protherm marka oksitli sinter fırını.....	36
Şekil 3.17 : Deneyleelerin şematik gösterilişi.....	37
Şekil 4.1 : Bileşim – tane boyutu grafiği.....	43
Şekil 4.2 : Deneyleerde kullanılan %5-10-15 Al_2O_3 içeren tozların XRD analizi.....	44
Şekil 4.3 : Al_2O_3 -SiC kompozitlerinde sıcaklığın rölatif yoğunluğa etkisi.....	45
Şekil 4.4 : SiC- Al_2O_3 kompozitlerinde sıcaklığın sertliğe etkisi	47
Şekil 4.5 : SiC- Al_2O_3 kompozitlerinde sıcaklığın eğme mukavemetine etkisi.....	48
Şekil 4.6 : Farklı sıcaklıklar için SiC- Al_2O_3 kompozitindeki % Al_2O_3 (hacim) miktarının rölatif yoğunluğa etkisi	49
Şekil 4.7 : Farklı sıcaklıklar için SiC – Al_2O_3 kompozitindeki % Al_2O_3 (hacim) miktarının sertliğe etkisi	50
Şekil 4.8 : Farklı sıcaklıklar için SiC- Al_2O_3 kompozitindeki % Al_2O_3 (hacim) miktarının eğme mukavemetine etkisi.....	51
Şekil 4.9 : 1400 °C'de sinterlenmiş numunelerin (5-10-15) XRD analizi	51

Şekil 4.10 : 1450 °C’de sinterlenmiş numunelerin (5-10-15) XRD analizi	52
Şekil 4.11 : 1500 °C’de sinterlenmiş numunelerin (5-10-15) XRD analizi	52
Şekil 4.12 : 1400-1450-1500 °C’de sinterlenmiş %5 alüminalı numunenin XRD analizi	53
Şekil 4.13 : 1400-1450-1500 °C’de sinterlenmiş %10 alüminalı numunenin XRD analizi	53
Şekil 4.14 : 1400-1450-1500 °C’de sinterlenmiş %15 alüminalı numunenin XRD analizi	54
Şekil 4.15 : 1450 °C’de yapılan deneye ait %5 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 250)	55
Şekil 4.16 : 1450 °C’de yapılan deneye ait %5 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000)	55
Şekil 4.17 : 1450 °C’de yapılan deneye ait %5 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 5000)	56
Şekil 4.18 : 1450 °C’de yapılan deneye ait %15 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000)	56
Şekil 4.19 : 1450 °C’de yapılan deneye ait %15 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 2500)	57
Şekil 4.20 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %5 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 75)	57
Şekil 4.21 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %5 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000)	58
Şekil 4.22 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %5 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000)	58
Şekil 4.23 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %5 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 2500)	59
Şekil 4.24 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %5 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 5000)	59
Şekil 4.25 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %15 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000)	60
Şekil 4.26 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %15 Al ₂ O ₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 5000)	61
Şekil 4.27 : 1450-5 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X2500)	61
Şekil 4.28 : 1450-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi	62
Şekil 4.29 : 1450-5 numunesinde 2 nolu bölgenin EDS analizi	62
Şekil 4.30 : 1450-5 numunesinde 3 nolu bölgenin EDS analizi	63
Şekil 4.31 : 1450-5 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X5000)	64
Şekil 4.32 : 1450-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi	64
Şekil 4.33 : 1450-5 numunesinde 2 nolu bölgenin EDS analizi	65
Şekil 4.34 : 1500-5 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X1000)	66
Şekil 4.35 : 1500-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi	66
Şekil 4.36 : 1450-15 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X2500)	67
Şekil 4.37 : 1450-15 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi	67
Şekil 4.38 : 1500-15 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X1000)	68
Şekil 4.39 : 1500-15 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi	68

ALÜMİNA KATKILI β SİLİSYUM KARBÜRÜN SİNERLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Silisyum karbür, sahip olduğu yüksek sertlik, düşük yoğunluk, yüksek oksidasyon direnci, termal iletkenlik, termal şok dayanımı ve değişmeyen eğme mukavemeti özellikleri ile günümüzde dikkat çeken ileri teknoloji seramik malzemeleri arasındadır. Son zamanlarda, silisyum karbürün şekillendirilmesinde basınçsız sinterleme yönteminin kullanılmaya başlanması bu malzemeye olan ilgiyi daha da arttırmıştır.

Bu çalışmada, alümina katkı silisyum karbür seramik kompozit üretimi ve bu seramik kompozitlerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri incelenmiştir.

DeneySEL çalışmada alümina ve silisyum karbür hammaddeleri kullanılmıştır. Kullanılan alümina tozunun ortalama boyutu 7 μm , SiC'ün toz boyutu ise 2 μm 'dir.

SiC içerisine hacimce %5-10-15 oranında alümina ilave edilip homojen karışım sağlamak amacı ile atritörde sulu (alkol) öğütülerek karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlara ağırlıkça %5 oranında bağlayıcı (PEG) ilave edilmiştir. Bu karışımların etüvde alkolü uzaklaştırılıp kurutulduktan sonra toz haline getirilmiştir. Toz halindeki karışımlar soğuk preste 300 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numuneler 1400–1450–1500 °C sıcaklıklarda sinterlenmiştir.

Üretilen numunelerin üzerinde bulk yoğunluk, rölatif yoğunluk, üç nokta eğme mukavemeti, sertlik deneyleri yapılmış ve değerler tespit edilmiştir. XRD ve SEM ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Maksimum yoğunluğa, sertliğe ve eğme mukavemetine 1500 °C'de elde edilmiştir ve değerler %86 yoğunluk, 1978 vickers sertlik, 72 Mpa eğme mukavemetidir.

Yapılan bu fiziksel ve mekanik testler sonucunda üretilen seramik kompozitlerin özellikleri verilmiş ve tartışılmıştır.

SINTERING OF ALUMINA ADDED SILICON CARBIDE AND ITS CHARACTERIZATION

SUMMARY

Silicon Carbide, SiC, has received a special attention as advanced ceramic material recently since it offers superior properties such as high hardness, low bulk density, high oxidation resistance, thermal conductivity, thermal shock resistance. Recently, pressureless sintering has received attention as a most extensively practiced forming method for SiC.

The aim of this study is to search the effect of alumina addition on physical and mechanical properties, of SiC based ceramic composites.

During experiments powdered, alumina in 7 μm and SiC in 2 μm are used.

Powdered alumina is added to SiC at 5-10-15 vol. % ratios. To have a homogeneous mixture, powder compositions are wet (alcohol) milled and then dried in an incubator. Bonder is added in %5vol. Of the mixture. This mixtures are dried in incubator after mixing. Granules are dry pressed under 300 MPa and incubated. Dried bodies are sintered at 1400–1450–1500 °C.

Composite bodies are tested against relative density, three point bending strength, hardness, phase (XRD) and microstructural analysis (SEM). Maximum density, hardness and bending strength is obtained at 1500 °C and the values are %86 density, 1978 vickers hardness, 72 Mpa bending strenght.

By the help of physical and mechanical experiment results, the properties of ceramic composites are given and discussed.

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Günümüzde ileri teknoloji kompozitlerinin yönlendirdiği yeni bir devrimin ortasındayız. Bu yeni sınıf malzemeler farklı özelliklere sahip bileşimlerin bir araya gelmesiyle birlikte, tek başına kullanılan elementlerden daha fazla üstün özellikleri sağlayarak radikal bir değişime sebep olmuşlardır. Sahip oldukları üstün özellikler teknolojik gelişmeler için onları vazgeçilmez malzemeler yapmıştır. Endüstri temsilcileri bu malzemelerin 21'inci yüzyılda oluşacak ekonomik ticaret alanında kritik bir role sahip olacaklarına inanmaktadırlar [1].

Silisyum karbür (SiC), yüksek sıcaklıklarda ulaştığı, iyi mekanik özelliklerle ileri teknoloji seramiklerinin en önemlileri arasında yerini almış bir malzemedir. SiC, düşük termal iletkenliğe, düşük termal genleşme katsayısına, yüksek termal şok dayanımına sahip, sert, yarı iletken ve elmasan daha büyük refraktif indeks değerine sahip bir malzemedir. Aşındırıcı bir toz olarak, aşındırıcı takım malzemelerinde ve parlatma işlemlerinde kullanılmaktadır. Silisyum karbür elmas ve bor karbürden daha düşük sertliğe sahip olmakla beraber, çok geniş bir biçimde metal dışı malzemelerin öğütülmesinde, sert malzemelerin son işleme kademelerinde ve seramik parçalarda üretim maliyetinin önemli olduğu zamanlarda dolgu olarak kullanılır.

Bunların dışında, seramik kaplamalarda, aşınma bileşenlerinde, ısıtma elemanlarında, kaplanmış aşındırıcılarda, seramik pompalarda, seramik ve metal matriks kompozitlerde, seramik conta ve halkalarda ve hafıza disklerinde kullanılmaktadır.

SiC, sahip olduğu kovalent yapıdan dolayı tek başına sinterlenmesi çok zor bir malzemedir. Bu sebeple sinterlenmesi sonucunda yoğun bir yapı elde edilebilmesi için, sisteme sıvı veya katı faz sinterleme mekanizmasını hızlandıracak katkı maddeleri eklenir. Bunlardan ikisi de SiC'ün sinterlenebilme özelliğini katı difüzyon prosesiyle hızlandıran karbon ve bordur [2, 3].

Alümina seramiklerin kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Seramik malzemelerin üretiminde geniş kullanım alanına sahip alümina tozları; teknik seramikler ile cam, geleneksel seramikler, buji ve elektronik devre altlıklarının üretiminde ve bioseramiklerde kullanılmaktadır. Teknik seramik grubu içerisinde en çok üretilip, kullanım alanı bulan seramikler alümina ve alümina esaslı seramiklerdir. Dünyada değişik firmalar üretilen birçok alümina tozu bulunmakta ve bu tozların özellikleri ve birbirinden farklılıklar göstermektedir [4]. Tekstil makinelerinde iplik kılavuzu olarak kullanılan alümina seramikler, çelik, cam ve sırlanmış porselen ile aşınma ve erozyon direnci, dayanımı ve boyutsal dengesi, ipliğe verdiği zarar açısından kıyaslandığı zaman daha üstün özelliğe sahiptir [5]. Değişik modifikasyonlarda alüminalar olmasına rağmen, ticari kullanım alanına sahip olan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'tür. Alümina seramikleri özelliği içerdikleri alümina miktarının artması ile iyileşir. En arzu edilen kullanım % 90 ve daha çok alümina içeriğidir [6].

İleri teknoloji ürünü seramik malzeme olarak çok kullanılan alümina, uygulamalarda yüzeyden tane kopması şeklinde aşınma davranışı gösterir. Bu durum, farklı önlerdeki kristallerin termal genleşmelerinde anizotropik özellikler göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu anizotropik özellikler tane sıraları boyunca çatlak oluşumlarına neden olduklarından, kaba taneli yapılarda daha etkilidirler. Büyük taneli yapılarda mikro çatlaklar tane içlerine doğru gelişme göstermektedirler [7].

Bu çalışmanın amacı, silisyum karbürün sinterlenme kabiliyetini ve mekanik özelliklerini tokluk, sertlik, eğme mukavemeti, alümina tozu ilavesi ile düşük sıcaklık ve basınç olmaksızın sinterleme tekniğini geliştirmektir.

2. TEORİK BİLGİ

2.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı özellikte malzemenin makro ölçüde bir araya getirilmesiyle üretilir. Bu tasarım kompozitin mikro yapı bileşenlerinden her birinin arzu edilen en iyi özelliklerini sisteme kazandıracak şekilde yapılmalıdır. Böylece malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanır. Örneğin mukavemet, mukavemet/yoğunluk, elektrik ve ısı iletkenlik, yorulma ömrü, aşınma direnci, korozyon direnci, yüksek sıcaklık mekanik özellikleri kompozit malzeme sistemleri kullanılarak geliştirilebilecek özelliklerdir. Kısaca kompozit malzemeler belirli bir amaca en uygun özelliklere sahip malzemeler uygun tekniklerle bir araya getirilirler. Yapı bileşenlerinin farklı karakteristik özellikleri kompozit malzeme yapısında bütünleşir. Bu nedenle kompozitin sahip olduğu özelliklerin tümünü tek bir yapı bileşeninde görmek mümkün değildir. Kompozit malzemelerde amaç fiziksel, mekanik veya kimyasal özelliklerden herhangi birinin veya birkaçının geliştirilmesine yönelik olabilir. Kompozit sistem matris fazı ile fiber, visker veya partikül şeklinde olabilecek takviye fazı olmak üzere iki bileşenden ibarettir. Kompozit karakteri, matris fazının polimer, metal veya seramik oluşuna göre isimlendirilir. Kompozit malzemelerin avantajları yüksek dayanım, ağırlık azalması, uzun ömür, yüksek korozyon direnci, azaltılabilen veya arttırılabilen termal ve elektriksel iletkenlikleri olarak özetlenebilir. Bu malzemelerin dezavantajları ise yüksek hammadde ve işleme maliyeti, değişken özelliklerde olası zayıflıklar, düşük tokluk, geri dönüşümünün olmaması ve analiz yapımındaki zorluklar olarak öne çıkmaktadır [8]. Mühendislik malzemelerinin geçerli bir tanımlamayla açıklanması 3 şekilde olur:

1) Elementel veya basit seviye: Bu seviyede tek moleküllerin ve kristal kümelerin ve tüm malzemelerin iki veya daha fazla atomdan oluşmaları kompozit olarak adlandırılabilir. Bunlar bileşimleri, alaşımları, polimerleri ve seramikleri içerir; saf elementler hariç tutulur.

2) Mikro yapısal seviye: Bu seviyedeki kristaller, fazlar ve bileşimlerde, kompozit tanımlaması iki veya daha fazla farklı kristallerin, molekül yapılarının veya fazlarının birleşmesiyle oluşmuş bir malzeme diye tanımlanır. Bu tanımlamayla birçok malzeme geleneksel bir biçimde monolitik veya homojen olarak kompozit adıyla tanımlanır. Tek fazlı alaşımlardan örneğin, tunç bu tanımlamayla monolitik, çelik yani karbon ve demirin çok fazlı alaşımı ise kompozit olur.

3) Makro yapısal seviye: Bu seviyede ise farklı makro bileşenlerden oluşmuş malzeme sistemlerinden bahsedilir, bunlar ise matriksler, partiküller ve fiberlerdir. Sonuç olarak kompozit malzeme, iki veya daha fazla makro bileşenlerin farklı şekil ve oranlarda karıştırılmasından oluşan bir malzeme sistemidir.

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi literatürde kompozitler 5 grupta sınıflandırılmaktadır:

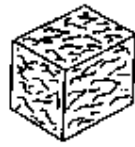
1- Fiber kompozitler

2- Pul kompozitler

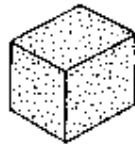
3- Partikül kompozitler

4- Doldurulmuş kompozitler

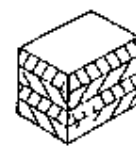
5- Lamine kompozitler [8]



Fiber Kompozit



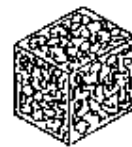
Partikül Kompozit



Lamine Kompozit



Pul Kompozit



Doldurulmuş Kompozit

Şekil 2.1 : Kompozit çeşitleri.

Kompozitler çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptirler.

Avantajları;

- a- Ağırlık azalması (yüksek dayanım (veya sıklık)/ağırlık oranı),
- b- Çok farklı yükleme koşulları (fiber-fiber),
- c- Uzun ömür (yüksek korozyon direnci),
- d- Düşük üretim maliyetleri,
- e- Arttırılmış (veya azaltılmış) termal veya elektrik iletkenlikleridir.

Dezavantajları ise;

- a- Yüksek hammadde ve işleme maliyeti,
- b- Değişken özelliklerde olası zayıflıklar,
- c- Düşük tokluk,
- d- Geri dönüşümünün olmaması,
- e- Birleştirmede görülen zorluklar,
- f- Analiz yapımındaki zorluklardır [8].

2.2 Alümina

2.2.1 Alüminanın özellikleri

Alümina, kristalografik olarak oksijen iyonlarının alüminyum iyonları tarafından sıkı hegzogonal olarak sarılması ile ifade edilebilir. Dış görünüş olarak beyaz bir tozdur. Ergime sıcaklığı 2050 °C, kaynama noktası ise 2080 °C olan alümina yüksek sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve mekanik yüklere karşı en dayanıklı refrakter malzemelerden biridir. Alüminanın molekül ağırlığı 101,96 g/mol reaktif indeksi 1.765, oluşum serbest enerjisi ise -1582,4 kJ/mol'dür.

Alümina suda ve şayet iyi kalsine edilmişse hem mineral asitlerinde hem de bazlarda çözünmezler. Alümina, HF'ye karşı da dayanıklıdır. Sodyum karbonat, kostik soda ve sodyum peroksit saf alümina potalarda az tahribatla eritilebilir.

1700-1800 °C gibi yüksek sıcaklıklarda flor gazı dışında bütün gazlara karşı direnç gösterir. Alümina oksitleyici ve redükleyici atmosferde 1900 °C'ye kadar kullanılabilir [9].

Doğal korundum halinde fakat feldspat ve killerde olduğu gibi genellikle silikatlarla birlikte kullanılırlar. Alümina aynı zamanda boksit, diaspor, kriyolit, silimanit, kiyanit, nefalit ve diğer birçok mineralin bileşiminde yer almıştır.

Saf alümina düşük sıcaklıkta birkaç formda bulunur. Fakat bütün bu formlar zaman kristal boyutu ve atmosfere bağlı olarak 750–1200 °C arasında α alüminaya dönüşür. 1600 °C'nin üzerinde yapılan ısıtma bu dönüşümü hızlandırır. Alüminanın α fazına dönüşümü tersinir değildir [9].

Alümina (Al_2O_3) ile hazırlanmış değişken seramik bünyelerin özellikleri partikül boyutu ve proses şartlarına dayanır. Korundum yapısı ve $\alpha-Al_2O_3$ kararlı yapı olmasına rağmen diğer Al_2O_3 modifikasyonları var olur ve görülebilir [10].

Alüminadan poroz ve yoğun ürünler yapılır. Poroz ürünler genelde ergimiş alüminadan yapılır ve bunlar 1900 °C'ye kadar çıkan yüksek sıcaklık fırınlarının astarı olarak kullanılır. Ergimiş alümina %99,8 Al_2O_3 ihtiva eder. Saflık yükseldikçe mukavemet, elektrik ve aşınma direncinde artış kaydedilir [9].

Çizelge 2.1’de %85,0–99,7 saflıkta alüminaların fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir [11].

Çizelge 2.1 : %85,0-99,7 saflıkta alüminaların fiziksel ve mekanik özellikleri [11].

Alümina içeriği, (%)	85,0	95,0	99,7
Yoğunluk, g/cm ³	3-3,5	3,7	3,9
Dielektrik sabiti	8,5	9,2	9,0-10,1
Dielektrik mukavemeti, kV/mm	28	---	10-35
Hacim direnci, Ω.cm (600°C’de)	4×10 ⁶	5×10 ⁹	4×10 ¹⁰
Termal iletkenlik, W/m °C	15	20	28-35
Termal genleşme katsayısı, 10 ⁻⁶ / °C	(20-1000°C) 7	7,6	8
Maksimum kullanım sıcaklığı, °C	1300	1500	1700
Spesifik ısı, J/K kg	920	900	---
Eğme mukavemeti, MPa (20°C’de)	300	350	350
Basma mukavemeti, MPa (20°C’de)	1800	2000	2200-2600
Elastik modül, GPa	260-330	340-375	380-410
Poisson oranı	0,22-0,25	0,23-0,26	0,24-0,27
Sertlik, HV1,0	800-1000	1200-1600	1500-2000

2.2.2. Alümina mineralleri

Bugün için tabiatta yaklaşık 250 cins alüminyum minerali bilinmektedir. Bunların %40’ını alüminyum silikatlar teşkil etmektedir. Alümina, çoğunlukla hidroksitlerin karışımından oluşan boksitten elde edilir. Boksit bir mineral ismi olmayıp gibsit, böhmit ve diaspor gibi hidroksit minerallerinin bir karışımıdır [11]. Daha çok silikat ve oksit karışımları halinde ortaya çıkan silikat mineralleri ve korund çok sağlam yapılı bileşikler oldukları için alüminyum üretiminde kullanılamazlar. Birincil oluşumlar olarak tanımlanan silikat bileşimli kayalar meydana getiren minerallerin yüzey etkileri ile değişmeleri sırasında alüminyum üretimi için uygun olan ikincil mineraller oluşmaktadır. Çeşitli alüminyum mineralleri ve bunların özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir [12].

Çizelge 2.2 : Alüminyum mineralleri [12].

Adı		Formül	% Al	% Al ₂ O ₃
a)	Boksit minareleri			
	Korund	$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$	52,9	100,0
	Gibsit	$\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	34,6	65,4
	Diasporit	$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	45,0	85,0
	Böhmit	$\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	45,0	85,0
b)	Alunit	$\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	19,6	85,0
c)	Alum Mineralleri			
	Alumojel	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	15,8	29,8
	Aluminit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	15,7	29,7
	Kalinit	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	5,7	10,8
	Halotrikite	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	5,8	11,0
d)	Diğer Mineraller			
	Andaluzit	Al_2SiO_5	33,3	62,9
	Kiyanit	Al_2SiO_5	33,3	62,9
	Silimanit	Al_2SiO_5	33,3	62,9
	Kaolinit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	20,9	39,5
	Spinel	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	38,0	71,8
	Ortoklaz	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	9,7	18,3
	Kriyolit	$3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$	12,9	24,3
	Topaz	$\text{Al}_2[\text{Fe}(\text{OH})_2]\text{SiO}_4$	22,7	42,9
	Beril	$\text{BeAl}_2(\text{SiO}_3)_6$	10,4	19,7
	Staurilit	$2 \text{Al}_2 \text{SiO}_5 \cdot \text{Fe}(\text{OH})_2$	26,0	49,0

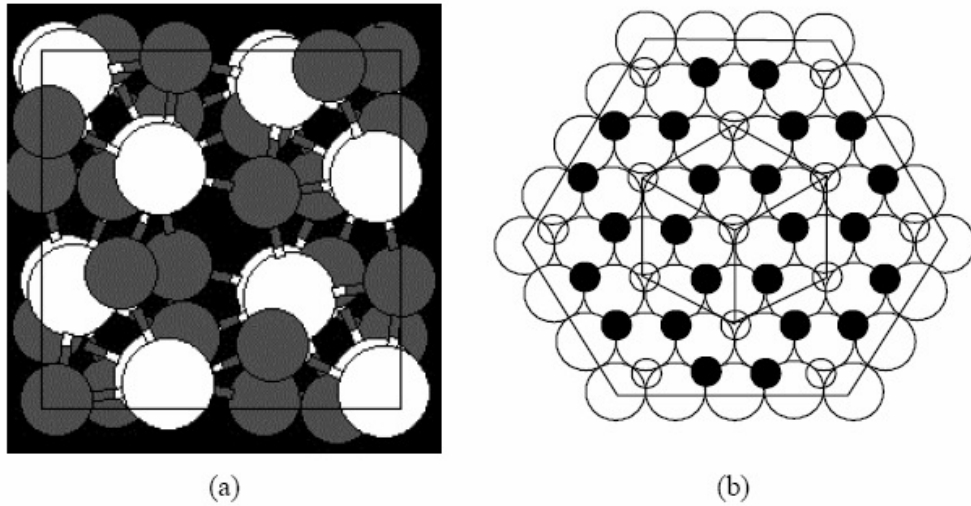
2.2.3. Alüminanın fazları

Alümina yer kabuğunun önemli bir miktarını oluşturur. Birincil püskürük kayalar ve bu kayaların parçalanmış ürünleri ve ayrıca ikincil birikintiler alümina içerir. Serbest alümina ise diğer mineraller gibi kolay bulunmayan bir cevherdir. Bu mineraller özellikle hidratlardan oluşur [9]. Alüminyum hidroksitlerin termal dehidroksilasyonları sonucu (250-1150°C) aktif alümina oluşmaktadır. Aktif alümina ismi Alcoa şirketi tarafından verilmiştir. Bugün bu isim, hidroksillerde kimyasal bağlı suyu ortadan kaldıran, poroz yapıya sahip ve termal dehidrasyon ile elde edilen tüm alüminalara verilen isimdir [13].

Aktif alüminalar, adsorbsiyon ve kataliz işlemlerinde giderek artan kullanıma sahiptir ki bu kullanım şeklinde aktif alüminanın büyük yüzey alanı, poroz yapısı ve

özel yüzey kimyası büyük rol oynamaktadır. Alüminyum hidroksitlerin kontrollü olarak ısıtılıp bünyesindeki suyun büyük bölümü alınarak aktif alümina elde edilmektedir. Kristal yapıları, düşük sıcaklıklarda (250-900°C), χ (çi), η (eta), γ (gama), ρ (ro), yüksek sıcaklıklarda (900-1150°C), δ (delta), κ (kapa), θ (teta) alüminadır. Bu iki sıcaklık aralığı genel olarak geçiş alüminaları olarak bilinen yapıları oluştururlar. Bugün tüm geçiş serileri aktif alümina olarak adlandırılmaktadır. X ışını difraksiyonu (XRD), γ ve η fazlarını eğer aynı anda mevcutlarsa ayırt edememektedir, bu yüzden genellikle γ/η yani gama/eta fazı olarak adlandırılırlar [13].

