

**UÇUCU KÜL KULLANILARAK
BOR KATKILI ANORTİT ÜRETİMİ**

Uğur AYDOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2006
ANKARA**

Uğur AYDOĞAN tarafından hazırlanan UÇUCU KÜL KULLANILARAK BOR KATKILI ANORTİT ÜRETİMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Metin GÜRÜ

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Suna BALCI

Üye : Prof. Dr. Vecihi PAMUK

Üye : Doç. Dr. Metin GÜRÜ

Üye : Doç. Dr. İrfan AR

Üye : Doç. Dr. Ayhan MERGEN

Tarih : 15 / 06 / 2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Uğur AYDOĞAN

**UÇUCU KÜL KULLANILARAK
BOR KATKILI ANORTİT ÜRETİMİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Uğur AYDOĞAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mayıs 2006

ÖZET

Bu çalışmada, elektronik endüstrisinde entegre devre altlık malzemesi olarak kullanılan anortit seramik malzeme, termik santral uçucu külü ve bor (borik asit) kullanılarak toz metalurjisi yöntemleri ile üretilmeye çalışılmıştır. Katkısız ve farklı oranlarda (%2, %4 ve %6) borik asit katkısı kullanılarak elde edilen numuneler 900°C – 1300°C sıcaklıkları arasında sinterlenmiş ve sinterlenen pelletler XRF, XRD, SEM kullanılarak karakterize edilmiştir. XRF analizleri, üretilen numunelerin bileşiminin anortite yakın olduğunu, ancak anortit yanında safsızlıklar içerdiğini göstermiştir. Bu safsızlıklar anortit üretiminde kullanılan uçucu külden kaynaklanmıştır. XRD analizleri sonucunda 900°C’de anortit oluştuğu ve sıcaklık arttıkça anortit miktarının arttığı ancak, 1200°C’de yapı hemen hemen tamamen