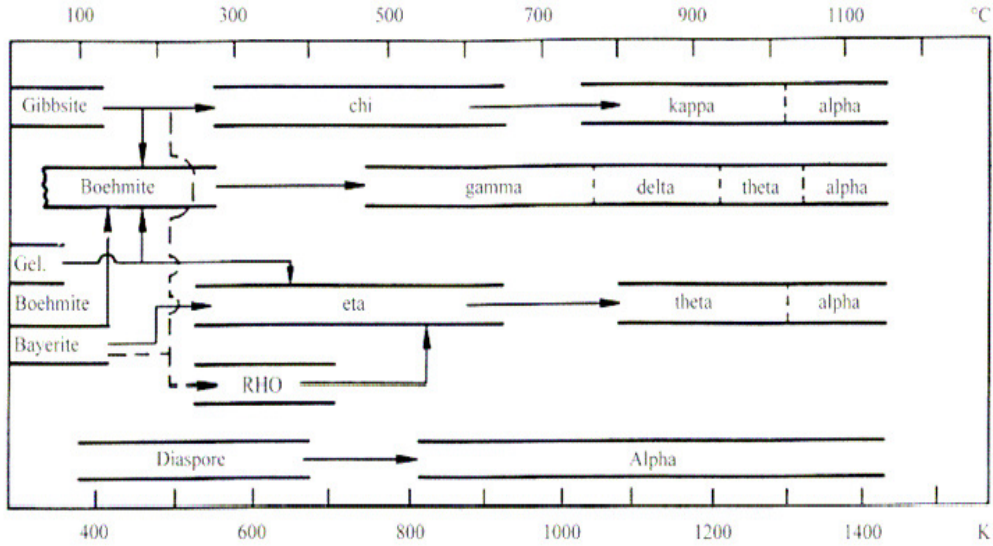
Korund, emary, safir ve ruby (yakut) alüminanın doğada bulunan saf halidir. Hepsi temel olarak Al_2O_3 'ün α allotroplarındır. Korund minerallerinin içerisinde Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 ve Cr_2O_3 gibi safsızlıklar bulunur [9]. α - Al_2O_3 hegzagonal-rombohedral yapıda kristalleşir. Latis oksijen anyonları hegzagonal sıkı paket düzende alüminyum katyonları ise oktahedral arayer boşlukların üçte ikisini doldurur. Yapının modeli Şekil 3.2'de verilmiştir. Boş yerler birim hücrenin köşelerini (rombohedral) tanımlamak için kullanılır [11].



Şekil 2.2 : a) α - Al_2O_3 'nın yapısı (beyaz renkli daire oksijen, gri alüminyum),
b) α - Al_2O_3 'nın bazal düzlemi (büyük açık daireler oksijen, küçük dolu alüminyum, küçük açık daireler oktahedral boşlukları göstermektedir)[11].

Şekil 2.3'te çeşitli başlangıç hidroksitlerinin sıcaklığa göre çi, gama, delta, kapa, eta, ve teta alümina fazları ile α - Al_2O_3 (korundum)'ya dönüşümü görülmektedir. Bu

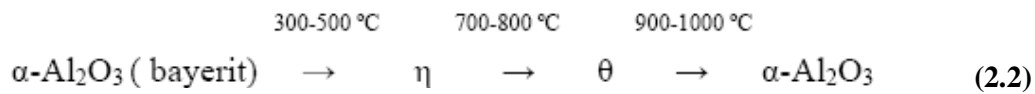
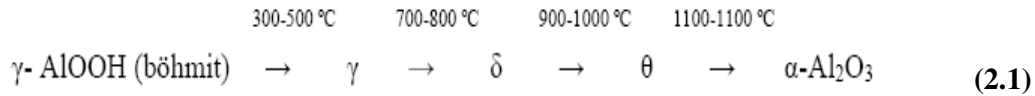
dönüşümler alüminyum hidroksitlere ısı verilerek oluşturulmaktadır. Burada da görüldüğü gibi tüm geçiş alüminalleri gibsitinden elde edilebilmektedir. Örneğin, yalnızca gibsitin termal dehidroksilasyonu sonucu χ (çi), alümina oluşmaktadır ve artan sıcaklıkla kapa ve alfa alümina elde edilmektedir, ancak gibsitin vakum altında hızlı ısıtılmasıyla da ro alümina elde edilebilmektedir (302-427°C) [13].



Şekil 2.3 : Alüminyum hidroksitlerin termal değişimleri [13].

Alüminyum oksidin birçok polimorfik türü vardır. Bunların kararlı son ürünü α - Al_2O_3 'dür. Herhangi bir alüminyum trihidroksit ya da oksihidroksitin ısıtılmasıyla oluşabilecek geçiş ve son ürün alüminaller sıcaklığa bağlı olarak özellikleri ise Çizelge 2.3'te verilmiştir [11].

Denklem 2.1 ve 2.2'de böhmit ve bayeritten α - Al_2O_3 geçiş sıcaklıkları ve alümina fazları verilmiştir [10].



Çizelge 2.3 : Korund ve geçiş alüminaların yapısal özellikleri [11].

Form	Kristal sistem	Birim latis uzunluğu, nm			Açı	Yoğunluk, gr/cm ³
		a	b	c		
Korund, α	Hegzagonal	0,4758	---	1,2991	---	3,98
Gama, γ	Tetragonal	0,562	0,780			
Delta, δ	Ortorombik	0,425	1,275	1,021	---	3,2
	Tetragonal	0,790	---	2,31	---	---
Eta, η	Kübik	0,790	---	---	---	2,5-3,6
	Monoklinik	1,124	0,572	1,174	103° 20'	3,56
Chi, χ	Kübik	0,795	---	---	---	3,0
	Hegzagonal	0,556	---	1,344	---	---
Kapa, κ	Hegzagonal	9,71	---	0,1786	---	3,1-3,3
	Hegzagonal	9,70	---	0,1786	---	---

2.2.4 Alüminanın kullanım alanları

Alüminanın % 90'dan fazlası alüminyum metali üretiminde, geri kalan kısmı da aşındırıcı, refrakter ve kimyasal maddelerin yapımında kullanılmaktadır. Burada kullanılan alüminada yüksek saflık aranır [9]. Alümina, aşınmaya karşı dirençli oluşu, sertliği ve mekanik dayanım nedeni ile öğütücü değirmenlerin bilyelerinde, tekstil endüstrisinde kesici takımlarda kullanılmaktadır. Ayrıca bu özellikleriyle merkezi ısıtma sistemlerinin sirkülasyon pompalarının yataklarında, otomobillerin soğuma sistemlerinde, zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır [9]. Alümina seramiklerden en iyi bilinen askeri uygulaması ise hafif balistik panel yüzeylerinin balistik dayanımını artırmak için alümina seramik plakalar ile kaplanmasıdır [6]. Alüminadan poroz ve yoğun ürünler yapılır. Poroz ürünler genellikle ergimiş alüminadan yapılır. Yeniden kristalleşmiş poroz olmayan alümina, ergimiş alüminadan daha saftır. Saf alümina, tamamen saydam olarak bazı cihazlarda kullanılmaktadır. Bunların dışında bio malzeme olarak eklem ve diş protezlerinde de aynı özelliklerinden yararlanılmaktadır [9].

Bu malzemeler, 1900 °C'ye kadar çıkan yüksek sıcaklık fırınlarının astarı olarak kullanılır. Yüksek saflığı ve aşınmaya karşı direnci nedeniyle iplik mekiklerinde, sprey nozullarında kullanılır [9].

Elektronik sanayinde her yıl substrat malzeme olarak milyonlarca alümina parça üretilmektedir. Bujiler de yalıtım malzemesi olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Termokupl tüpleri kaynak uçları, nükleer santrallerde parçacık hızlandırıcı vakum odaları alüminanın kullanım alanları arasındadır [9].

2.3 Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür en çok kullanılan yapısal seramiklerden bir tanesidir. 1970'li yıllardan beri birçok yeni uygulamaları bulunmuştur. Sahip olduğu birçok özelliikle, karmaşık mühendislik sekilerinde, silisyum karbür, tungsten karbür yerine çekici bir aşınma direnci uygulayıcısı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Silisyum nitrürle kıyaslandığı zaman, silisyum karbürü elde etmek için kullanılan hammaddeler daha ucuzdur ve sonuç olarak elde edilen ürünlerdeki maliyetler tungsten karbürden düşük olduğu için rekabet koşulları yüksektir [14].

Silisyum karbür refrakter uygulamalarındaki özellikleriyle iyi bilinmektedir. Mükemmel bir termal iletkenliğe ve düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Çizelge 2.4'te silisyum karbürün genel özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 2.4 : Silisyum karbürün tipik özellikleri [15].

Özellikler	Değerler
Yoğunluk, gr/cm ³	3.1-3.22
Silisyum karbür içeriği, %	97.80
Karbon içeriği, %	0.20-0.80
Renk	Siyah
Eğme mukavemeti, Mpa: Oda sıcaklığında 800 °C'de	400-410 400-410
Sertlik, kg/mm ² , Vickers	3100

Bu özellikler sonucunda muazzam bir termal şok dayanımı sergiler. Termal iletkenlik kristal yapıda çözünen safsızlıkların varlığından etkilenir Yüksek saflıkta ticari silisyum karbür elde etmek zordur; çünkü sinterleme için eklenen

safsızlıklar veya reaksiyon bağlamada kullanılan silisyumda bulunan safsızlıklar bunu engeller.

Sinterlenmiş silisyum karbür, seramik malzemeler içerisinde en dayanıklı olanlardan birisidir. Mukavemetinin sınırlanması kristalit aglomeratlara, aşırı büyümeye, uzamış tanelere ve porozite gibi farklı hatalara bağlıdır.

Silisyum karbürün ticarileşmesini sağlamış özelliklerinden birisi sertliğidir. Acheson silisyum karbürün sertliğini keşfettiği zaman elması dahi kesebilecek bir yetenekten bahsetmişti. Bu yetersiz bir açıklama dahi olsa silisyum karbür en etkili aşındırıcılardan birisidir. Bor karbür kadar sert değildir ancak silisyum karbür kabuksal bir bileşim sergileyerek malzeme sıyırma işlemlerinde etkili olmaktadır. Silisyum karbürün sertliği kristalografik yönlere, var olan safsızlıklara ve parlatılmış yüzeyler gibi farklı durumlara bağlı olarak değişir. Ölçüm ortamı dahi sertliği etkileyebilir[15].

Silisyum karbürün değerli bir mücevher taş olması gerektiği söylenmektedir. Çok geniş bir renk dağılımında; renksiz (saf α /hegzagonal), sarı (β /kübik), yeşil (azot veya fosfor daldırılmış), mavi (alüminyum daldırılmış), kahverengi (bor daldırılmış) ve siyah (yoğun bir şekilde alüminyum daldırılmış) hazırlanabilir. Silisyum karbür manyetik özellik göstermemektedir [16].

2.3.1 Silisyum karbürün özellikleri

Karbür bileşikler sınıfında yer alan silisyum karbür 40,1 molekül ağırlığına, 3,2 g/cm^3 yoğunluğa, 2500 °C bozunma sıcaklığına, 27,4 GPa sertliğe (mohs skalasına 9,5-9,75), 126W/m^oK ısı iletkenliğe ve 5.10⁻⁶/°C ısı genleşme, düşük özgül dirence (0,1.10⁻⁶ Ωcm) ve kullanılabilir bir elektriksel dirence sahiptir [17,18,19]. Genel olarak SiC kimyasallara karşı tepkimesizlerdir. Bazik, asidik ve tuzlu çözeltilere karşı konsantrasyona karşı bağı olmaksızın hiç etkilenmezler. Organik çözeltilerde SiC'ü etkilemez [19]. Saf SiC renksiz (saf α /hegzogonal), sarı (β /kübik), yeşil (azot veya fosfor daldırılmış), mavi (alüminyum daldırılmış), kahverengi (bor daldırılmış) ve siyah (yoğun bir şekilde alüminyum daldırılmış) olarak hazırlanmaktadır [9,19]. Endüstride kimyasal içeriğine göre (%) SiC'ün sınıflandırılması çizelge 2.5'te verilmiştir [18].

Çizelge 2.5 : Endüstride kimyasal içeriğine göre (%) SiC'ün sınıflandırılması [20].

	Yeşil SiC 98		Siyah SiC 97		SiC 90 %	
Min/Maks.	Genel	Min/Maks	Genel		Min/Maks	Genel
SiC	98	99,2	97	97,8	90	91
Serbest C	0,25	0,12	0,3	0,18	3	1,8
Fe ₂ O ₃	0,6	0,4	1,2	0,68	2,5	2,0

SiC, bu özellikler sonucunda muazzam bir termal şok dayanımı sergiler. Termal iletkenlik kristal yapıda çözünen safsızlıkların varlığından etkilenir. Yüksek saflıkta ticari silisyum karbür elde etmek zordur, çünkü sinterleme için eklenen safsızlıklar veya reaksiyon bağlamada kullanılan silisyumda bulunan safsızlıklar bunu engeller. Sinterlenmiş silisyum karbür, seramik malzemeler içerisinde en dayanıklı olanlardan birisidir. Mukavemetin sınırlanması kristalit aglomeratlara, aşırı büyümeye, uzamış tanelere ve porozite gibi hatalara bağlıdır [14].

Çizelge 2.6 : Silisyum karbür malzemelerin fiziksel özellikleri [14].

SiC malzeme tipi	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (Vickers)	Young Modülü	Genleşme Katsayısı 30-1500°C (10 ⁻⁶ /K)	600 °C'de Termal İletkenlik (W/mK)	Eğme Muk. 20 °C (MPa)	Eğme Muk. 1400 °C (Mpa)
K-SiC	2,55	-	100	5,8	16	30	20
R-SiC	2,60	-	240	5,0	28	100	100
RB-SiC por.	2,60	-	250	5,0	25	250	250
RB-SiC yoğ.	3,18	-	280	4,2	-	350	-
Si-SiC	3,12	-	400	4,3	60	350	200
S-SiC	3,15	-	410	4,9	50	430	450
HP-SiC	3,20	-	450	4,5	55	640	650
HIP-SiC	3,21	3100	450	4,5	75	640	610
HIPS-SiC	3,19	-	430	4,8	50	450	450

K; kristalize, R; rekristalize, RB; Reaksiyon bağlı, S; sinter, HP; sıcak pres, HIP; sıcak izostatik pres, HIPS; sıcak izostatik presle sinterleme

Silisyum karbür çok sert aşındırıcı bir malzemedir. Silisyum karbür, 2500 °C'de erimeden zengin silikon buharı ve karbon kalıntısına dönüşür. Bu malzeme çok yüksek sürünme mukavemetine sahiptir. Değişik kristal yapılarda olabilen silisyum karbürün en çok kullanılanı β -SiC'dir [17].

Sinterlenmiş silisyum karbür seramik malzemeler içerisinde en dayanıklı olanlardan biridir. Mukavemetinin sınırlanması kristalit aglomeratlara, aşırı büyüme, uzamış taneler ve porozite gibi farklı hatalara bağlıdır. Silisyum karbür manyetik özellik göstermemektedir [8].

SiC katkısının mekanik özellikleri ve sinterleşmeyi olumsuz etkilediği, daha gözenekli ürünler oluşmasına neden olduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir. Amaç gözenekli durum elde etmek olduğu durumlarda SiC'ün katılabileceği anlaşılmaktadır. SiC'ün yüksek sıcaklıklarda oksijenli ortamlarda korozyona uğradığı da bilinmektedir [5].

Silisyum karbürün değerli bir mücevher taş olması gerektiği söylenmektedir. Çok geniş bir renk dağılımında; renksiz (saf a/hegzogonal), sarı (p/kübik), yeşil (azot veya fosfor daldırılmış), mavi (alüminyum daldırılmış), kahverengi (bor daldırılmış) ve siyah (yoğun bir şekilde alüminyum daldırılmış) hazırlanabilir. Silisyum karbür manyetik özellik göstermemektedir [3].

2.3.2 Silisyum karbürün kristal yapısı

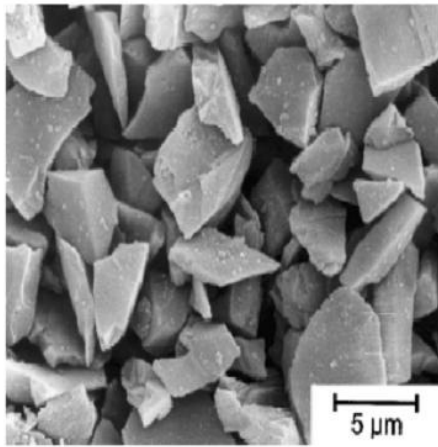
Sentetik bir malzeme olan silisyum karbür iki farklı kristal yapıya sahiptir. Bu kristal yapıların biri; 1400-1800 °C'de oluşan " β " formundaki kübik yapı, diğeri ise; 2000 °C'de oluşan " α " formundaki hegzogonal kristal yapıdır [2].

Bu yapılarda görülen farklılıklar aslında kümeleşmede görülen dizilmelerdir. Bütün silisyum karbür yapıları hegzogonal çift katmanlardan meydana gelmiştir ve burada bir hegzogonal düzlemde bulunan bir katman karbon atomları diğeri bir katmanda bulunan hegzogonal silisyum atomlarının üstüne yerleşmişlerdir. Bu silisyum karbür yapısında her karbon atomu 4 silisyum atomu tarafından tetrahedral biçimde çevrelenmiş ve her silisyum atomu ise 4 karbon atomu tarafından yine tetrahedral biçimde çevrelenmiştir [14].

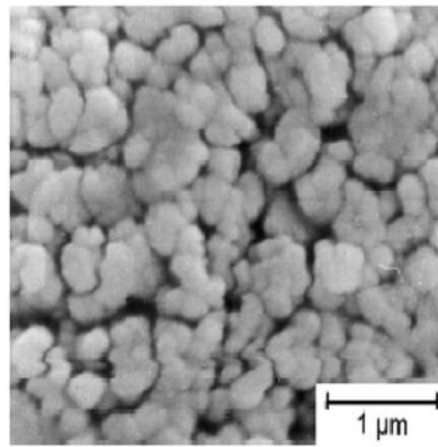
Kristal simetrideki farklılıklar hegzogonal katmanlardaki farklı dizilmeler sonucu ortaya çıkmaktadır. Kübik silisyum karbürde her çift katman diğer alt katmandakiyle değişerek dizilirler.

Si ve C valans seviyelerinin yarı dolu olmasından dolayı güçlü kovalent bağ yaparlar. Her iki element de hibrit durumuna ve sp^3 hibritlerine kolay geçmektedir, (her ikisinin de yarı dolu olduğu için) böylece üç boyutlu kovalent bağ oluşur. SiC'ün karakteristik yapı elementi bir düzgün dörtyüzlüdür. Her elementin her atomu, diğer elementin dört atomuyla çevrilmiştir. Dörtyüzlü her üç Si ve üç C atomu (111) ve (0001)'e paralel katmanlar şeklinde duran açılanmış altıgenler oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. Si ve C atomları baştan başa birbirini takip eder ve katmanlar en yoğun bilye dizilişinin kübik ya da hegzogonal oluşuna göre ABC veya AB ritimlerinde tekrarlanabilir. Kristal şekline bağlı olarak kübik elmas yapısı ve hegzogonal yapıları meydana gelir. Şekil 2.2 birbirine çok yakın olan bu iki yapıyı göstermektedir. SiC'ün β formu hegzogonal vurtzit yapıdadır. Beta-formu kübik ham sfalerit yapısındadır [21, 22, 3].

Silisyum karbürün en yaygın kullanımı ve mühendislik uygulamalarında tavsiye edileni; "3C" kübik yapılı β -SiC'dür. 4H, 6H, 15R gibi diğer tipleri ise; α -SiC kristal yapıdadırlar [2].

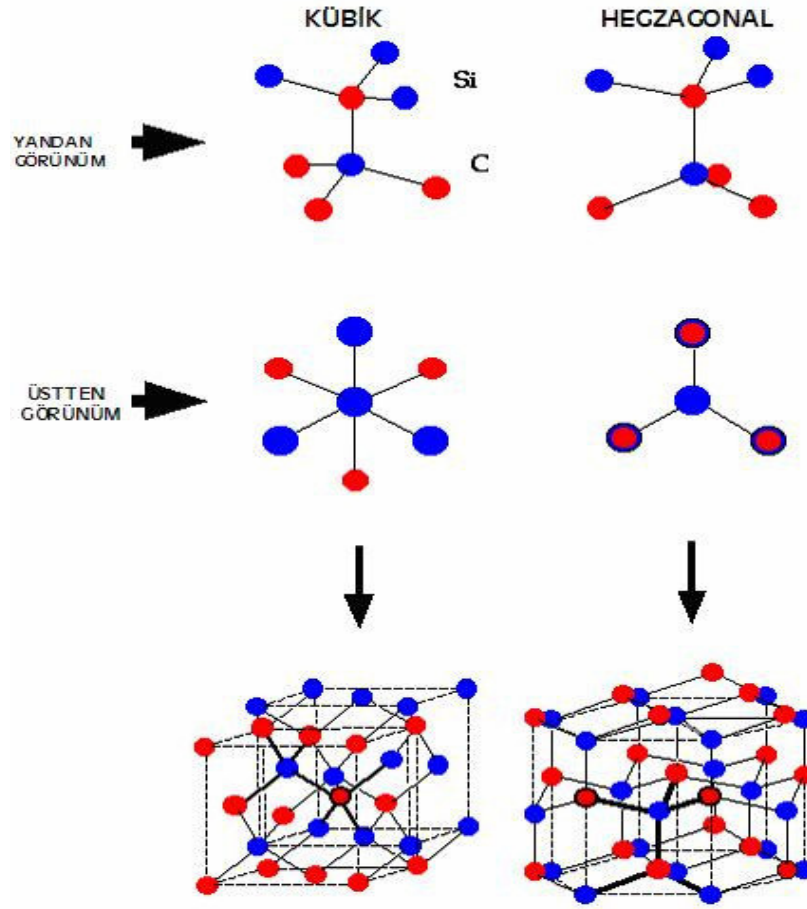


3 nm boyutundaki SiC tozunun SEM görüntüsü



0,51 nm boyutundaki SiC tozunun SEM görüntüsü

Şekil 2.4 : SiC'ün SEM görüntüsü [16].



Şekil 2.5 : Kübik ve hegzogonal SiC yapısı.

2.3.3 Silisyum karbürün üretim prosesi

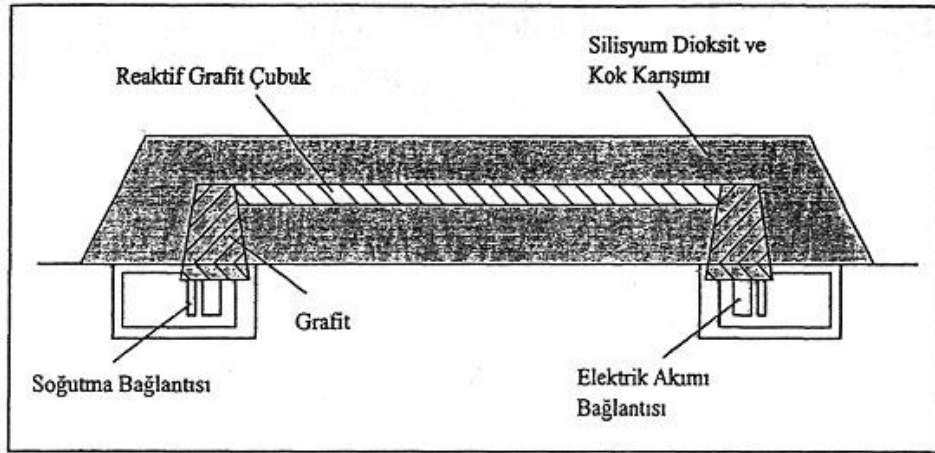
En yaygın olarak kullanılan silisyum karbür üretim prosesi, Acheson prosesi olarak isimlendirilen prosestir. Bu proses silisyum karbür üretim tarihinin en eski olanıdır ve adına tasarımcısı olan ACHESON'dan almıştır [17]. SiC'ün Acheson Prosesi ile üretiminde; grafit elektrot silika ve kok ile çevrelenir, ısıtılır, elde edilen kristal blok öğütülür, istenilen saflığa ulaştırılır (silis giderme işlemi hidroflorik asitle yıkama işlemi ile yapılır) ve sınıflandırılır [8,19]. Modern bir fırının kapasitesi hammadde bazında 400 tona kadar olabilmektedir. Böylece bir fırın 40 saatlik bir çalışmadan sonra 50 ton teknik silisyum karbür üretmektedir [19]. 2500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkarılır. 2500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda SiC ergimez grafit ile silisyuma bozunur [18, 19].

Bu proseste silika, karbon ve genel tuz (Misal: %50 Silika + %40 kok + %7 silis tozu + %3 genel tuz) karışımı, Şekil 2.6'da görülen elektrikli fırında 2700 °C'ye ulaşmaya kadar ısıtılır ve kademeli olarak soğutulur. Denklem 2.3'te verilen kimyasal reaksiyonun neticesinde SiC elde edilir [17].

Silisyum karbür 19. yüzyılın sonunda elektrikli fırında geliştirilen bir proses ile üretilmiştir. Yüksek saflıkta silika tozu, düşük sülfür içerikli petrol koku ve 23,8 Mj/kg enerji bu prosesin ana bileşenidir. Hammadde bileşimi, merkezindeki grafit çekirdeğin etrafına yerleştirilmiştir. Bu grafit çekirdekten geçen akım maksimum 2700 °C'larda sıcaklık oluşturur [17].



Dönüştürücü ve fırın büyüklüğüne bağlı olarak 2 – 20 gün süren denklemdeki (2.3) silika ile reaksiyonu, silisyum karbür netice verir. Reaksiyon 0,4 – 0,45 kg silisyum karbür için 2,3 - 3,2 kg gerekir. En yüksek saflıktaki silisyum karbür, çekirdeğe (elektroda) en yakın mesafe bulunur. Dış tabakada ise; sonraki mesafede bulunur ve sonraki proseslerde kullanılmak üzere ayrılır. Bu dış tabaka daha sonra öğütülüp elenerek çeşitli amaçlarda kullanılmak üzere gruplandırılır [17].



Şekil 2.6 : "Acheson" prosesinde kullanılan fırının genel görünümü [23].

2.3.4 Silisyum karbürün şekillendirme ve sinterlenmesi

Silisyum Karbür, erimeden kimyasal bozunmaya uğradığı ve kovalent bağa sahip olduğu için, basınçsız ve katkısız konvansiyonel metotlarla sinterlenmesi oldukça

güç bir seramik malzemedir. Procheska düşük oksijen içerikli mikron altı β -Silisyum Karbürü, %0,5 bor ve %1 karbon katkılarıyla 1950-2100 °C'de vakum ve inert atmosferde, %96-99 yoğunluğa sinterlemiştir [2, 21].

Silisyum karbürün yaygın olarak kullanılanları, silikonize silisyum karbür (SiSiC) ve basınçsız sinterlenmiş silisyum karbürdür. Silisyum karbür seramikleri genel olarak dört ana grupta sınıflandırılırlar. Bunlar;

- 1.Reaksiyonla sinterlenmiş (Silikonize) SiC,
- 2.Sıcak preslenmiş SiC,
- 3.Sıcak izostatik preslenmiş SiC,
- 4.Basınçsız sinterlenmiş SiC'dir.

Silikonize SiC üretiminde, SiC ve karbon karışımından numune hazırlanır. Karbon içeren bünyeye sinterleme sıcaklığında silikon emdirilir. Numune bünyesinde serbest olarak bulunan karbon, "Si" ile tepkimeye reaksiyona girerek, silisyum karbürü netice verir.

Silisyum karbürün basınçla sinterlenmişinde; mikron altı SiC tozları, %1'lik katkı maddeleri (Al+karbon veya bor+karbon) ile, inert atmosferde % 95-99'luk yoğunluğa sinterleşmektedir.

Silisyum karbürün basınçla sinterlenmesinde; küçük taneli toz kullanımı ve tozun başlangıçtaki kimyasal yapısı önemli bir unsurdur. Bünyeye bor ilavesi ise; hacimsel difüzyonu hızlandırır. Yapıdaki düzensiz karbon dağılımı ve düzensiz tane büyümesinden kaçınılması gerekmektedir. Kullanılan tozun β -SiC kristal yapıda olması halinde, sinterleme sonucunda bazı kristallerin α -SiC'e dönüştüğü tespit edilmiştir [17].

Ticari silisyum karbür ürünleri farklı kullanım koşullarına göre üç farklı şekilde şekillendirilirler. Birinci yöntemde silisyum karbür tozu reçine, cam, silisyum nitür veya metal gibi bir ikinci malzemeyle karıştırılır. Daha sonra bu kompozit malzeme ikinci fazın yeni bir bağ oluşturması için işleme tabi tutulur.

Silisyum karbür tozu karbon veya silisyum metal tozlarıyla karıştırılarak reaksiyon bağları oluşturulur. Karbon silisyum buharıyla reaksiyona girerek silisyum karbür bağı oluşturur veya silisyum metal tozu azotla reaksiyona girerek silisyum nitrid bağı oluşturabilir. Her iki durumda da bir reaksiyon bağı oluşmaktadır. 1960'lı yılların başlarında çok ince silisyum karbür tozların (<1µm) bor karbür katkısıyla yoğunlaştırılıp sinterlenebileceğini bulmuştu. 1970'li yılların ortalarında ise Prochaska ve arkadaşları prosesi optimize ederek yüksek yoğunluklu sinterlenmiş silisyum karbür elde etmişlerdir.

Her iki işlemde de avantajlar olduğu kadar sınırlamalar da bulunmaktadır. İkinci fazla meydana gelen bağlar birçok aşındırıcı veya çoğu refrakter uygulamalar için standarttır. Bağ fazlarının özelliklerine rağmen ürünler uygulamalarda sınırlı kalmışlardır. Buna rağmen bu tür ürünler en ekonomik olanlardır.

Kendinden bağlı silisyum karbür genellikle boşluklarında bir miktar serbest reaksiyona girmemiş silisyum metali içerir. Bu metal silisyumun ergime noktasının (1400 °C) üzerindeki sıcaklıklarda erir. Reaksiyon bağı oluşuktan sonra vakum ortamında tekrar pişirilerek veya karbon fazlası ortamda giderilebilir. Kendinden bağlı silisyum karbür sinterlenmiş malzemeye oranla daha iyi oksidasyon direnci sergiler. Sinterlenmiş silisyum karbür, özellikle tane büyüme olayını ve diğer mukavemet sınırlayıcı özelliklerini önlemek için özenle hazırlanmış hali, oksidasyonun sınırlayıcı faktör olmadığı durumlarda mekaniksel özellikler için bir seçenektir. Sinterlenmiş silisyum karbür, bor ve serbest karbon içeriğinden dolayı reaksiyona bağlı malzemedan düşük oksidasyon direncine sahiptir. Serbest karbon bünyede oksidasyona ve gözeneklerin gelişmesine yol açar. Oksidasyon sırasında bor, borik asit üretir ve bu da koruyucu silika katmanının akışkanlığını artırır ve dolayısıyla oksidasyon direnci düşer [2, 8, 24].

2.3.5 Silisyum karbürün kullanım alanları

Silisyum karbür, ileri teknoloji malzemelerine ihtiyaç duyulan çok yerlerde kullanılmakla birlikte, genel olarak saflık seviyelerine göre; metalürjik, abrazif ve sinter amaçlı olmak üzere, üç ana grupta sınıflandırılmaktadırlar [25].

Yüksek saflıktaki (yeşil renk) silisyum karbür, mühendislik seramiklerde sinter amaçlı kullanılırken, saflığın % 97.5 veya daha düşük olması durumunda, söz

konusu malzeme abrazif ve refrakter amaçlı olarak kullanılırlar. Saflığın % 90'ın altına düşmesi durumunda ise, metalürjik uygulamalarda kullanılırlar [25].

Yüksek performans seramiklerinde, en çok kullanılan reaksiyon sinterlenmiş ve sinterlenmiş silisyum karbürdür. Bu tür ticari uygulamalarda sertlik, kimyasal saflık ve aşınma dirençli karakteristiklerinden dolayı kullanılır.

Bu uygulamalardan birçoğu, kimyasal işlem endüstrisi için kaplamalar ve valfler, kum boruları için memeler, hidrosiklonlar, lens kalıpları, roket memeleri, sprej kurutma için aşınma plakalarıdır.

Aşınma, erozyon dirençli silisyum karbür uygulamaları ise havacılık endüstrisinde pompa, taşıma, yağ, yakıt deposu, pompa malzemeleri ve kalıplarda kullanılır. Isı dayanımından dolayı uzay teknolojisinde de yüksek sıcaklık roket meme bağlantılarında, ısı değişim tüplerinde, difüzyon fırını parçalarında kullanılır.

Ayrıca seramik motorlarda ve turboşarj kısımlarda silisyum karbür uygulamaları deneme aşamasındadır. Türbin motorlarında uygulamaları artmaktadır. Silisyum karbür bilgisayar ciplerinde de kullanılır.

Yüksek termal iletkenliklerinden dolayı uzay teknolojisinde lazer aynaları olarak kullanılmakta ve savunma sanayinde çalışmalar yapılmaktadır. Silisyum karbürün balistik etki dayanımı düşük olmasına rağmen, seramik zırh malzemesi olarak da uygulamaları mevcuttur [25, 15].

2.4 Sinterleme

Sinterleme, preslenmiş malzemelere uygulanan ısı bir operasyon olarak tanımlanacağı gibi, presleme esnasında şekillendirilen parçaya uygulanan bir işlem olarak da tanımlanabilmektedir [26].

Sinterlemede amaç; difüzyon, basınç ve ısının tesiriyle, cismin bünyesinde mevcut olan boşluğun ortadan kaldırılmasıdır. Sinterlenen malzemenin üstün özelliklere sahip olabilmesi için, bünyesinde bulunan boşluğun, olabildiğince sıfıra yaklaşması gerekmektedir [26]. Sinterleme mekanizması, tamamen ısı ve kütle taşınım olayına dayanmaktadır. Kütle taşınımını kolaylaştırmak için mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklarda çalışılmalıdır.

Sinterlenmeyi sağlayan itici güç; yüksek sıcaklıklarda yüzey enerjisinde meydana gelen azalmadır. Yüzey enerjisinde azalma meydana geldikçe difüzyon hızı artar ve özellikle karşılıklı atomların difüzyonu şeklinde olmak üzere, birbirleriyle temas halinde olan tozlar arasında bir boyun bölgesi oluşur ve tozlar birbirine nüfuz eder.

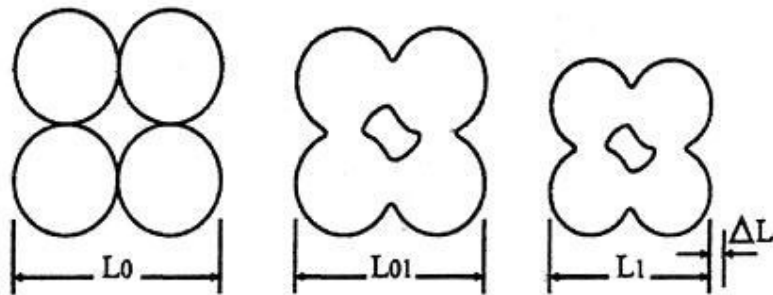
Kingery, Berg ve Ashfay, taneler arasında meydana gelen bu kütle taşınımının, altı bölgede oluştuğunu belirtmektedirler [26]. Bu bölgeler;

- 1- Yüzey Difüzyonu,
- 2- Yüzeyden Kafese Difüzyon,
- 3- Buhar Taşımını,
- 4- Temas Noktası Difüzyonu,
- 5- Temas Noktasından Kafese Doğru Difüzyon,
- 6- Dislokasyon veya diğer iç etkilerin boyun kısmında oluşturacağı değişim olup,

sinterleme esnasında meydana gelen difüzyonun tesiriyle, taneler arasında meydana gelen büzülme ile cismin iç yapısında bulunan boşluklar, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi hem küçülür hem de şekil değiştirir [26].

Bunlar;

- a-) Boşluk morfolojisinin değişmesi,
- b-) Boşluk boyutlarının değişmesi,
- c-) Tane boyutlarının büyümesi (Grain Growth) şeklinde özetlenmiştir [26, 27].



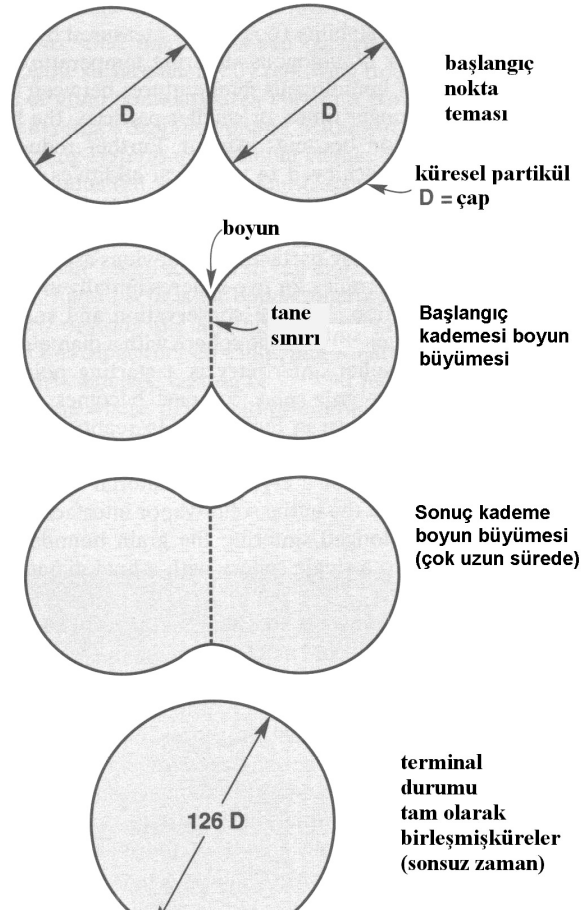
Şekil 2.7 : Sinterlemede taneler arasında meydana gelen büzülme [25].

Sinterleme, malzemenin cinsine, numunenin şekline ve büyüklüğüne bağlı olarak değişik metotlarla gerçekleştirilebilir. Sinterleme metodları, genel olarak; katı, sıvı ve reaksiyon sinterlemesi olarak üç grupta toplanmıştır [26, 27].

2.4.1 Katı hal sinterlemesi

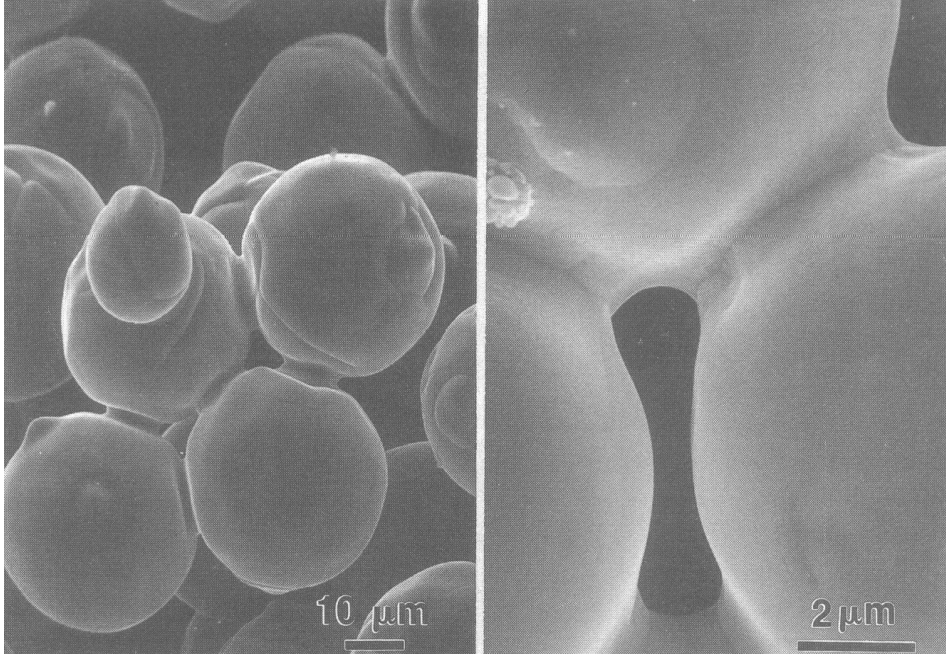
Katı faz sinterlemesinde bütün prensip, yayılma esasına dayanmaktadır. Bu proses için gerekli olan güç, boyun bölgesi ile tozun yüzeyi arasında meydana gelen serbest enerji veya kimyasal potansiyel farkı sonucunda ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen difüzyonun etkisiyle oluşumları ve değişimleri Şekil 2.8 göstermektedir. Tozların birbirine difüzyonu sonucu oluşan boyun bölgesindeki buhar basıncı düşük olmakta ve bu bölgeye doğru yayınma hızlanmaktadır.

İki Küre Sinterleme Modeli



Şekil 2.8 : Sinterleme sırasında partiküller arası bağ oluşumunun iki küre modeliyle açıklanması.

Boyun oluşmaya başladıktan ve ilerledikten sonra yapı, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi bağlardan oluşan bir ağ yapısına erişir ve mukavemet kazanır. Gerçekte her partikül üzerinde birçok temas noktası mevcuttur ve bu temas noktalarının tümü genişleyerek sonunda izole porları oluşturur. Kristalin bir malzeme için her temas noktasında bir tane sınırı büyüyerek daha önce orada var olan katı-buhar ara yüzeyinin yerini alır. İki küre teorisi için uzun süre devam eden sinterlemede tane sınırları ötelenir ve taneler birleşerek çapı orijinal çapın $2^{1/3}$ katı olan bir küre meydana getirir [28, 29].



Şekil 2.9 : Sinterlemeye bağlı olarak oluşan boyun teşekkülüne ait SEM fotoğrafı.

Sinterlemeyi açıklamak için çeşitli adımlar ve kütle taşınım mekanizmaları ortaya konmuştur. Bu taşınım mekanizmaları kütle hareketinin izlediği yolu tayin eder. Katı hal sinterlemesi için izlenen yol; yüzey difüzyonu, hacim difüzyonu, tane sınırı difüzyonu, viskoz akış, plastik akış ya da katı yüzeyinden buhar taşınımı şeklinde olabilir. Bu olası yollardan herhangi biri kütle transferi ile bir araya geldiğinde sinterleme esnasında çeşitli geometrik kademeler ortaya çıkar. İlk kademe kohesif bağların zayıf olduğu, partiküllerin birbirleriyle temas etmesi sonucunda temas noktalarında meydana gelir. Sinterlemenin ilk kademesi genellikle ısıtma esnasında ortaya çıkar ve partiküller arası boyunun ani büyümesi ile karakterize edilir. Burada belirgin bir boyun büyümesi söz konusudur ancak oluşan boyunun hacmi küçüktür ve bir boyun oluşumu için gerekli kütle de azdır. Sinterlemenin bir sonraki aşamasında por yapısı daha düzgün bir hal alır ve birbirine bağlı, silindiriğe yakın bir

biçim kazanır. Yüzey alanında ve eğrilikte meydana gelen azalma yavaş sinterleşmeye neden olur. Genel olarak tane büyümesi sinterlemenin ara kademesinin sonlarına doğru meydana gelir ve daha az tane ile daha büyük ortalama tane boyutu verir [28, 29].

Porozite yaklaşık %8'e ulaştığında açık por ağ yapısı geometrik olarak dengesiz hale gelir. Buna neden olan olay porların büzülen bir çapa oranla daha uzun olmasıdır. Bu olay ince akmakta olan suyun aniden engellenmesiyle bağımsız damlacıklara dönüşmesine benzemektedir. Geometrideki bu değişim sonucunda silindirik porlar merceksi ya da küresel bir yapı halini alır ancak bu geometri tane büyümesini yavaşlatmada yeterince etkili değildir. İzole porların görünmesi sinterleme prosesinin sonuna geldiğini ve yoğunlaşmanın yavaşladığını ifade eder. Porların içerisine hapsolan gazlar ulaşılabilecek en yüksek yoğunluğa ulaşmayı engelleyecektir, buna bağlı olarak vakum altında yapılan sinterleme işlemlerinde, malzeme içerisinde porları dolduracak buhar kalmayacağı için yüksek son yoğunluk değerleri elde edilebilir [14].

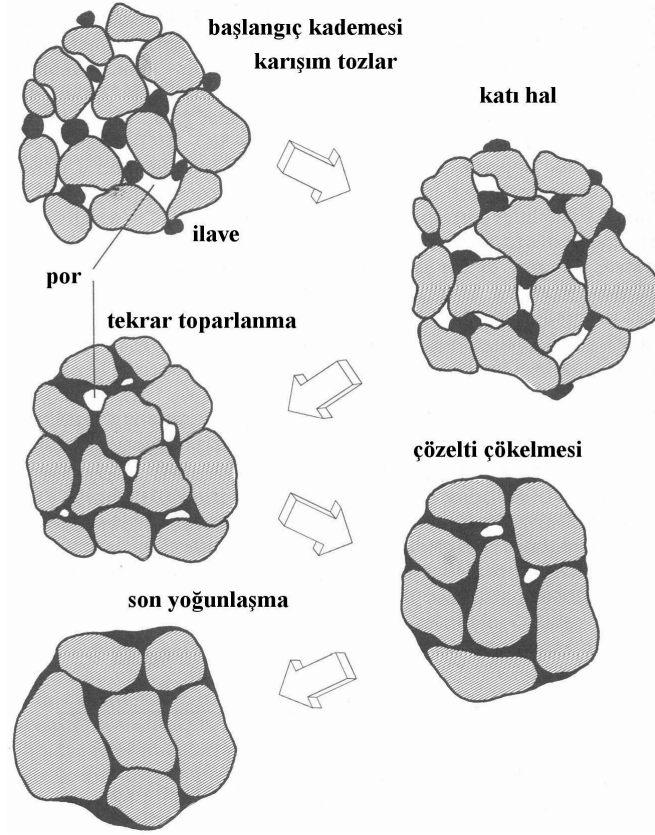
2.4.2 Sıvı faz sinterlemesi

Bu proseste; karışımdaki fazlardan en az birisi sinterleme sıcaklığında sıvılaştığı için elde edilen malzemenin kullanım sıcaklığı sinterleme sıcaklığının altında olmak zorundadır. Sinterleme sıcaklığına erişince, sıvı faz, tozları ıslatır ve tozlar arasındaki ince kanallarda kapiler etkisi meydana gelerek tozların kolayca sinterlenmesi sağlanır. Teknik açıdan bakıldığında, hızlı sinterleme ve basınç gerektirmeden yoğunlaşmanın mümkün olması sebebiyle sıvı faz sinterlemesi oldukça tercih edilen bir sinterleme prosesidir. Oluşan sıvı faz, atomik difüzyonun gelişmesine elverişli olması nedeniyle sinterleme hızını genellikle artırır. Farklı birçok sıvı faz sinterleme biçiminin kullanımı, yaklaşık M.Ö. 4000 tarihine, porselen ve çömlek üretiminin oldukça yaygın biçimde bu yöntemle sinterlenmesine kadar dayanır. Modern sıvı faz sinterleme uygulamalarının gelişimi ile semente karbürler, bronz yataklar ve manyetik alaşımlar 1920'lerde üretilebilmiş, 1930'larda tungsten ağır alaşımları üzerinde yoğunlaşan çalışmalar ile sıvı faz sinterlemesine dair önemli bir teorik temel oluşturulmuştur. Günümüzde porselen dişçilik malzemeleri, kesici takım uçları, otomotiv bağlantı elemanları ve refrakter seramikler gibi birçok malzeme bu teknik ile üretilmektedir [14].

Bu yöntemin kullanımı, bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyonlar zayıf olan sistemler üzerinde yoğunlaşmıştır. Sıvı fazdan gelen yüzey gerilme kuvveti sinterleme hızını belirlemede önemli rol oynar. Bu gibi durumlar için üç temel kavram; sıvı içerisindeki katı çözünürlüğü, sıvının katı tanelerini ıslatması ve sıvı içerisindeki katı faz difüzyonudur. WC-Co sistemi incelendiğinde bu üç koşulun sağlandığı görülür. Semente karbürler için en yaygın kullanılan bağlayıcı metal kobalttır. Tungsten karbürü iyi ıslatması ve çözebilmesi bu seçimin başlıca nedenidir [28, 29]. Prosese ait önemli bir diğer karakteristik de düşük sıcaklıktır. Bu, sinterlenmesi çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleşebilen hatta basınç uygulanması gerektiren malzemelerin, sisteme yapılacak modifikasyonlar ile oluşturulacak sıvı faz sayesinde düşük sıcaklıklarda ekonomik ve daha zahmetsiz olarak sinterlenebilmesini sağlamaktadır.

Birçok durumda sıvının katıyı ıslattığı ve katı içinde çözünürlüğünün mevcut olduğu bilinmektedir. Katıyı ıslatan sıvının meydana getirdiği kapiler kuvvetler, katı partiküllere ait ara yüzey alanlarını indirgeyerek poroziteyi azaltır. Başka bir deyişle, yüzey enerjisinin indirgenmesi yoğunlaşma için itici kuvveti teşkil eder. Sıvılardaki difüzyon hızlarının daha fazla olması nedeniyle, katı hal sinterlemesine kıyasla daha hızlı bir bağlanma ve yoğunlaşma söz konusudur. Ancak sıvılaşmanın yüksek sıcaklıklarda olduğu durumlarda mikro yapıda kontrolsüz bir kabalaşma meydana gelebilmektedir. Sıvı faz sinterlemesi özellikle sinterleme sonucunda yoğunlaşma meydana gelen, W-Ni, WC-Co, Si₃N₄-Y₂O₃, Al₂O₃-SiO₂, TiC-Ni, ve Fe-Cu gibi sistemlerde oldukça geniş biçimde kullanılmaktadır. Katı ve sıvı çözünürlüklerinin düşük olduğu, W-Cu gibi sistemlerde ise katı hal sinterlemesi daha iyi sonuçlar vermektedir [29, 30].

Sıvı faz sinterlemesinde, yüzey enerjilerinin baskın olduğu durumlarda, sinterleme esnasında meydana gelen yoğunlaşma Şekil 2.10'daki gibi meydana gelir.



Şekil 2.10 : Klasik sıvı faz sinterlemesinin kademelerine ait şematik diyagram.

Başlangıçta karışım tozlar sıvının oluşacağı bir sıcaklığa ısıtılır. Isıtma sırasında, mikro yapıda mevcut olan kimyasal konsantrasyon gradyanının da etkisiyle, bir katı hal sinterlenmesi meydana gelir. Yine birçok sistemde katı hal difüzyonu, sıvının ilk oluştuğu ana kadar önemli miktarda yoğunlaşma meydana gelmesine neden olur. Yoğunlaşmanın daha fazla olması bir sonraki adıma yani meydana gelen sıvı miktarına bağlıdır. Bağlayıcı metal sıvı faza geçtikten sonra, sıvı faz sinterlemesi ile yoğunlaşma üç temel kademede meydana gelir: (i) sıvı akışının başladığı ve partiküllerin tekrar düzenlendiği başlangıç kademesi, (ii) daha sık bir paketlenmeyi sağlayan çözelti çökmesinin geliştiği ara kademe ve (iii) yoğunlaşma hızının katı hal sinterlemesi ile eşitlenerek nihai birleşmenin meydana geldiği son kademe. Bu kademe anlayışı içinde sementte karbürlerde yoğunlaşmanın ilk iki kademede meydana gelmektedir. Bu kademeler değişen sıvı miktarına bağlı olarak Şekil 2.11’de görülmektedir. Kompaktlar ısıtma sırasında ham yoğunluklarından katı hal difüzyonu ile yoğunlaşır, sıvı oluşumu ile yeniden düzenlenir ve son olarak tane büyümesine maruz kalır. Sıvı miktarının yüksek olması durumunda yeniden toparlanma sırasında tam yoğunluğa ulaşılabilir. Sıvı miktarının az olduğu

durumlarda ise yoğunlaşma katı iskelet tarafından, sıvı içerisinde katı taşınımı ile gerçekleştirilir ve kalıntı porozite de katı hal difüzyonu ile ortadan kaldırılır. Bunun gerçekleşmediği bir durum sistemde hiç sıvının oluşmaması ve tüm yoğunlaşmanın katı hal sinterlemesiyle gerçekleşmesi ile ortaya çıkar [29, 30].



Şekil 2.11 : Sıvı faz sinterlemesinde yoğunluk ile sıvı faz miktarı arasındaki değişim.

Sıvı oluşumu ile beraber, katı partiküller üzerinde meydana gelen kapiler kuvvetlerin etkisiyle yoğunlaşma miktarında ani bir artış olur. Katı sıvı içinde çözüldükçe tanelerde çekme meydana gelir ve hızlı bir biçimde, sıvının porları doldurmasına izin vererek daha yüksek bir yoğunluğa paketlenir. Islatma özelliği iyi olan sıvılar için katı-sıvı yüzey enerjisi, katı-buhar yüzey enerjisine göre daha düşüktür ve bu da düşük sistem enerjisi anlamına gelir. Tekrar düzenlenme sırasında taneler, kapiler etkiye karşılık olarak viskoz bir özellik gösterir. Porozitenin azalması da bu kompakt viskozitesini arttıran unsurdur. Buna bağlı olarak yoğunlaşma hızında belirgin ve ani bir düşüş meydana gelir. Diğer yandan, gerekli miktarda sıvı oluşması durumunda teorik yoğunluğa ulaşmak mümkündür [29, 30].

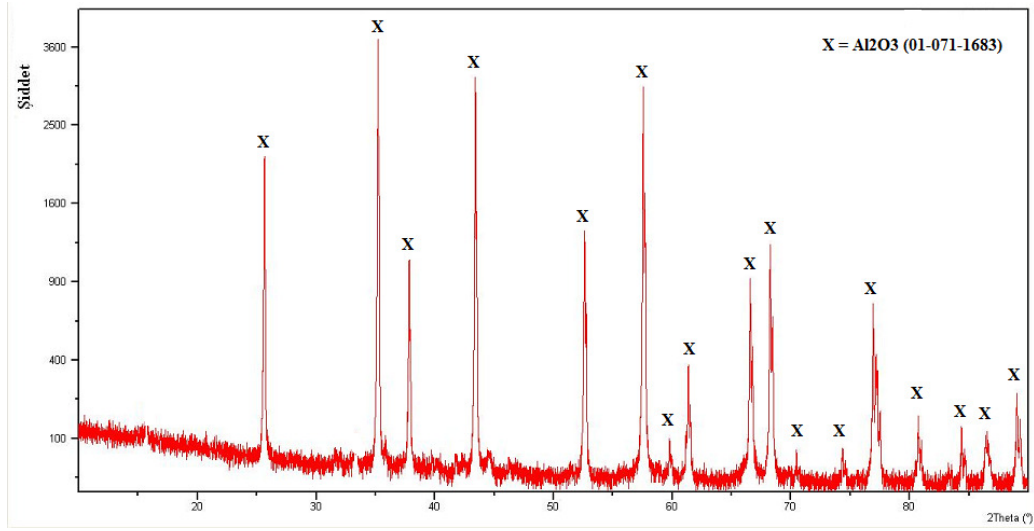
2.4.3 Reaksiyon sinterlemesi

Reaksiyon sinterlemesi iki veya daha çok bileşene sahip bir bileşiğin sinterleme operasyonu esnasında birbiriyle reaksiyona girerek bileşimin son şeklini almasını sağlayan bir tekniktir [26]. Günümüzde uygulanan bazı örnekler; SiC ve Si₃N₄'dür. Ürünün son şekli, katı-katı, katı-sıvı veya katı-gaz reaksiyonları sonucunda meydana gelebilir [26].

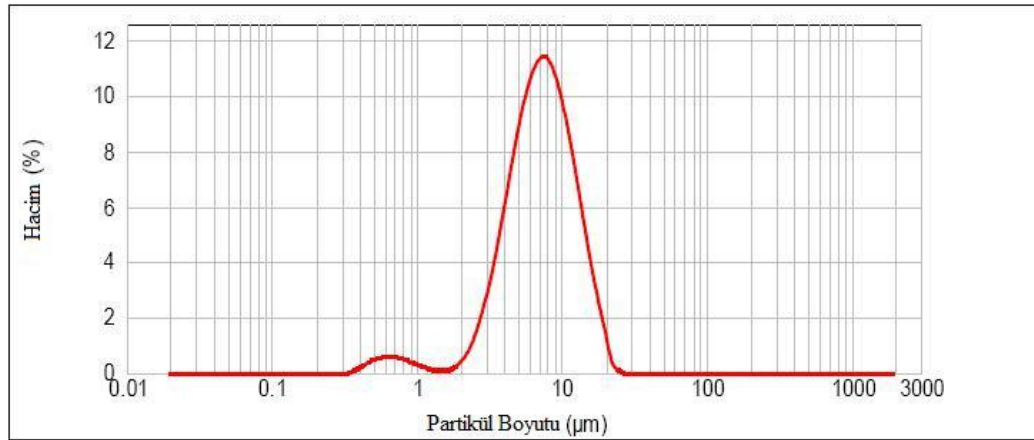
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Kullanılan Hammaddeler

Bu çalışma dahilinde, 1400 °C, 1450 °C ve 1500 °C sıcaklıklarda sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneylere ait toz miktarlarının detaylı dağılımı aşağıda verilmiştir.



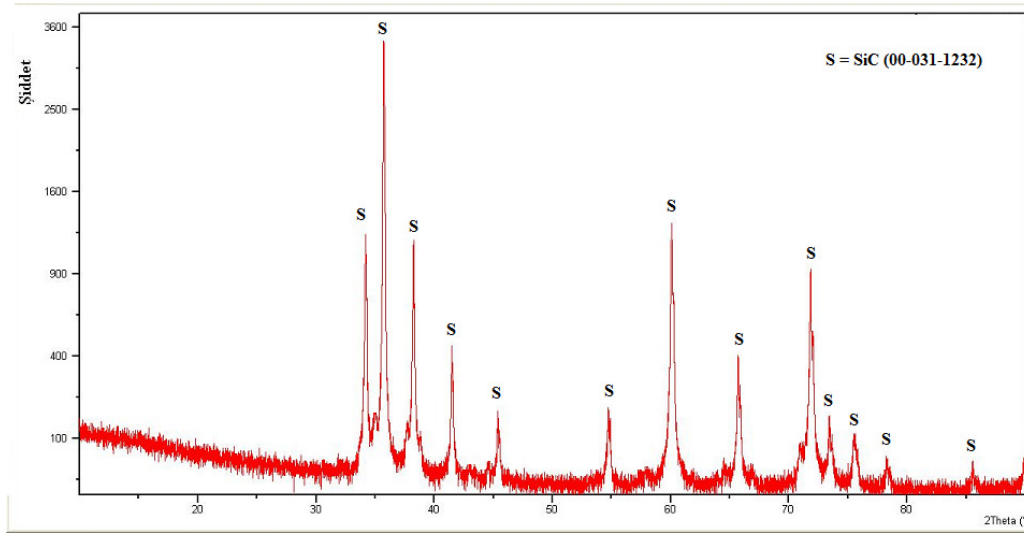
Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan Al₂O₃ tozunun XRD analizi.



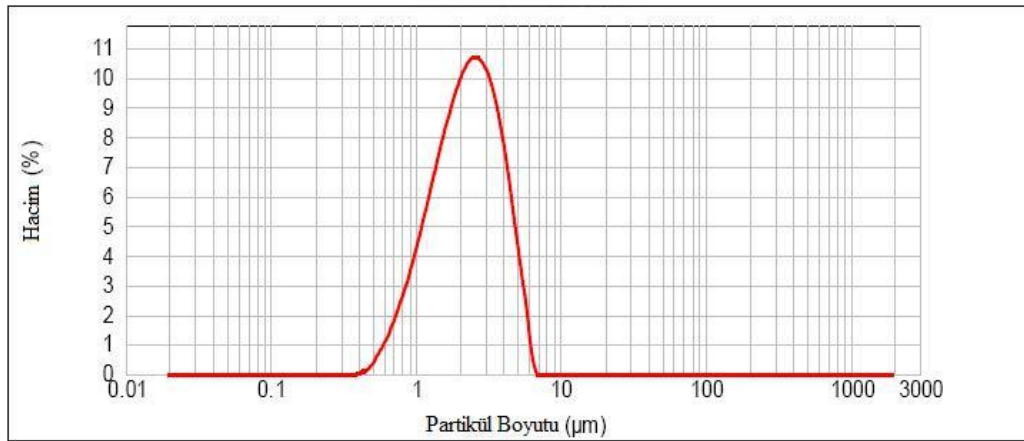
Şekil 3.2 : Deneylerde kullanılan Al₂O₃ tozunun tane boyut dağılımı.

Çizelge 3.1 : Sinterleme deneylerinde kullanılan silisyum karbür tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Si	% 68,4
C	% 29,3
O	% 1,5
Al	% 0,03
Ca	% 0,01
Fe	% 0,05
Diğer	% 0,5
Spesifik Yüzey Alanı	8,4 m ² /g
Ham yoğunluk	3,1 g/cm ³



Şekil 3.3 : Deneylerde kullanılan SiC tozunun XRD analizi.



Şekil 3.4 : Deneylerde kullanılan SiC tozunun tane boyut dağılımı.

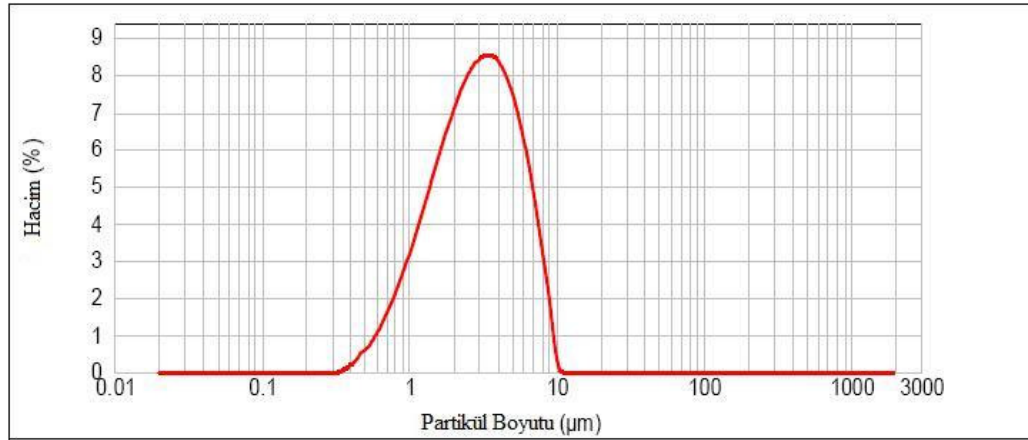
Sinterleme deneylerinde kullanılan alümina ve silisyum karbür tozları Alman H.C. Starck firmasından temin edilmiştir.

Deneylerde kullanılan alümina - silisyum karbür bileşenlerinin yüzde miktarları Çizelge 3.1, 3.2, 3.3'te verilmiştir.

Deneylerde kullanılan toz karışımlarının tane boyutu analizleri Şekil 3.5-3.6-3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : 1. bileşim için tozların yüzde miktarları.

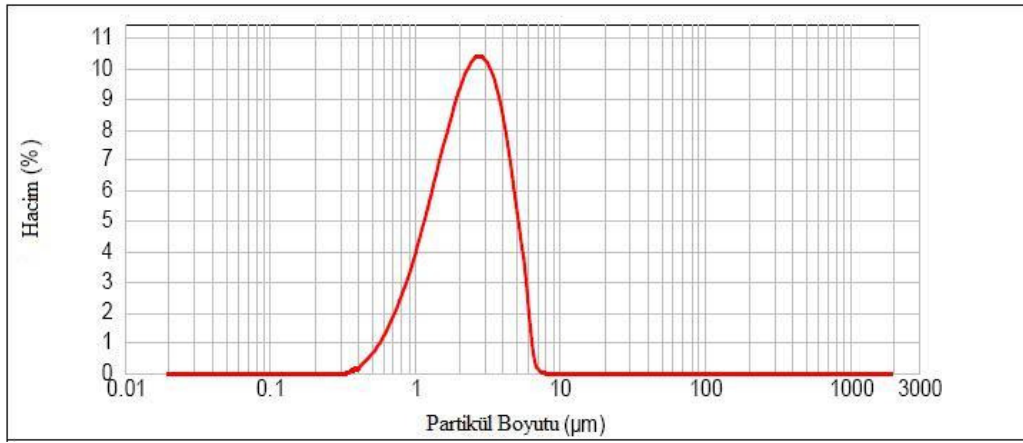
Bileşenler	Yüzde Miktarı (%)
Al ₂ O ₃	5
SiC	95



Şekil 3.5 : Deneylerde kullanılan 5% Al₂O₃ - 95% SiC tozunun tane boyut dağılımı.

Çizelge 3.3 : 2. bileşim için tozların yüzde miktarları.

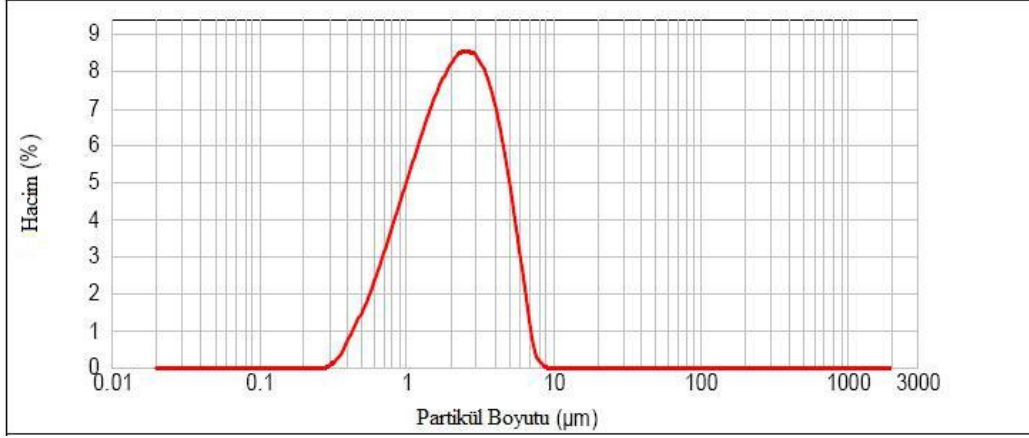
Bileşenler	Yüzde Miktarı (%)
Al ₂ O ₃	10
SiC	90



Şekil 3.6 : Deneylerde kullanılan 10% Al₂O₃ - 90% SiC tozunun tane boyut dağılımı.

Çizelge 3.4 : 3. bileşim için tozların yüzde miktarları.

Bileşenler	Yüzde Miktarı (%)
Al ₂ O ₃	15
SiC	85



Şekil 3.7 : Deneylede kullanılan 15% Al_2O_3 - 85% SiC tozunun tane boyut dağılımı.

3.2 Kullanılan Alet ve Cihazlar

Alumina ve silisyum karbür tozlarının tartımları 0.001g hassasiyetli Sartorius marka (Şekil 3.8) otomatik terazi ile yapılmıştır.



Şekil 3.8 : Sartorius tartı cihazı.

Homojen bir karışım sağlamak amacıyla bilyeli karıştırıcıda alümina - silisyum karbür tozları aynı ortamda karıştırıcı olarak silisyum karbür bilyelerin varlığında Szegvari marka atritörde (Şekil 3.9) karıştırılmışlardır.



Şekil 3.9 : Szevari attritör.



Şekil 3.10 : ElektroMag etiv.



Şekil 3.11 : Autograph çekme basma cihazı.



Şekil 3.12 : Buehler kesici.

Toz karışımlarının yapısında bulunan ethanol, ElektroMag marka etüv (Şekil 3.10) kullanılarak uçurulmuştur. Autograph (Şekil 3.11) marka çekme basma cihazında eğme mukavemeti ölçümleri yapılmıştır. Numuneler Buehler Isomet 2000 (Şekil 3.12) marka kesme cihazında elmas disk ile kesilmiştir.



Şekil 3.13 : Shimadzu sertlik ölçüm cihazı.



Şekil 3.14 : Apex marka hidrolik pres.

Tozların soğuk preslenmesi Apex marka hidrolik preste (şekil 3.14) yapılmıştır. Shimadzu (Şekil 3.13) marka sertlik ölçüm cihazında Vickers sertlik ölçümü yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri ise Mettler Toledo PG 503-S (Şekil 3.15) marka cihazda belirlenmiştir.



Şekil 3.15 : Mettler Toledo yoğunluk ölçme cihazı.

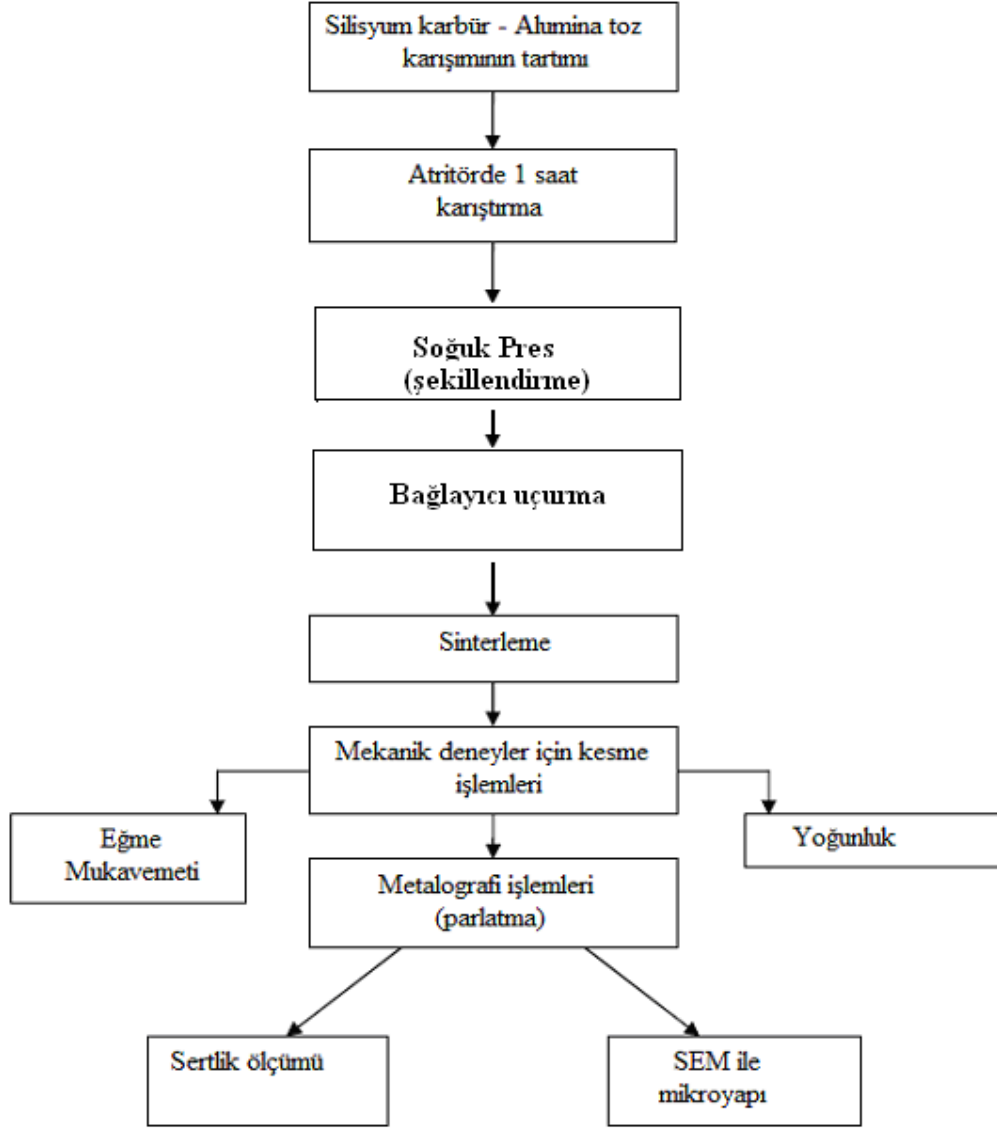
Kompozit üretimi için elde edilen homojen bir karışım haline gelen tozlar sinterleme işlemi için Protherm marka oksitli sinterleme fırınında (Şekil 3.16) sinterlenmiştir.



Şekil 3.16 : Protherm marka oksitli sinter fırını.

3.3 Deneylerin Yapılışı

Alümina ve silisyum karbür tozlarının karışımından kompozit malzeme üretimi Şekil 3.17’da verilen akış şeması takip edilerek yapılmıştır.



Şekil 3.17 : Deneilerin şematik gösterilişi.

Deneiler üç seri halinde yapılmıştır. Birinci deney grubunda, her bir sıcaklık ve bileşim için, silisyum karbür bilyelerle karıştırıcıda 1'er saat süreyle polietilen kabın içerisinde 30 ml.'lik ethanol ilavesiyle 320 rpm hızla karıştırılmışlardır. Karışıma ağırlıkça %5 oranında bağlayıcı eklenmiştir (PEG). Her bir karışım için bilye/toz oranı ağırlıkça 10:1 olacak şekilde SiC bilye konulmuştur, bilyeden karışım içine geçen SiC miktarını değerlendirmek amacıyla karıştırmanın ardından bilyeler tekrar tartılmış, ancak aradaki ağırlık farkı çok küçük olduğundan bu değer hesaplamalar esnasında ihmak edilmiştir. Daha sonra karışımın yapısında bulunan ethanol,

ElektroMag marka etüvde 120 °C'lik sıcaklıkta bekletilerek uçurulmuştur ve karışım kurutulmuştur. Sinterleme işlemi sonrası nihai ürün olarak elde edilmek istenen boyutlar 2,5 x 10 x 50 mm. ölçülerinde çubuklar olduğundan, karışım için kullanılan toz malzeme miktarı çizelge 3.6'da detaylarıyla görüldüğü gibi, karışımın teorik yoğunluğu baz alınarak belirtilen hacme göre hesaplanarak tartılmıştır. Toz karışımları daha sonra, soğuk preste 300 MPa. basınç altında şekillendirilmiştir. Bağlayıcı uçurma fırınında 500 °C'ye karar 2 °C/dak hızla ısıtılmış, iki saat bekletildikten sonra 2 °C/dak hızla soğutulmuştur. Bağlayıcısı uçurulan numuneler sinterleme fırınında 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1400 °C'ye kadar ısıtılıp bir saat bekletilmiştir, ardından 2 °C/dak soğuma hızıyla soğutulmuştur. Sinterlemenin yavaş ısıtma ile yapılmasının nedeni daha önce yapılan deneylerde numunelerin çatlamış ve kırık olarak çıkmasıdır, yavaş ısıtılarak numunelerin termal genişmeden dolayı çatlama ve kırılmaları önlenmiştir.

Çizelge 3.5 : 1.deneyde kullanılan toz karışımlarının dağılımı.

(2,5 x 10 x 50 mm.) , 1400 °C , 1 saat			
	SiC (gr.)	Al₂O₃ (gr.)	Toplam (gr.)
SiC (%95) & Al₂O₃ (%5) (vol.)	3,8	0,25	4,05
SiC (%90) & Al₂O₃ (%10) (vol.)	3,6	0,5	4,11
SiC (%85) & Al₂O₃ (%15) (vol.)	3,4	0,75	4,15

İkinci deney grubunda, her bir sıcaklık ve bileşim için, silisyum karbür bilyelerle karıştırıcıda 1'er saat süreyle polietilen kabın içerisinde 30 ml.'lik ethanol ilavesiyle 320 rpm hızla karıştırılmışlardır. Karışıma ağırlıkça %5 oranında bağlayıcı eklenmiştir (PEG). Her bir karışım için bilye/toz oranı ağırlıkça 10:1 olacak şekilde SiC bilye konulmuştur, bilyeden karışım içine geçen SiC miktarını değerlendirmek

amacıyla karıştırmanın ardından bilyeler tekrar tartılmış, ancak aradaki ağırlık farkı çok küçük olduğundan bu değer hesaplamalar esnasında ihmak edilmiştir. Daha sonra karışımın yapısında bulunan etanol, ElektroMag marka etüvde 120 °C'lik sıcaklıkta bekletilerek uçurulmuştur ve karışım kurutulmuştur. Sinterleme işlemi sonrası nihai ürün olarak elde edilmek istenen boyutlar 2,5 x 10 x 50 mm. ölçülerinde çubuklar olduğundan, karışım için kullanılan toz malzeme miktarı çizelge 3.6'da detaylarıyla görüldüğü gibi, karışımın teorik yoğunluğu baz alınarak belirtilen hacme göre hesaplanarak tartılmıştır. Toz karışımları daha sonra, soğuk preste 300 MPa. basınç altında şekillendirilmiştir. Bağlayıcı uçurma fırınında 500 °C'ye kadar 2 °C/dak hızla ısıtılmış, iki saat bekletildikten sonra 2 °C/dak hızla soğutulmuştur. Bağlayıcısı uçurulan numuneler sinterleme fırınında 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1450 °C'ye kadar ısıtılıp bir saat bekletilmiştir, ardından 2 °C/dak soğuma hızıyla soğutulmuştur. Sinterlemenin yavaş ısıtma ile yapılmasının nedeni daha önce yapılan deneylerde numunelerin çatlamış ve kırık olarak çıkmasıdır, yavaş ısıtılarak numunelerin termak genişmeden dolayı çatlama ve kırılmaları önlenmiştir.

Çizelge 3.6 : 2.deneyde kullanılan toz karışımlarının dağılımı.

(2,5 x 10 x 50 mm.) , 1450 °C , 1 saat			
	SiC (gr.)	Al₂O₃ (gr.)	Toplam (gr.)
SiC (%95) & Al₂O₃ (%5) (vol.)	3,8	0,25	4,05
SiC (%90) & Al₂O₃ (%10) (vol.)	3,6	0,5	4,11
SiC (%85) & Al₂O₃ (%15) (vol.)	3,4	0,75	4,15

Üçüncü deney grubunda, her bir sıcaklık ve bileşim için, silisyum karbür bilyelerle karıştırıcıda 1'er saat süreyle polietilen kabın içerisinde 30 ml.'lik etanol ilavesiyle

320 rpm hızla karıştırılmışlardır. Karışıma ağırlıkça %5 oranında bağlayıcı eklenmiştir (PEG). Her bir karışım için bilye/toz oranı ağırlıkça 10:1 olacak şekilde SiC bilye konulmuştur, bilyeden karışım içine geçen SiC miktarını değerlendirmek amacıyla karıştırmanın ardından bilyeler tekrar tartılmış, ancak aradaki ağırlık farkı çok küçük olduğundan bu değer hesaplamalar esnasında ihmak edilmiştir. Daha sonra karışımın yapısında bulunan ethanol, ElektroMag marka etüvde 120 °C'lik sıcaklıkta bekletilerek uçurulmuştur ve karışım kurutulmuştur. Sinterleme işlemi sonrası nihai ürün olarak elde edilmek istenen boyutlar 5 x 10 x 50 mm. ölçülerinde çubuklar olduğundan, karışım için kullanılan toz malzeme miktarı çizelge 3.6'da detaylarıyla görüldüğü gibi, karışımın teorik yoğunluğu baz alınarak belirtilen hacme göre hesaplanarak tartılmıştır. Toz karışımları daha sonra, soğuk preste 300 MPa. basınç altında şekillendirilmiştir. Bağlayıcı uçurma fırınında 500 °C'ye kadar 2 °C/dak hızla ısıtılmış, iki saat bekletildikten sonra 2 °C/dak hızla soğutulmuştur. Bağlayıcısı uçurulan numuneler sinterleme fırınında 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1500 °C'ye kadar ısıtılıp bir saat bekletilmiştir, ardından 2 °C/dak soğuma hızıyla soğutulmuştur. Sinterlemenin yavaş ısıtma ile yapılmasının nedeni daha önce yapılan deneylerde numunelerin çatlamış ve kırık olarak çıkmasıdır, yavaş ısıtılarak numunelerin termak genişmeden dolayı çatlama ve kırılmaları önlenmiştir.

Çizelge 3.7 : 3.deneyde kullanılan toz karışımlarının dağılımı.

(5 x 10 x 50 mm.) , 1500 °C , 1 saat			
	SiC (gr.)	Al₂O₃ (gr.)	Toplam (gr.)
SiC (%95) & Al₂O₃ (%5) (vol.)	7,6	0,49625	8,09625
SiC (%90) & Al₂O₃ (%10) (vol.)	7,2	0,9925	8,1925
SiC (%85) & Al₂O₃ (%15) (vol.)	6,8	1,48875	8,28875

Deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan karışımlarda alümina ve silisyum karbürlerin oranı çizelge 3.5, 3.6 ve 3.7'deki miktarlarda hazırlanmıştır.

Bütün deneylerde, sinterlenmiş numuneler tamamen soğuduktan sonra mekanik deneyler için kare kesit olacak şekilde kesilmiştir. Kesme işlemleri elmas disk ile Buehler kesicide gerçekleştirilmiştir. Kesilen numunelere daha sonra Autograph çekme basma cihazı 3 noktalı eğme mukavemeti testi yapılmıştır ve elde edilen değerler 3.1 no'lu formülde yerlerine yerleştirilerek eğme mukavemeti değerleri hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\max} = 3/2 \times (P_{\max} \times L) / (B \times H^2) \quad (3.1)$$

B= Numune genişliği (mm)

H= Kalınlık (mm)

L= Mesnet mesafesi (mm)

P= Yük (kg)

Numuneler daha sonra sertlik ölçümleri için Shimadzu sertlik ölçüm cihazında Vickers (1000 kg) değerleri ile ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümü Mettler Toledo cihazında numunelerin önce havadaki ve sudaki ağırlıkları hesaplandıktan sonra 3.2 formülünde yerlerine konularak yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$\rho = \rho_0 \times A / (A - B) \quad (3.2)$$

A= Katının havadaki ağırlığı

B= Katının sıvıdaki ağırlığı

ρ_0 = Sıvının (su) sıcaklığa bağlı yoğunluğu

Elde edilen bu değerlerden sonra 3.3 formülüne göre numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$d_T = d_1 / d_2 \times 100 \quad (3.3)$$

d_1 = numunenin ölçümler sonunda ortaya çıkan yoğunlukların ortalaması

d_2 = numunenin toz karışım oranları baz alınarak teorik yoğunluğu

d_1 = elde edilen nihai yoğunluk

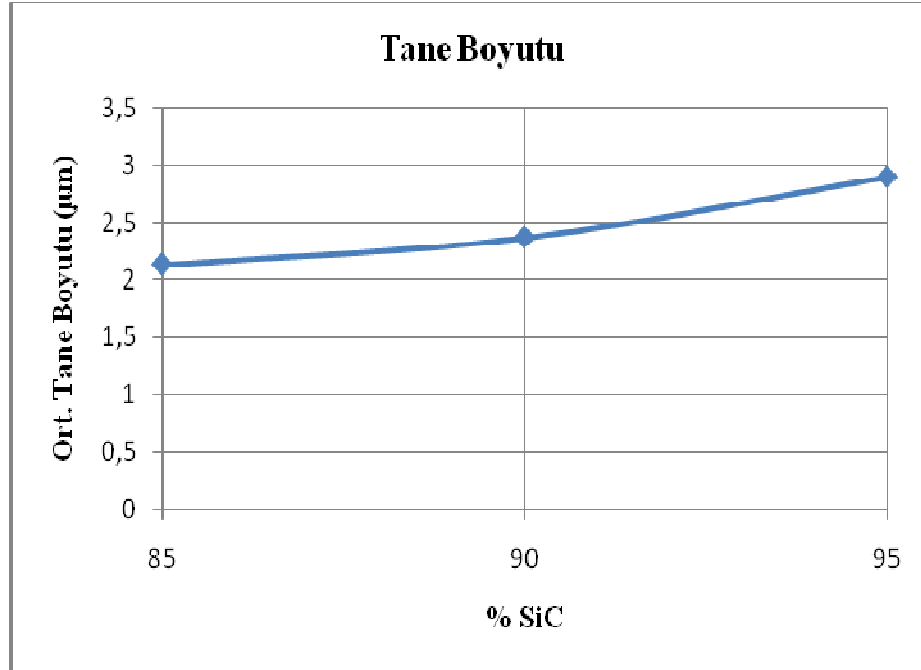
4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Toz Karışımlarının Karakterizasyonu Sonuçları

Deneylerde kullanılan toz karışımları bir saat süre ile atritörde karıştırılmıştır. Karıştırma sonunda oluşan tozların tane boyutları aşağıda verilmiştir.

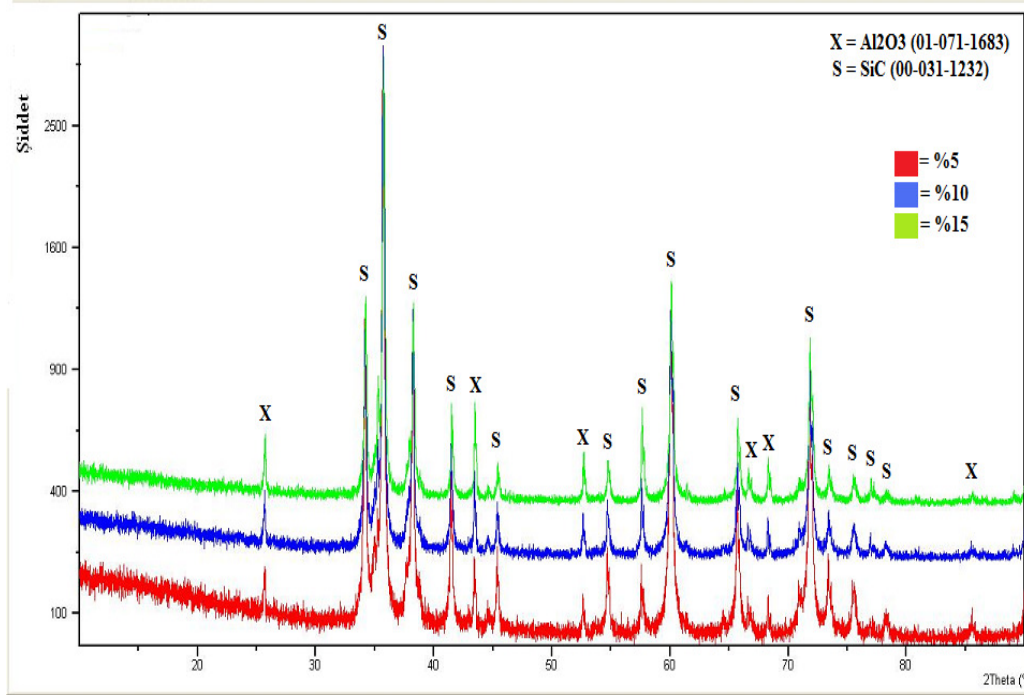
Çizelge 4.1 : Toz karışımlarının ortalama tane boyutu.

Bileşim	Ort. Tane Boyutu (μm)
95% SiC – 5% Al_2O_3	2.897 μm
90 % SiC - 10% Al_2O_3	2.368 μm
85 % SiC - 15% Al_2O_3	2.134 μm



Şekil 4.1 : Bileşim – tane boyutu grafiği.

Deneyleerde kullanılan toz karışımlarının x-ışınları analizi sonuçları aşağıda verilmiştir.



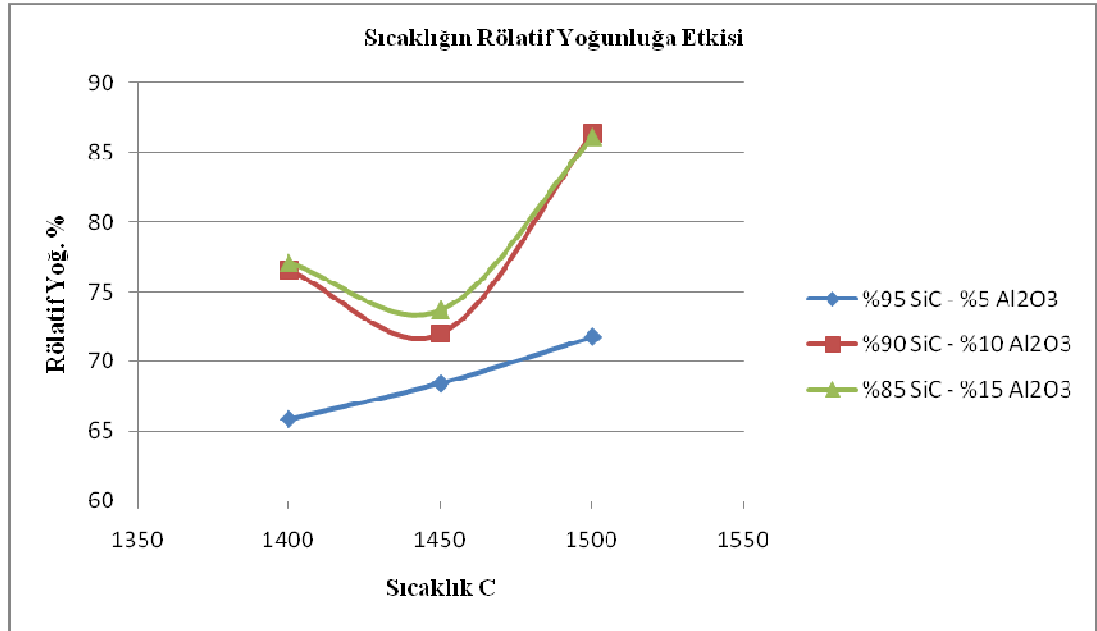
Şekil 4.2 : Deneyleerde kullanılan %5-10-15 Al₂O₃ içeren tozların XRD analizi.

4.2 Sıcaklığın Yoğunluğa Etkisi

Üç ayrı sıcaklıkta; 1400 °C, 1450 °C ve 1550 °C’da yapılmış olan deneyleer sonucunda elde edilmiş yoğunluk değerleri çizelge 4.1’de verilmiştir. Numunelerin önce havadaki ve sudaki ağırlıkları hesaplanmış, sonra 3.2 formülünde yerlerine konularak yoğunlukları hesaplanmıştır; daha sonra ise 3.3 formülünde yerine konarak elde edilen rölatif yoğunluklar bulunmuştur. İlgili standart sapma değerleri hesaplanmış, ancak elde edilen değerlerin birbirlerine çok yakın olmalarından ötürü sıfır çıkmış oldukları için tabloda belirtilmemişlerdir. Şekil 4.3’de her bir bileşim için, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimini gösteren grafik görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Üç farklı bileşim için farklı sıcaklıklarda ölçülen yoğunluk değerlerinin teorik değerlerle kıyaslanması.

		Elde Edilen Yoğunluk	Teorik Yoğunluk	Rölatif Yoğunluk (%)
1.Deney Grubu	1400-5	2,134	3,2385	65,89
	1400-10	2,508	3,277	76,53
	1400-15	2,556	3,3155	77,09
2.Deney Grubu	1450-5	2,217	3,2385	68,45
	1450-10	2,359	3,277	71,98
	1450-15	2,444	3,3155	73,71
3.Deney Grubu	1500-5	2,325	3,2385	71,79
	1500-10	2,83	3,277	86,36
	1500-15	2,854	3,3155	86,08



Şekil 4.3 : Al₂O₃-SiC kompozitlerinde sıcaklığın rölatif yoğunluğa etkisi.

Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, sıcaklığın artmasıyla, malzemenin yoğunluğunun da arttığı görülmektedir. Artan sıcaklık, sinterleme sırasında partiküller arasında katı bağ oluşumunu arttırmış, toz partiküllerinin birbirlerine olan difüzyonu hızlandırmıştır.

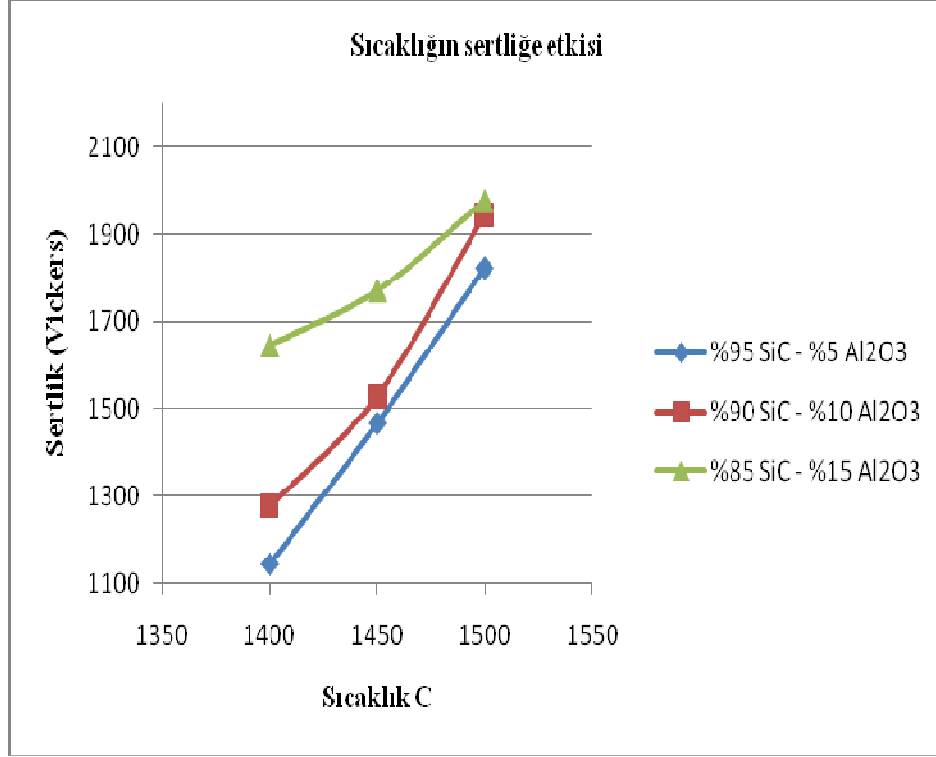
En yüksek yoğunluk değerleri %10-15'lik karışımlarda 1500 °C'de elde edilmiştir ve %86'dır.

4.3 Sıcaklığın Sertliğe Etkisi

Sertlik ölçümleri, 2 kg'lık yük kullanılarak 10sn süreyle yapılmıştır. Sinter fırınında, açık atmosferde, 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1 saat süreyle 1400 °C'de tutulmuş olan hacimce % 95 SiC, % 90 SiC ve % 85 SiC içeren bileşimlere, sinter fırınında, açık atmosferde, 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1 saat süreyle 1450 °C'de tutulmuş olan hacimce % 95 SiC, % 90 SiC ve % 85 SiC içeren bileşimlere ve yine sinter fırınında, açık atmosferde, 2 °C/dak ısıtma 1 saat süreyle 1500 °C'de tutulmuş olan hacimce % 95 SiC, % 90 SiC ve % 85 SiC içeren bileşimlere yapılmış olan deneyler sonucunda elde edilmiş olan mikro sertlik değerleri standart sapma değerleri hesaplanarak çizelge 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.4' de üç farklı bileşim için sıcaklığın sertliğe etkisi görülmektedir.

Çizelge 4.3 : Üç farklı bileşim için farklı sıcaklıklarda ölçülen sertlik değerleri.

		Sertlik (Vickers, 2kg)	Standart Sapma
1.Deney Grubu	1400-5	1143,50	±157,91
	1400-10	1276,85	±123,63
	1400-15	1646,12	±109,08
2.Deney Grubu	1450-5	1467,33	±119,84
	1450-10	1516,5	±104,92
	1450-15	1771,75	±147,86
3.Deney Grubu	1500-5	1824	±47,07
	1500-10	1943,75	±53,84
	1500-15	1978,37	±79,47



Şekil 4.4 : SiC-Al₂O₃ kompozitlerinde sıcaklığın sertliğe etkisi.

Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, SiC-Al₂O₃ kompozitlerinde sıcaklığın artmasıyla malzemenin sertliğinde de artış gerçekleştiği görülmektedir. Sıcaklığın artışıyla beraber malzemenin yoğunluğunun da artarak porozitenin azalması, sıcaklığın sertliğe olan pozitif etkisinin sebebidir. %5-10 Al₂O₃ içeren kompozitlerin sertlik değerleri birbirine yakın çıkmıştır.

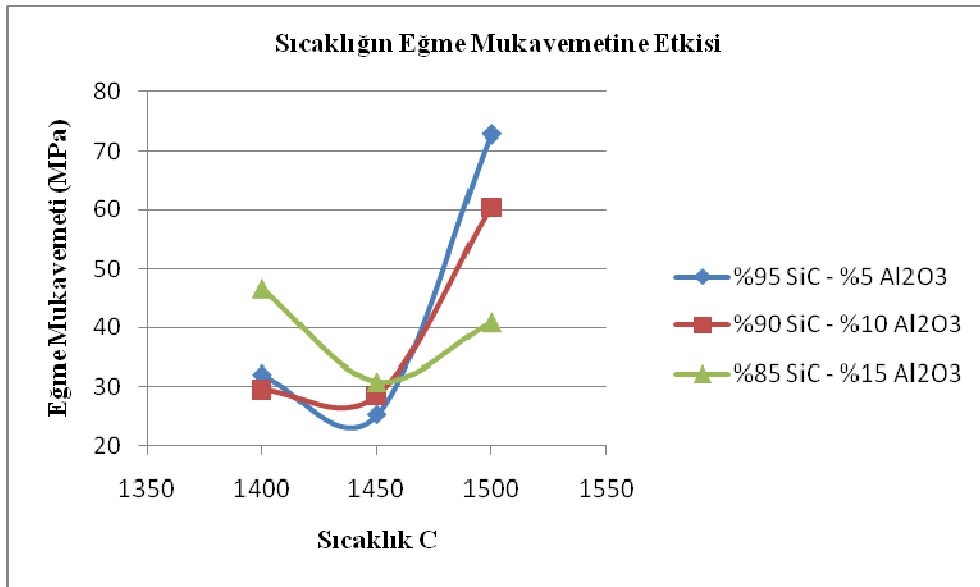
4.4 Sıcaklığın Eğme Mukavemetine Etkisi

Eğme mukavemeti testleri, Şekil 3.11’de gösterilmiş olan Autograph marka çekme basma cihazında yapılmıştır. Sırasıyla 1400 °C, 1450 °C ve 1500 °C sıcaklıklarda sinter fırınında, açık atmosferde, 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1 saat süreyle tutulmuş olan hacimce % 95 SiC, % 90 SiC ve % 85 SiC içeren bileşimlere yapılmış olan deneyler sonucunda elde edilmiş olan değerler çizelge 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.5’te üç farklı bileşim için sıcaklığın eğme mukavemetine etkisi görülmektedir.

Çizelge 4.4 : Üç farklı bileşim için farklı sıcaklıklarda ölçülen eğme mukavemeti değerleri.

		Eğme Mukavemeti (Mpa)	Standart Sapma
1.Deney Grubu	1400-5	31,99	±22,90
	1400-10	29,55	±9,57
	1400-15	46,63	±8,49
2.Deney Grubu	1450-5	15,26	±2,56
	1450-10	18,56	±3,82
	1450-15	20,92	±2,58
3.Deney Grubu	1500-5	72,71	±1,80
	1500-10	60,37	±4,59
	1500-15	40,91	±1,29

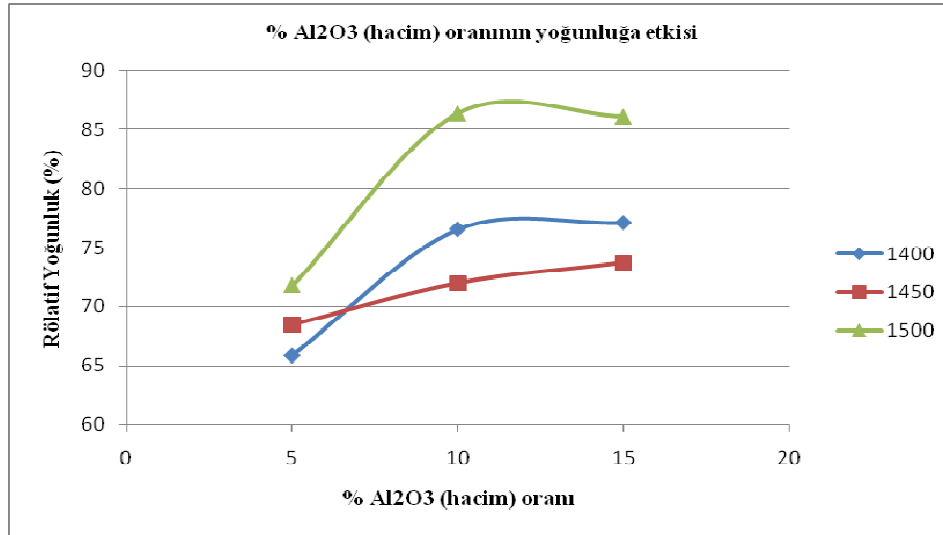
Deney sonuçlarından görüldüğü üzere, sıcaklık ile eğme mukavemeti paralel bir artış göstermiştir. Bu da sıcaklığın yükselmesiyle, malzemenin porozitesinin azalması ve tokluğunun artmasından kaynaklanmaktadır. Maksimum eğme mukavemetleri 1500 °C’de elde edilmiştir.



Şekil 4.5 : SiC-Al₂O₃ kompozitlerinde sıcaklığın eğme mukavemetine etkisi.

4.5 Al₂O₃ ilavesinin yoğunluğa etkisi

Üç ayrı sıcaklıkta; 1400 °C, 1450 °C ve 1500 °C’de yapılmış olan deneyler sonucunda elde edilmiş değerler çizelge 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.6’da her bir sıcaklık için, yoğunluk değerlerinin toz karışımındaki Al₂O₃ oranının hacimce artması ile değişimini gösteren grafik görülmektedir.



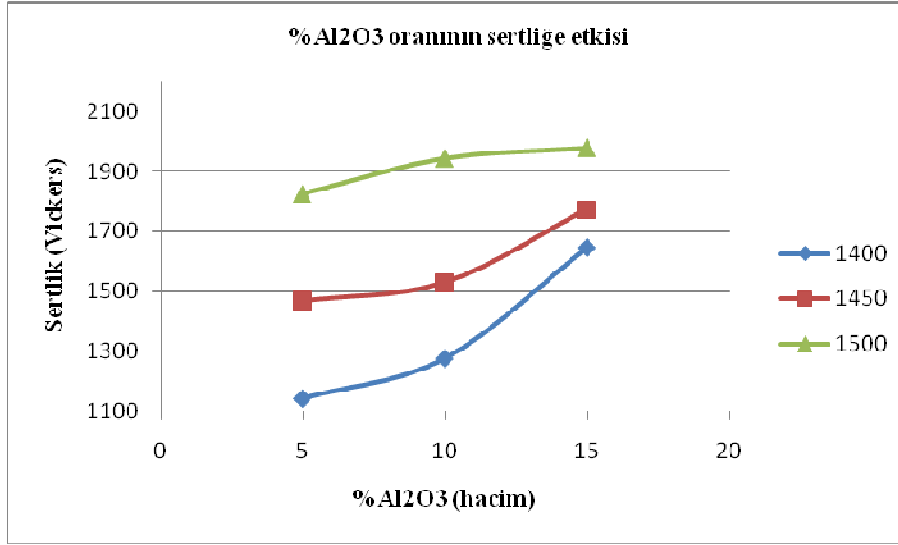
Şekil 4.6 : Farklı sıcaklıklar için SiC-Al₂O₃ kompozitindeki %Al₂O₃ (hacim) miktarının rölatif yoğunluğa etkisi.

Elde edilen deney sonuçlarından, SiC – Al₂O₃ kompozitlerinde, alüminanın, silisyum karbürün sinterlenmesine olumlu etki ettiği görülmektedir. 1450 °C koşullarında Al₂O₃ miktarının artması ile rölatif yoğunlukta artış görülmüş fakat bu değerler %68-73 arasında sınırlı kalmıştır. Diğer iki deney grubunda ise, yoğunluk değerlerinde Al₂O₃ ilavesi ile daha belirgin yoğunluk artışları kaydedilmiştir ancak %10 Al₂O₃ ilavesinden sonra yoğunlukta artma azalmıştır. Bu değerler göz önüne alınarak, artan Al₂O₃ miktarının SiC – Al₂O₃ kompozitinin sinterleme özelliğini iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

4.6 Al₂O₃ ilavesinin sertliğe etkisi

Sinter fırınında, açık atmosferde, 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1 saat süreyle 1400 °C’de tutulmuş olan hacimce % 95 SiC, % 90 SiC ve % 85 SiC içeren bileşimlere, sinter fırınında, açık atmosferde, 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1 saat süreyle 1450 °C’de tutulmuş olan hacimce % 95 SiC, % 90 SiC ve % 85 SiC içeren bileşimlere ve yine sinter

fırınında, açık atmosferde, 2 °C/dak ısıtma 1 saat süreyle 1500 °C’de tutulmuş olan hacimce % 95 SiC, % 90 SiC ve % 85 SiC içeren bileşimlere yapılmış olan deneyler sonucunda elde edilmiş olan mikro sertlik değerleri standart sapma değerleri hesaplanarak çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.7’de her bir sıcaklık için, sertlik değerlerinin toz karışımındaki Al₂O₃ oranının hacimce artması ile değişimini gösteren grafik görülmektedir.

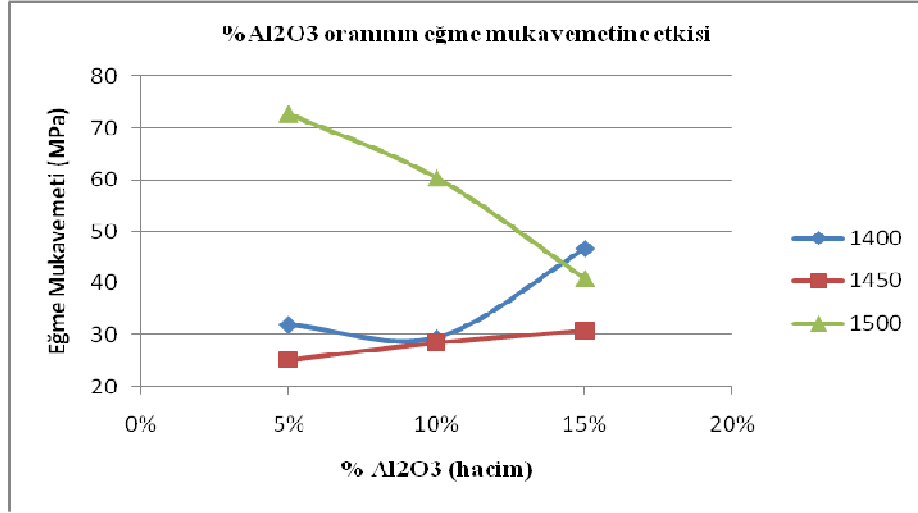


Şekil 4.7 : Farklı sıcaklık için SiC – Al₂O₃ kompozitindeki %Al₂O₃ (hacim) miktarının sertliğe etkisi.

Elde edilen sertlik testi sonuçları incelendiğinde, Al₂O₃ ilavesinin, SiC-Al₂O₃ kompozitinin sertliğini olumlu etkilediği görülmektedir. SiC’e göre daha az sertliği bulunan Al₂O₃ ilavesi sinterlemeyi kolaylaştırdığı ve poroziteyi azalttığı için kompozitin sertlik değeri artmaktadır. 1500 °C’de yapılan çalışmalarda Al₂O₃ ilavesinin sertlik üzerindeki etkisi diğer sıcaklıklara göre daha azdır.

4.7 Al₂O₃ ilavesinin eğme mukavemetine etkisi

Sırasıyla 1400 °C, 1450 °C ve 1500 °C sıcaklıklarda sinter fırınında, açık atmosferde, 2 °C/dak ısıtma hızıyla 1 saat süreyle tutulmuş olan hacimce % 95 SiC, % 90 SiC ve % 85 SiC içeren bileşimlere yapılmış olan deneyler sonucunda elde edilmiş olan değerler çizelge 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.8’de her bir sıcaklık için, eğme mukavemeti değerlerinin toz karışımındaki Al₂O₃ oranının hacimce artması ile değişimini gösteren grafik görülmektedir.

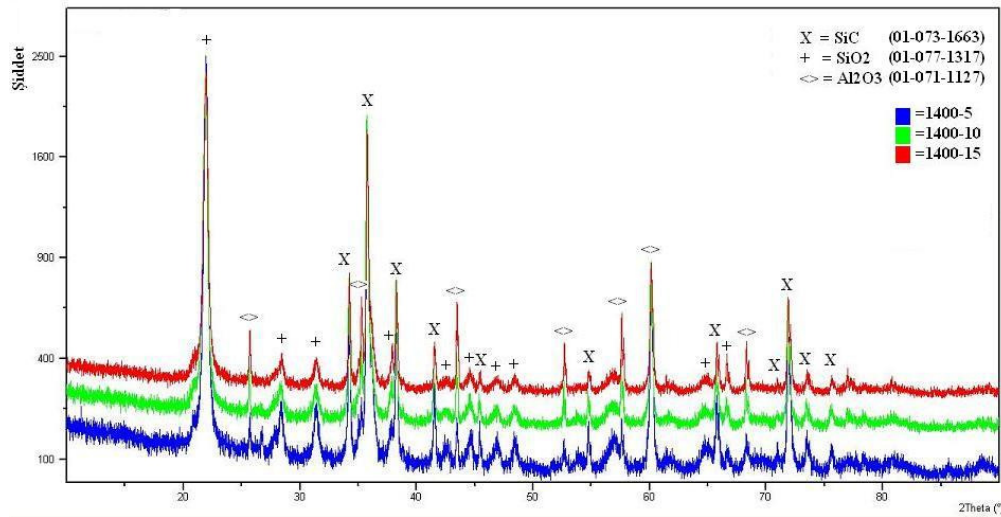


Şekil 4.8 : Farklı sıcaklıklar için SiC- Al₂O₃ kompozitindeki % Al₂O₃ (hacim) miktarının eğme mukavemetine etkisi.

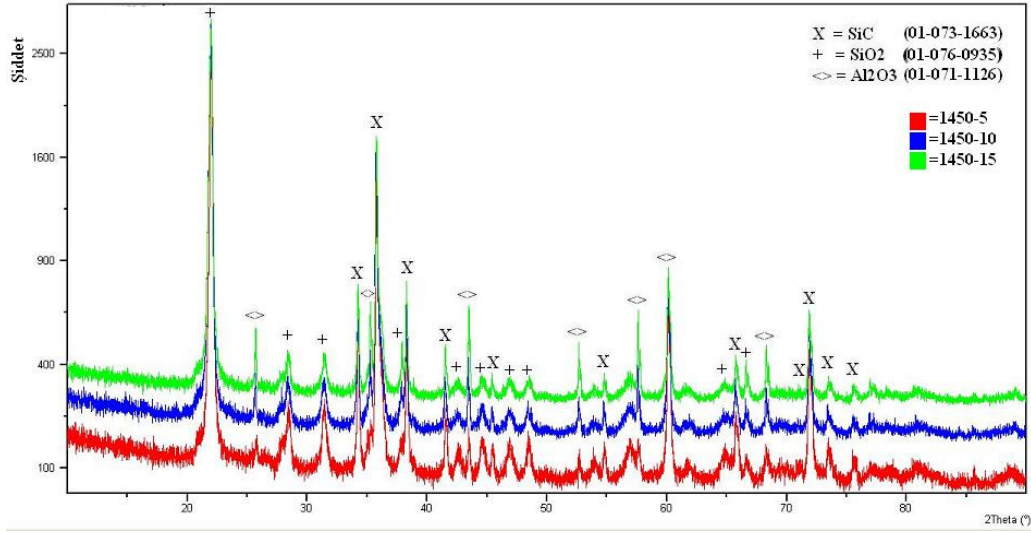
Elde edilen eğme mukavemeti değerlerine bakıldığında Al₂O₃ ilavesinin sonuçları 1500 °C'ye kadar olumlu etkilediği görülmektedir, 1500 °C'de Al₂O₃ ilavesi eğme mukavemetine olumsuz etki yapmaktadır.

4.8 Numunelerin X-Işınları Analizi

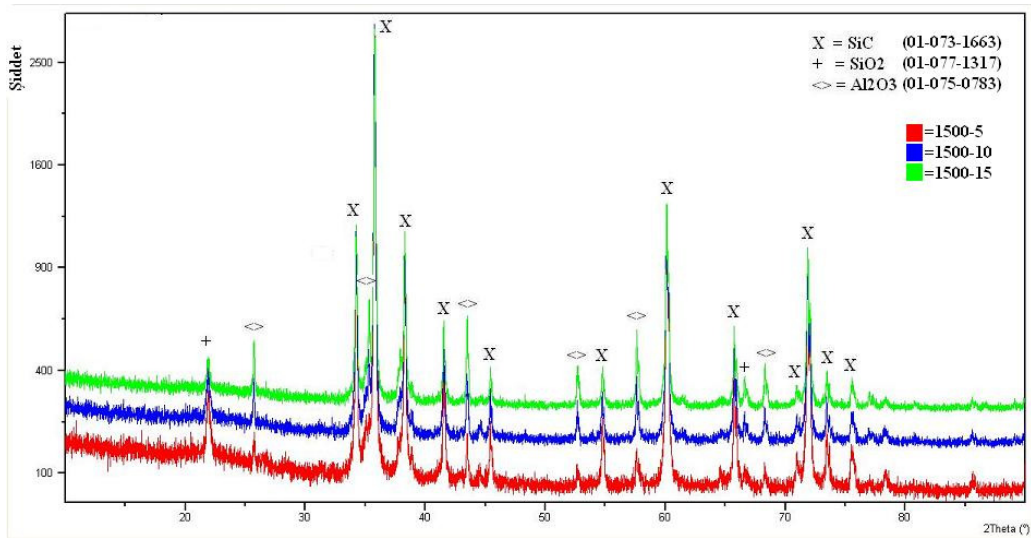
Farklı sıcaklık (1400-1450-1500 °C) ve bileşimlerde hazırlanan seramik kompozit numunelerin sinterleme sonrası XRD analizi sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.9 : 1400 °C'de sinterlenmiş numunelerin (5-10-15) XRD analizi.

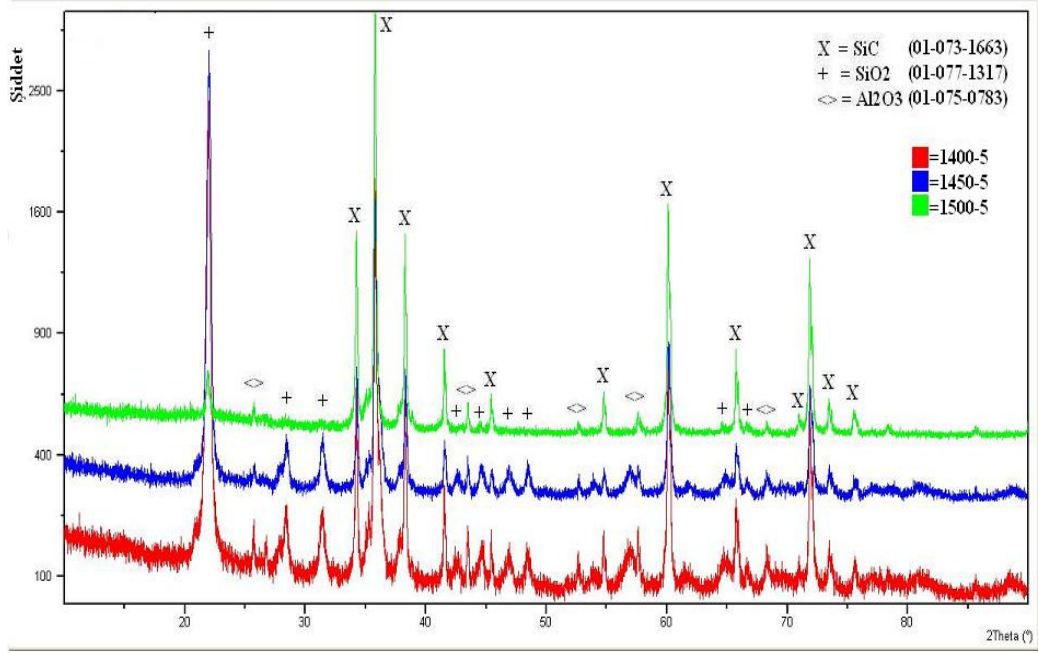


Şekil 4.10 : 1450 °C’de sinterlenmiş numunelerin (5-10-15) XRD analizi.

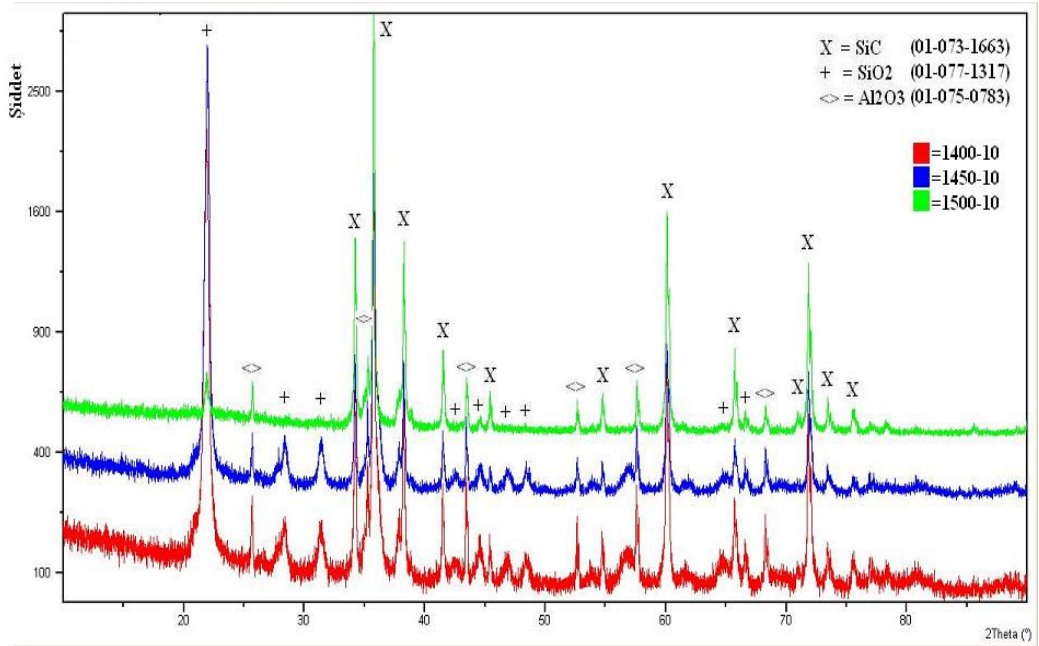


Şekil 4.11 : 1500 °C’de sinterlenmiş numunelerin (5-10-15) XRD analizi.

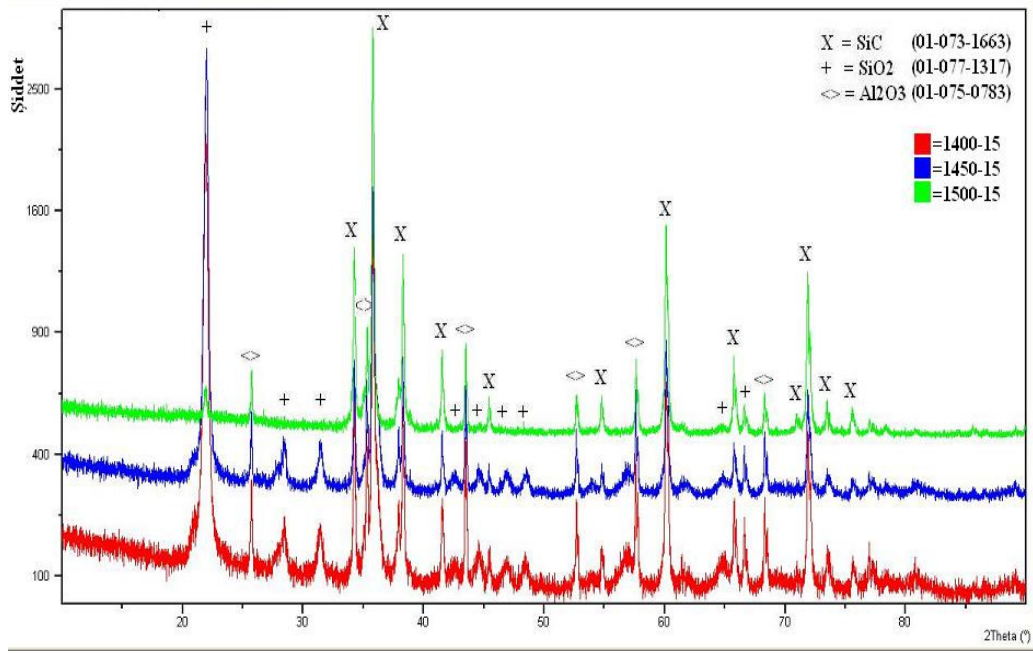
Al_2O_3 ilavesi ile birlikte alumina piklerinin şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Oksidan atmosferde SiC’ün parçalandığı ve sinterleme ortamında oksijenle reaksiyona girmesi sonucu CO gaz çıkışı olduğu bilinmektedir. Ayrıca SiC’ün oksitlendiği reaksiyonda reaksiyon ürünü olarak SiO_2 de oluşmaktadır [31]. Reaksiyon sonucu oluşan SiO_2 pikleri de analiz sonucunda görülmektedir fakat müllit fazı oluşumu görülmemektedir. SiC ve sinterleme sıcaklığının artışıyla, SiC’ün parçalanması sonucunda açığa çıkan SiO_2 miktarının artışına bağlı olarak pik şiddetinde bir artış göze çarpmaktadır.



Şekil 4.12 : 1400-1450-1500 °C'de sinterlenmiş %5 alüminalı numunenin XRD analizi.



Şekil 4.13 : 1400-1450-1500 °C'de sinterlenmiş %10 alüminalı numunenin XRD analizi.

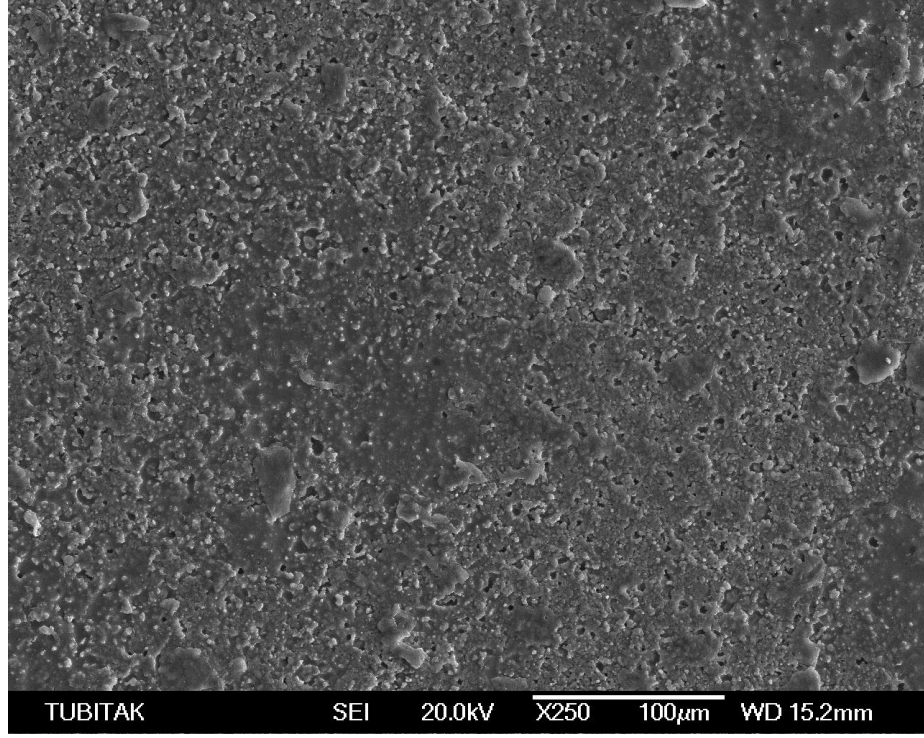


Şekil 4.14 : 1400-1450-1500 °C'de sinterlenmiş %15 alüminalı numunenin XRD analizi.

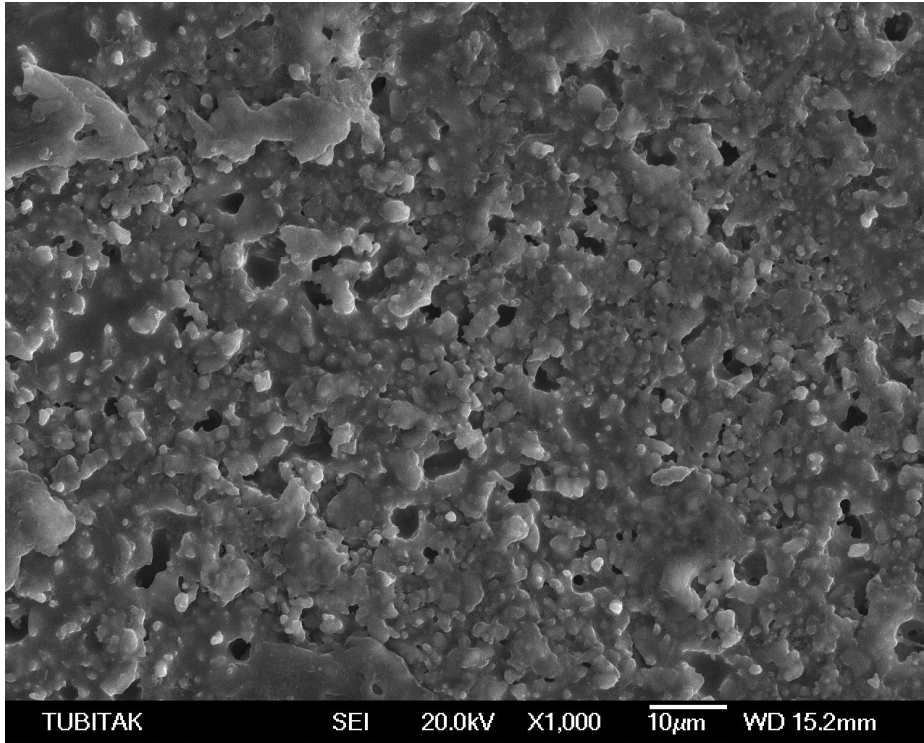
Sıcaklık artışı ile SiC piklerinin şiddeti azaldığı görülmektedir, bunun nedeni SiC'ün oksitlenerek SiO₂'ye dönüşmesidir. Ayrıca 1400 ve 1450 °C'de görülen bazı SiO₂ pikleri 1500 °C'de görülmemektedir. Analiz sonucu SiO₂'nin yüksek miktarda çıkması, numunelerin altlık malzemesine yapışmasını önlemek amacıyla, altlık üzerine serpilmiş kuartz tozunu difüzyon yoluyla çekmesi olarak öngörülmektedir.

4.9 Mikroyapılara ait SEM fotoğraflarının İncelenmesi

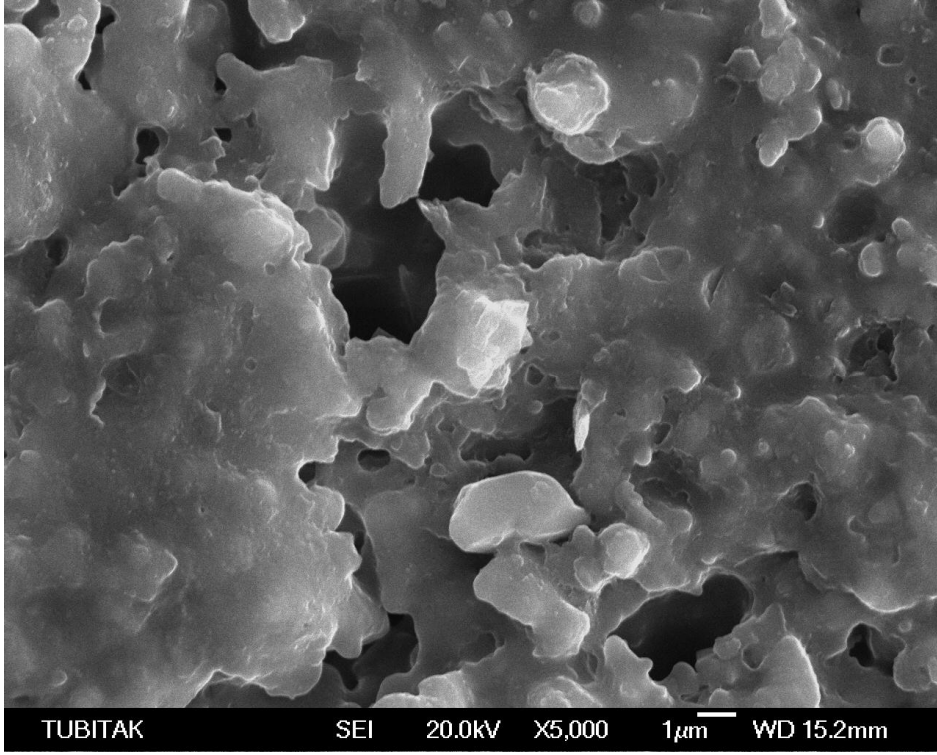
Farklı sıcaklıklarda sinterlenen seramik kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 4.15-4.26'da gösterilmektedir.



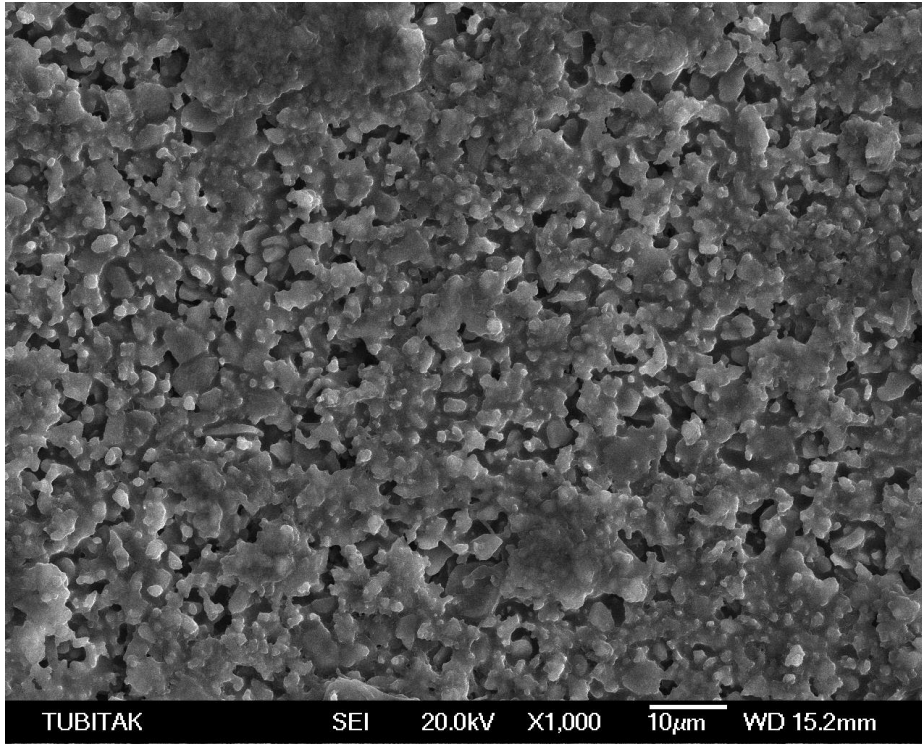
Şekil 4.15 : 1450 °C'de yapılan deneye ait %5 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 250).



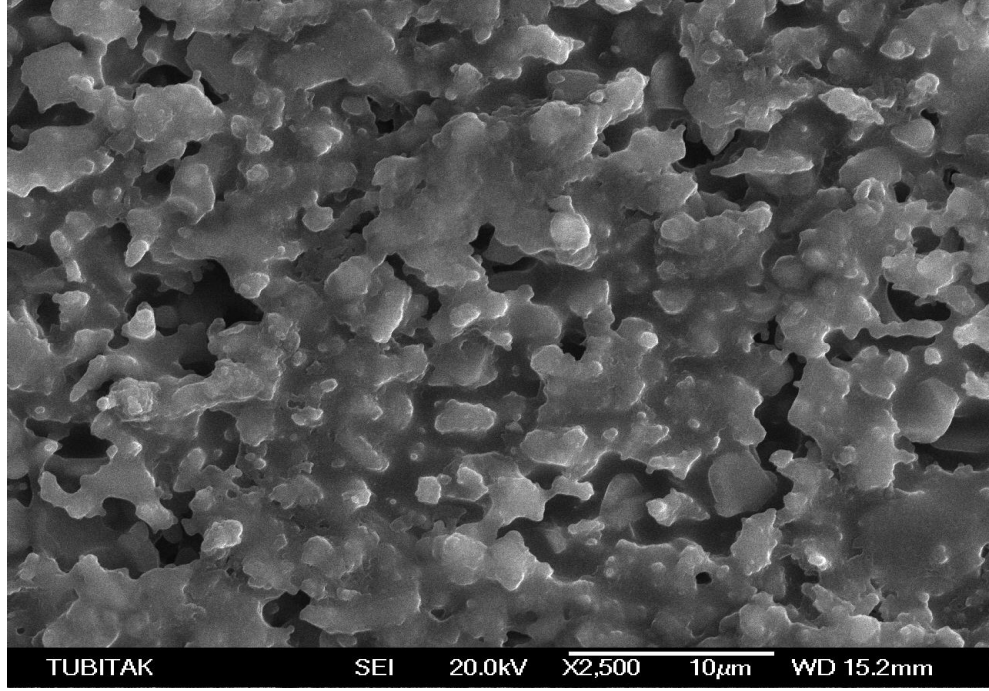
Şekil 4.16 : 1450 °C'de yapılan deneye ait %5 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000).



Şekil 4.17 : 1450 °C’de yapılan deneye ait %5 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 5000).

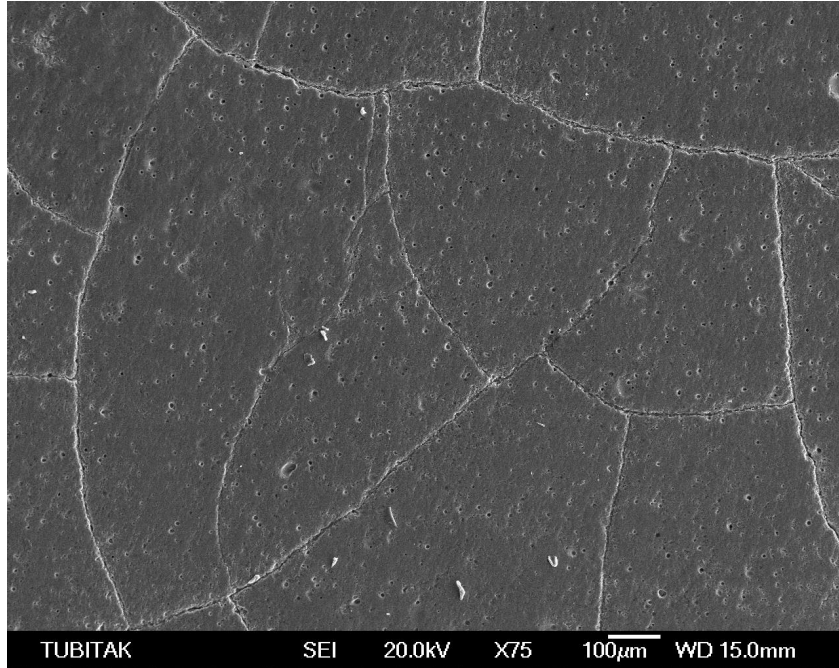


Şekil 4.18 : 1450 °C’de yapılan deneye ait %15 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000).

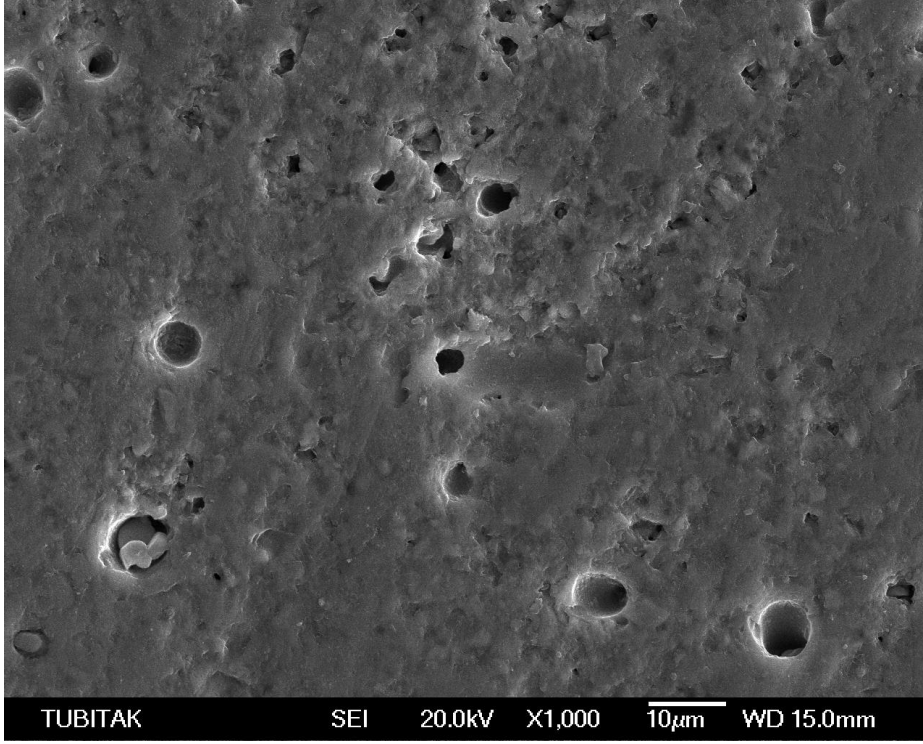


Şekil 4.19 : 1450 °C’de yapılan deneye ait %15 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 2500).

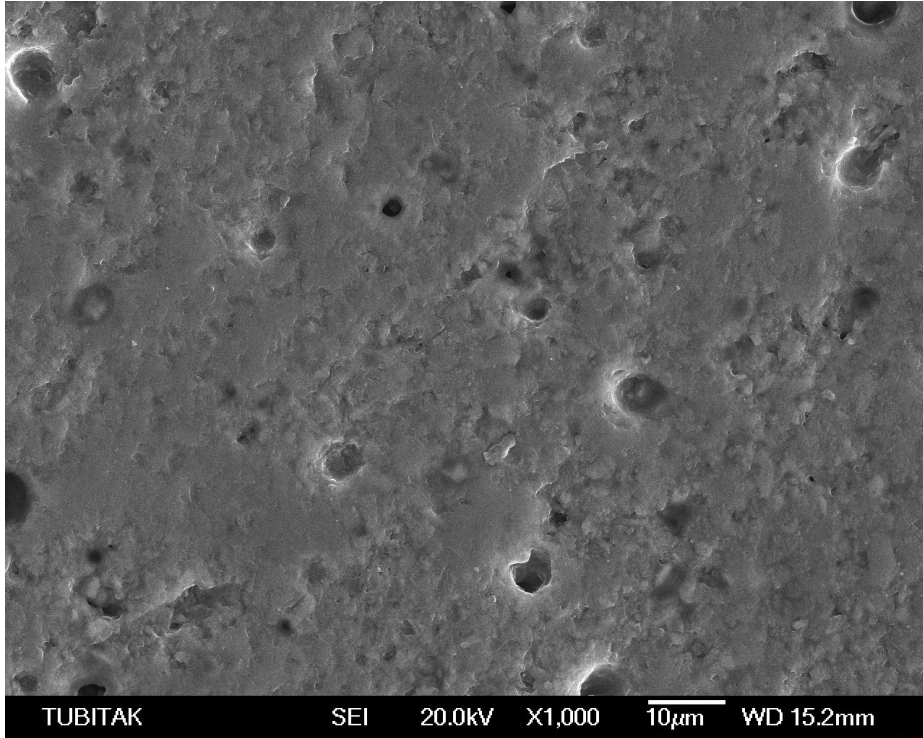
1450 °C’de sinterlenen %5-15’lik numunelerin mikroyapı görüntülerine bakıldığında sinterlenmenin yetersiz olduğu, tanelerin yeterince birbirine bağlanmadığı görülmektedir.



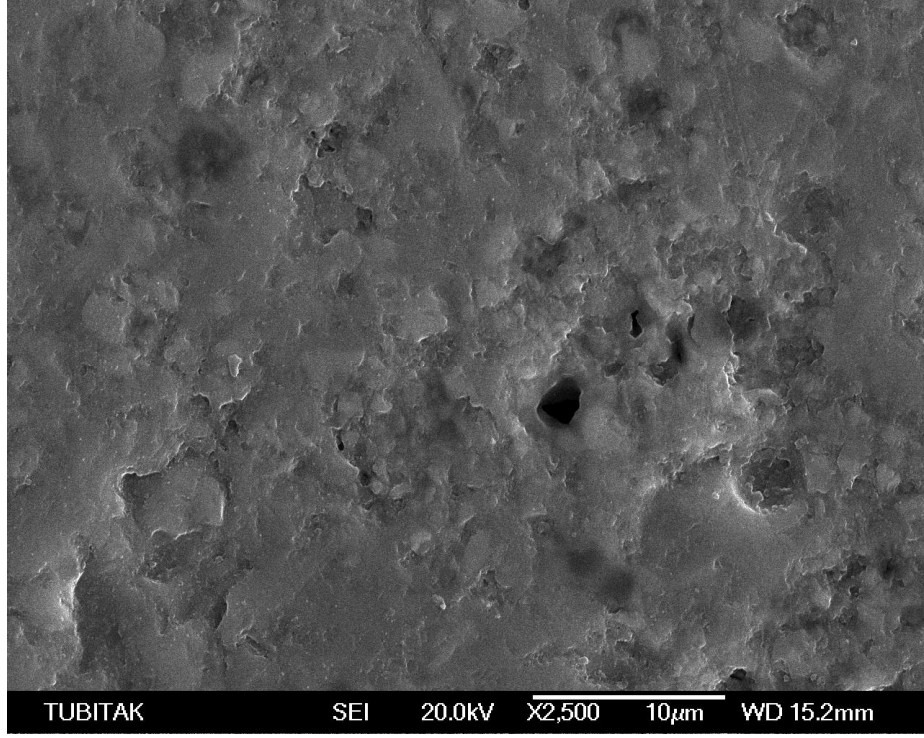
Şekil 4.20 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %5 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 75).



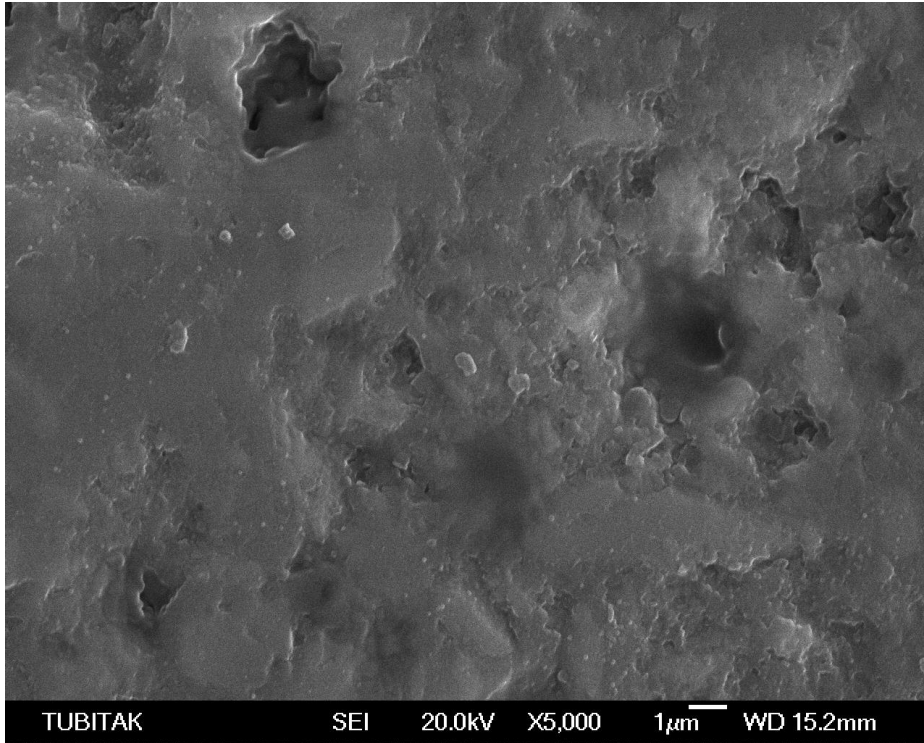
Şekil 4.21 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %5 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000).



Şekil 4.22 : 1500 °C’de yapılan deneye ait %5 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000).

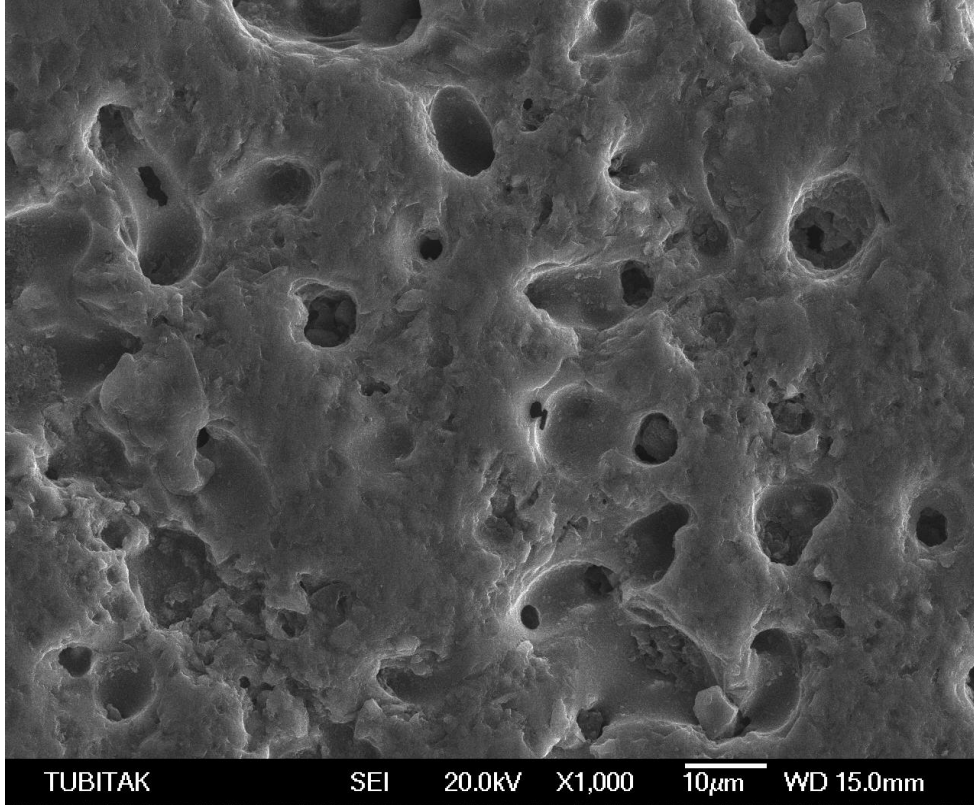


Şekil 4.23 : 1500 °C'de yapılan deneye ait %5 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 2500).

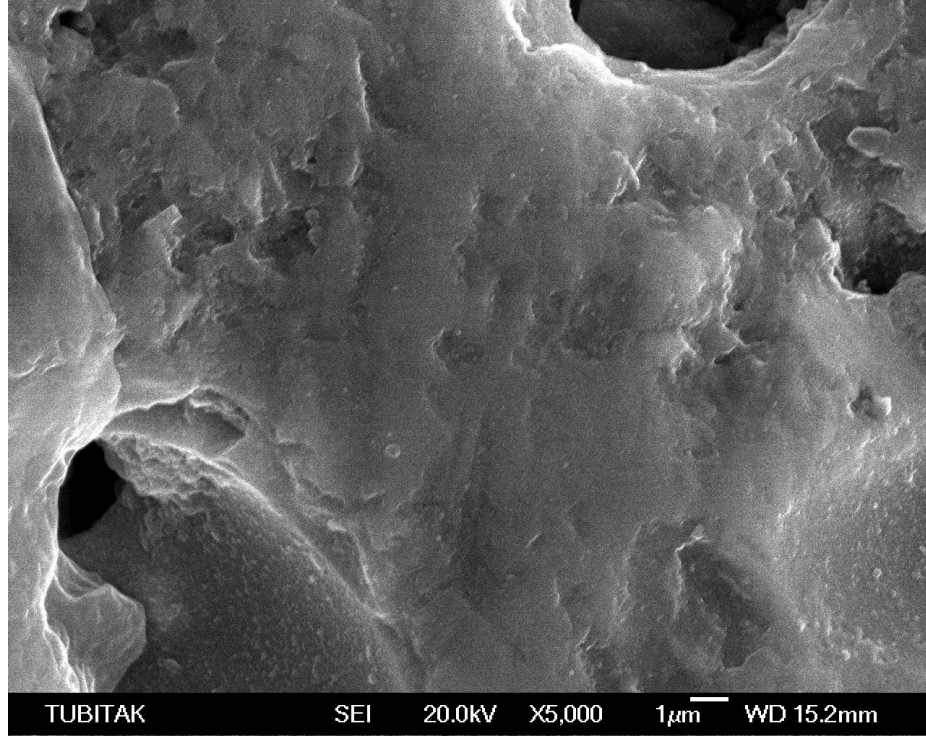


Şekil 4.24 : 1500 °C'de yapılan deneye ait %5 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 5000).

Şekil 4.20-26'da 1500 °C'de sinterlenmiş numunelerin mikro yapı görüntüleri yer almaktadır. 1450 °C ye göre gözle görülür biçimde farklılık vardır, sıcaklığın artışıyla numuneler daha iyi sinterlenmiş poroziteler azalmıştır. Al₂O₃ ilavesinin de numunelerde poroziteyi arttırdığı görülmektedir. 1500 °C' deki numunelerde SiC ün parçalanması sonucu oluşan CO gazının çıkış delikleri görülmektedir, Al₂O₃ artışıyla gaz boşlukları da artış göstermiştir. Şekil 4.20'de termal genişmeden dolayı oluşan yüzey çatlakları görülmektedir.



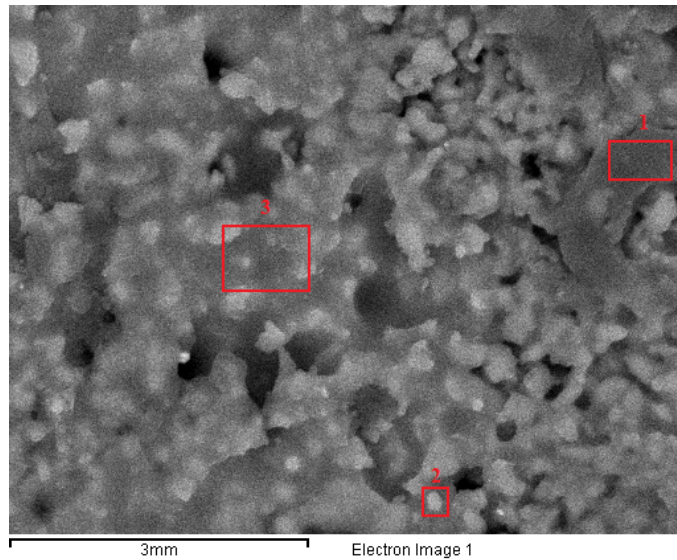
Şekil 4.25 : 1500 °C'de yapılan deneye ait %15 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1000).



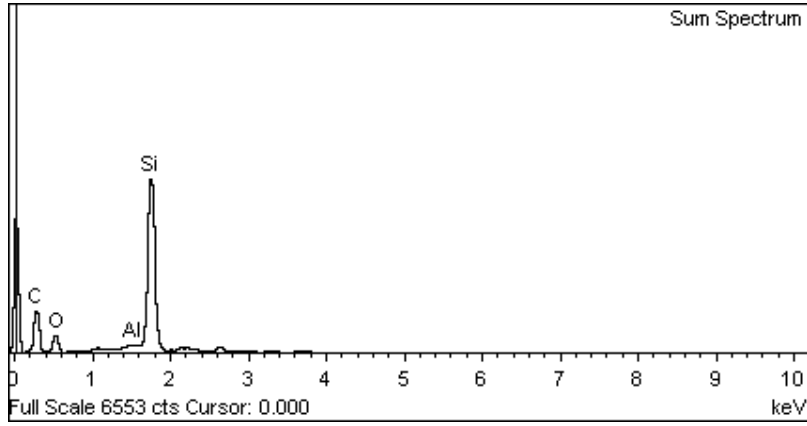
Şekil 4.26: 1500 °C’de yapılan deneye ait %15 Al₂O₃ içeren numunenin üst yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 5000).

1500 °C de %5’lik numune, en yüksek yoğunluk ve mekanik değerlere ulaşan numunedir. Şekil 4.22 incelendiğinde, malzemenin porozitesince gözle görülür bir azalma olduğu görülmektedir.

4.10 EDS Analizi



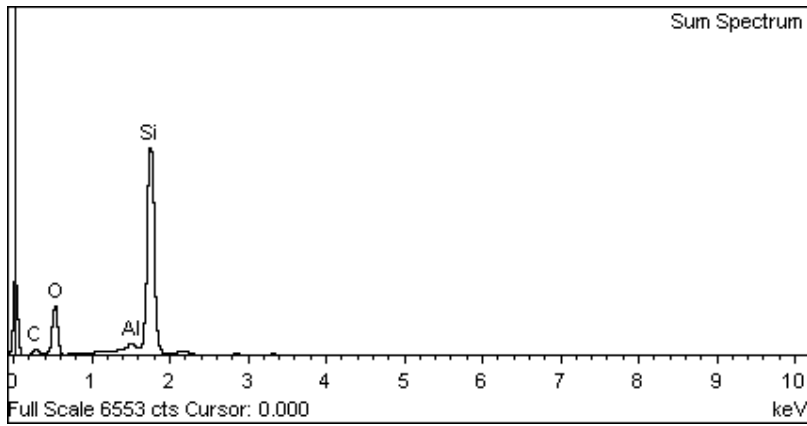
Şekil 4.27 : 1450-5 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X2500).



Şekil 4.28: 1450-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi.

Çizelge 4.5 : 1450-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.

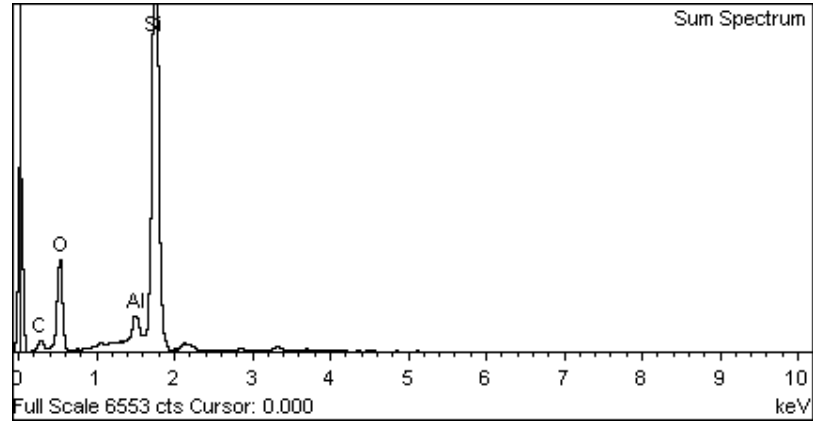
Element	Ağırlık %	Atomik %
C	40.91	58.81
O	10.43	11.26
Al	0.51	0.33
Si	48.15	29.61
Toplam	100.00	



Şekil 4.29 : 1450-5 numunesinde 2 nolu bölgenin EDS analizi.

Çizelge 4.6 : 1450-5 numunesinde 2 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	8.32	14.90
O	25.66	34.50
Al	1.26	1.00
Si	64.76	49.60
Toplam	100.00	

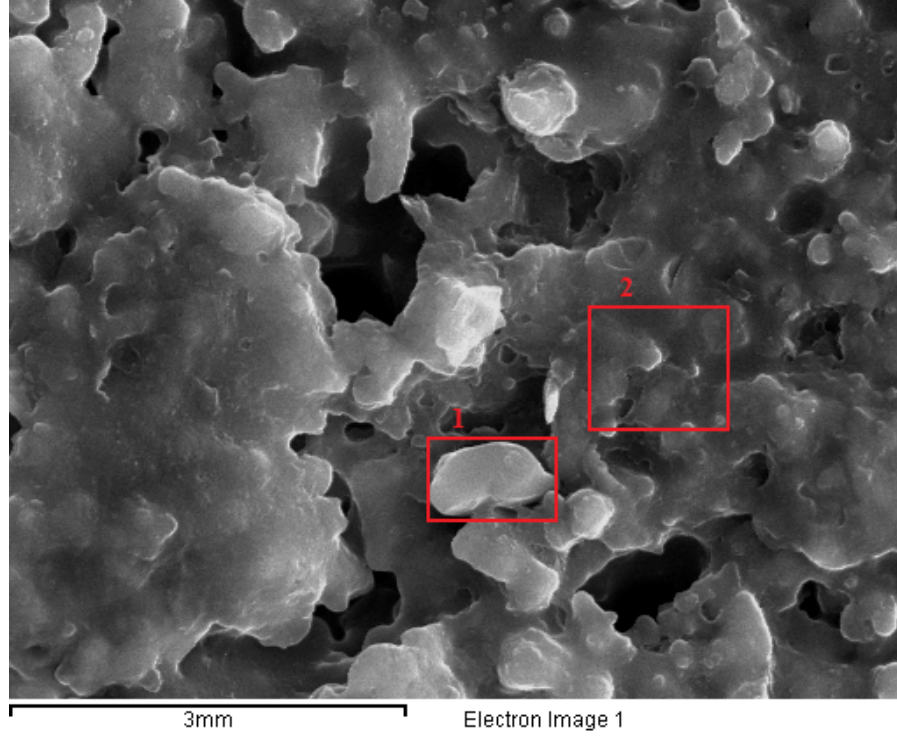


Şekil 4.30 : 1450-5 numunesinde 3 nolu bölgenin EDS analizi.

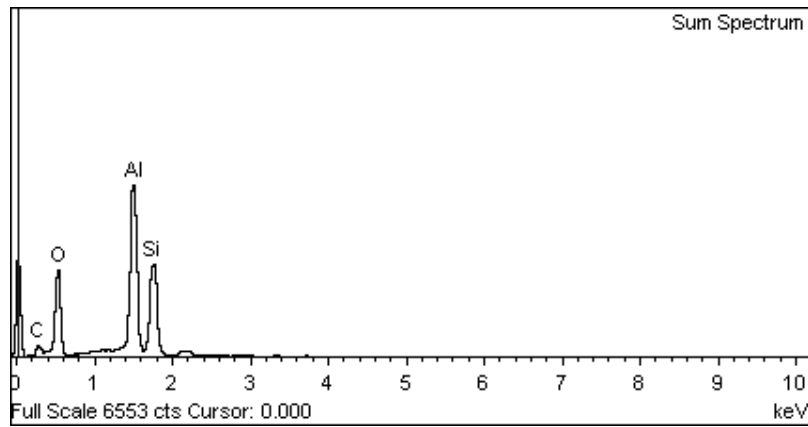
Çizelge 4.7 : 1450-5 numunesinde 3 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	7.58	13.73
O	24.97	33.94
Al	3.19	2.57
Si	64.25	49.75
Toplam	100.00	

1400-5 numunesin üzerinde farklı noktalar üzerinde yapılan EDS analizinde, SiC ve Al_2O_3 'ün sistemdeki dağılımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında açık renkli bölgelerde SiO_2 ve Al_2O_3 'ün yoğun olarak bulunduğu, koyu olan bölgelerde ise SiC miktarında artma olduğu gözlenmektedir. Bu bilgiler ışığında $1450\text{ }^{\circ}C$ ' de SiO_2 , Al_2O_3 ve SiC'ün birbiri içinde kısmen çözündüğü sonucuna varılmıştır.



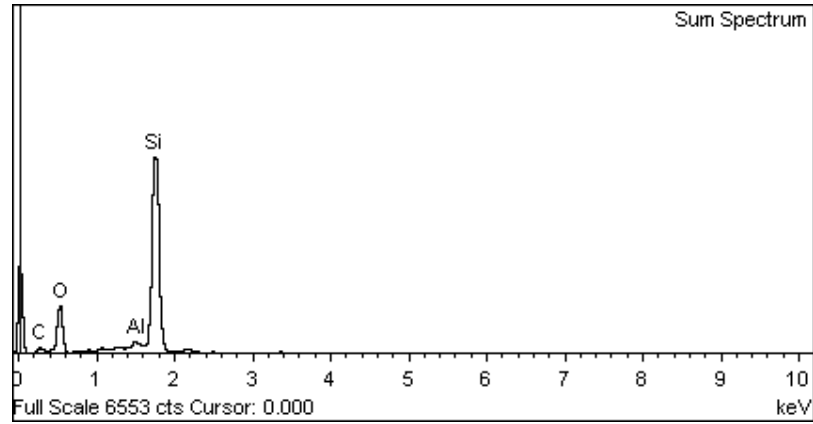
Şekil 4.31 : 1450-5 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X5000).



Şekil 4.32 : 1450-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi.

Çizelge 4.8 : 1450-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	8.82	15.09
O	31.12	39.97
Al	33.67	25.64
Si	26.39	19.30
Toplam	100.00	

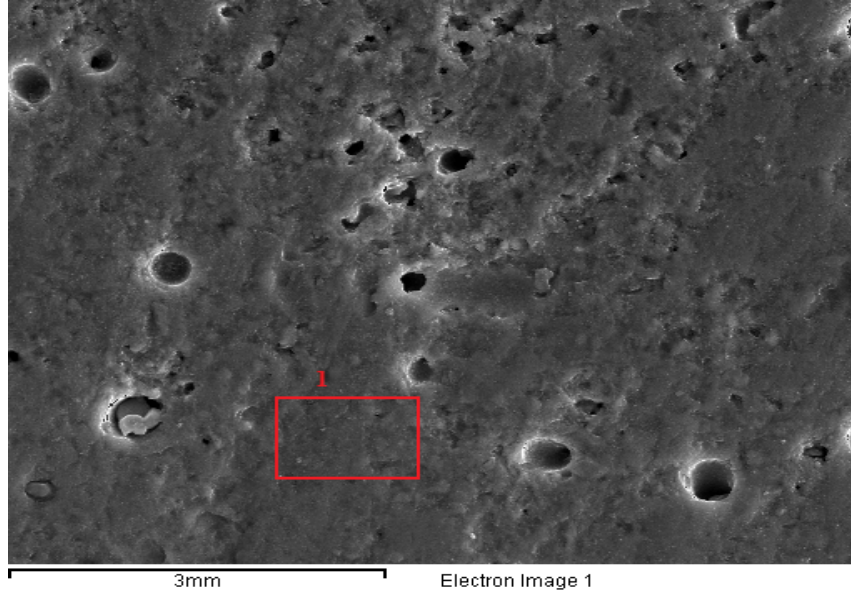


Şekil 4.33 : 1450-5 numunesinde 2 nolu bölgenin EDS analizi.

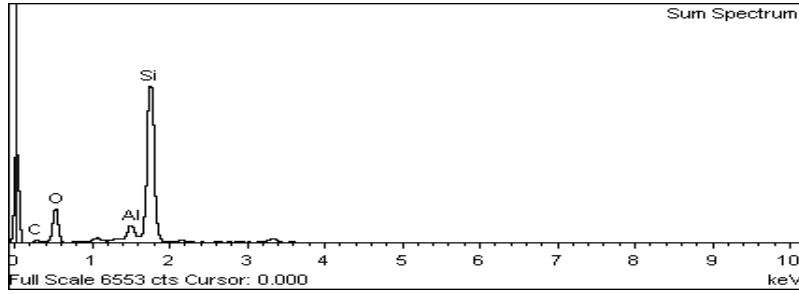
Çizelge 4.9 : 1450-5 numunesinde 2 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	7.19	13.03
O	25.60	34.84
Al	1.44	1.17
Si	65.76	50.97
Toplam	100.00	

Analiz sonucunda şekil 4.31’de 1 nolu bölgede Al_2O_3 tanesi görülmektedir, 2 nolu bölgede ise yoğunlukla SiO_2 vardır.



Şekil 4.34 : 1500-5 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X1000).

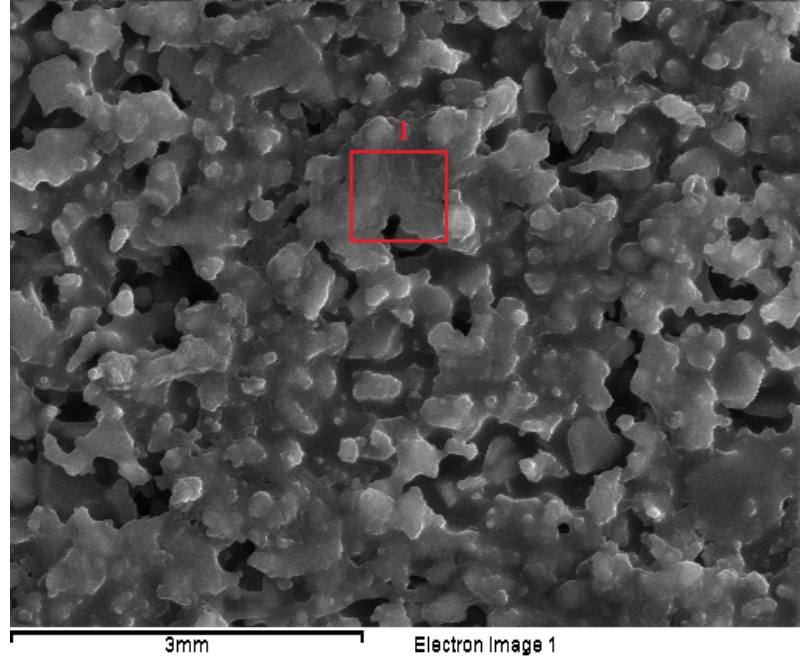


Şekil 4.35 : 1500-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi.

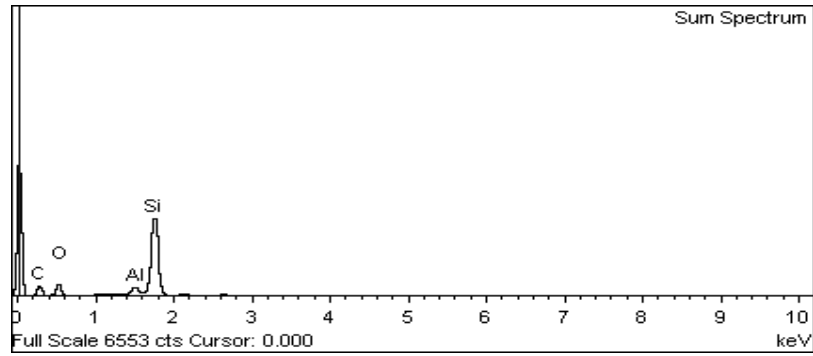
Sıcaklık artışıyla oksitlenmenin arttığı analiz sonucu artan oksijen oranlarından görülmektedir.

Çizelge 4.10 : 1500-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	4.51	8.47
O	24.19	34.11
Al	4.05	3.39
Si	67.25	54.03
Toplam	100.00	



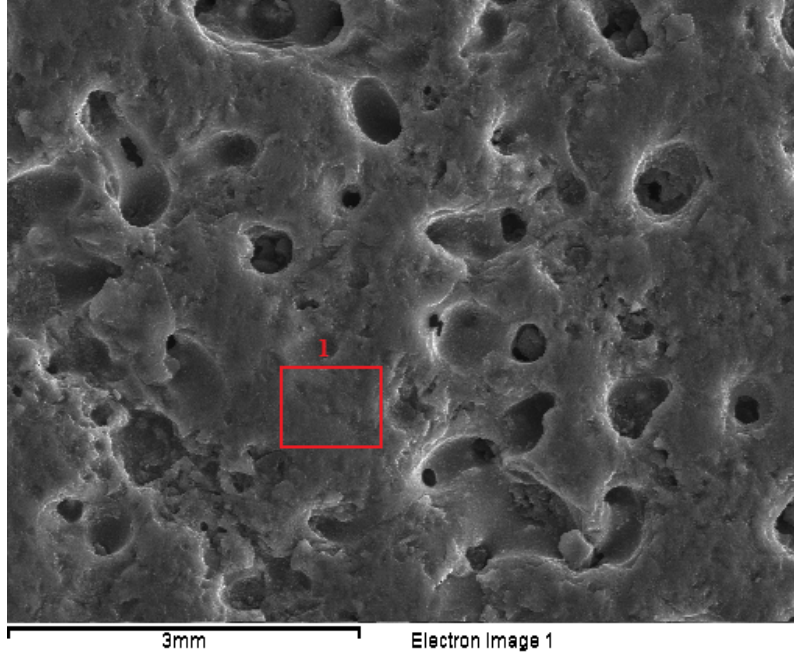
Şekil 4.36 : 1450-15 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X2500).



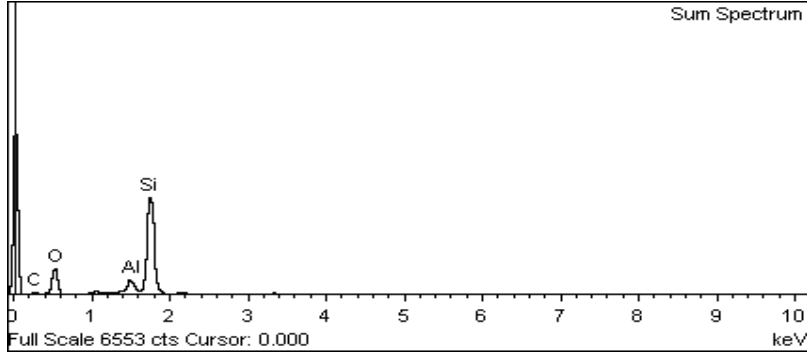
Şekil 4.37 : 1450-15 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi.

Çizelge 4.11 : 1500-5 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	25.71	41.21
O	14.93	17.97
Al	3.90	2.78
Si	55.46	38.03
Toplam	100.00	



Şekil 4.38 : 1500-15 numunesinde EDS analizi yapılan noktalar (X1000).



Şekil 4.39 : 1500-15 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi.

Çizelge 4.12 : 1500-15 numunesinde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucu.

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	5.22	9.56
O	27.26	37.44
Al	5.34	4.35
Si	62.18	48.65
Toplam	100.00	

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

1. Bu çalışmada Alman H.C.Starck firmasından temin edilen SiC tozlarına, Eren Balata firmasından temin edilen Al_2O_3 tozundan hacimce %5, %10, %15 oranlarında katılmış, elde edilen toz karışımı 1400,1450 ve 1500 $^{\circ}C$ 'de 1 saat süreyle oksitli sinter fırınında sinterlenmiştir.
2. Sıcaklığın, sinterleme proseslerinde çok önemli bir etkisi olduğu literatürle uyumlu olarak bu çalışmada da görülmüştür. Sıcaklık arttıkça, kompozitin sinterlenme kabiliyeti, dolayısıyla da yoğunluğu artmaktadır. 1500 $^{\circ}C$ 'de 1 saat süreyle sinterlenen %10 ve %15 Al_2O_3 içeren numunelerde %86 yoğunluk değerine ulaşılmıştır.
3. Alumina katkısı, silisyum karbürün sinterlenme özelliğini olumlu yönde etkilemektedir. Kompozit içindeki Al_2O_3 oranı arttıkça, elde edilen rölatif yoğunluk değerleri artmıştır.
4. Kompozit içindeki alumina miktarı arttıkça, malzemenin sertliğinde artış görülmüştür. SiC'e göre daha yumuşak olan Al_2O_3 'ün sisteme katkısı sinterlenmeyi kolaylaştırdığı ve yoğunluğu arttırdığı için kompozitin sertliğini de yüksek değerlere taşımıştır. 1500 $^{\circ}C$ 'de 1 saat süreyle sinterlenen % 85 SiC - %15 Al_2O_3 numunesinde 1978 Vickers ortalama sertlik değerine ulaşılmıştır.
5. Kompozit içindeki alumina miktarı arttıkça, malzemenin eğme mukavemetinde 1500 $^{\circ}C$ 'ye kadar artış görülmektedir, 1500 $^{\circ}C$ 'de ise alumina katkısı eğme mukavemetine olumsuz etki göstermiştir.
6. Sıcaklığın artışıyla, sinterleme esnasında oluşan katı bağ sayısı artmış, porozite azalmış ve bu da malzemenin mekanik özelliklerine olumlu yönde etki etmiştir.

7. XRD analizleri sonucunda SiC ve aluminanın yanı sıra SiC'ün oksitlenmesi sonucu açığa çıkan SiO₂'nin de oluştuğu gözlenmiştir.

5.2 Öneriler

1. Yapılan çalışmada SiC'ün oksitlendiği ve bu durumunda genel olarak kompozitin özelliklerini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle sinterleme ortamının oksijen içermeyen kontrollü gaz veya vakum ortamında yapılması araştırılabilir.

2. Al₂O₃ oranının arttırılması kompozitlerin özelliklerinde olumlu ve olumsuz etkiler meydana getirmiştir. Bu durum göz önünde alınarak Al₂O₃ miktarını değiştirerek yeni bileşimlerde kompozitlerin üretimi gerçekleştirilebilir.

3.Seramik kompozit malzemelerin korozyon, aşınma dayanımı ve termal genleşmeleri incelenebilir.

4. Benzer çalışmalar, Al₂O₃ yerine nitrür,karbür ve oksit esaslı farklı katkılarla gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Spohn, M. T.**, 1994: Boron Carbide, *Minerals Review*, **6**, p. 113-115.
- [2] **Zawrah, M. F. and Shaw, L.**, 2003: Liquid-phase sintering of SiC in presence of CaO, *Ceramics International*, **30**, p. 721-725.
- [3] **Turan, E.**, 2004: Bor-Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Sıcak Presleme İle Elde Edilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Avcı, Ş.**, 1996: Seydişehir Alüminasının Sinterlenebilirliğinin Araştırılması Ve Tane Büyüme Kinetiğinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] **Emrulloğlu, Ö. F., Çilha, E., Emrulloğlu, S. B.**, 2005. Alümina SiC Seramik Kompozit Üretimi, *IV Uluslararası Toz Metalürjisi Sempozyumu*, Sakarya, Türkiye, Mayıs 18-22.
- [6] **Emrulloğlu, Ö. F., Örencik, S.**, 2006: Muhtelif Katkıları Seydişehir Alüminasının Sinterlenme Davranışlarına Etkisi, *A.K.Ü., Müh. Fak., Ser. Müh., VI Uluslararası Katılımlı Seramik Kongresi, Bildiriler Kitabı*, p. 13-18.
- [7] **Başman, G., Atar, E., Kayalier, S.**, 2001: Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışı, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Metalurji Dergisi*, Sayı 127, p. 39, Aralık.
- [8] **Büyükuncu, G.**, 2000: Bor karbür/silisyum Karbür Kompozitlerinin Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **Öztürk, M.**, 2007: SiC İlaveli Alumina Seramik Kompozitler, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [10] **White, B W.**, 1990: Basic Science of Advanced Ceramics, *Handbook of Advanced Ceramics*, Vol. **1**, Materials Science Materials Research Institute, The Pennsylvania State University, PA 16802, USA.
- [11] **İpek, M.**, 2005: İki Farklı Yolla Üretilmiş Alümina-Zirkonya Kompozitlerin Sinterlenme Ve Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [12] **Taşkın, E.**, 2005: Boksitten Alümina Ekstraksiyonuna Mekanik Aktivasyonun Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- [13] **Birol, B., Sarıdere, M.N.**, Özel Alüminalar-2 Alüminyum Hidroksit Ve Aktif Alüminalar, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri ve Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [14] **Öğünç, H.**, 2006: Sıcak Presleme Sinterlenmiş alfa SiC Matriksli B₄C Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Weimer A. W.**, 1997: *Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing*, Chapman & Hall, London.
- [16] **Url-1** <<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=15>> , 16.05.2009
- [17] **Yıldırım, İ.**, 2003: Al₂O₃ ve SiC'ün Mukavemet Özellikleri Üzerine Üretim Şartları ve Bileşimin Etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **Mingü, K.**, 2002: Alümina Esaslı Dökülebilir Refrakterlerin SiC ve C İlavesi ile Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Emrulloğlu, S.B., Gül, S., Emrulloğlu, Ö.F.**, 2005. Kullanılmış SiC Kasetlerden Dökülebilir Refrakter Üretimi, *I. Endüstriyel Fırınlar ve Refrakter Sempozyumu*, Sakarya, Türkiye, Mart 24-26.
- [20] **Zhu, X., Jiang, D., Tan, S.**, 2003: Reaction Bonding OF Open Cell SiC-Al₂O₃ Composites, *Metaterials Research Bulletin*, **36**, 2003-2015.
- [21] **Munro, R.G.**, 1997: Material properties of a sintered α -SiC, *J.Phys.*, **26 (5)**, 1195-1203.
- [22] **Tanaka, H.**, 1991: Silicon Carbide Ceramics – 1, *Elsevier Applied Science*, New York, p. 231-238.
- [23] **Url-2** <<http://www.cercom.itu.edu.tr/>> , 20.05.2009
- [24] **Prochazka, S.** 1976: Sintering of silicon carbide in *Mass Transport Phenomena in Ceramics* , p. 421-431, Eds. Cooper, A.H., Heuer, A. H.
- [25] **Url-3** <http://www.dynacer.com/silicon_carbide.htm> , 21.05.2009
- [26] **Kingery, W. D., Bowen, N. K., and Uhlmann, D. R.**, 1976: *Introduction to Ceramics*, A Willem Inter Science Publication. New York.
- [27] **Richerson, D. W.**, 1992: *Modern Ceramic Engineering*, Published by Marcel Dekker Inc., New York.
- [28] **Upadhyaya, G. S.**, 1998: *Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties and Testing*, Noyes Publications, New Jersey.

- [29] **Cura, M.E.**, 2002: Sıcak Preslenmiş WC-Co/B₄C Kompozitlerinin Mekanik, Manyetik ve Mikroyapısal İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] **German, R. M.**, 1996: *Sintering Theory and Practice*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [31] **ZHU, X., JIANG, D., TAN, S.**, 2003 : “Reaction Bonding of Open Cell SiC- Al₂O₃ Composites”, *Metarials Research Bulletin*, 36, 2003-2015.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Burak BAKAR

Doğum Tarihi : 03.07.1983

Doğum Yeri : Kdz. Ereğli

Lise : 1994-2001 Kdz.Ereğli Anadolu Lisesi

Lisans : 2002-2007 İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Y. Lisans : 2007-2009 İstanbul Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Programı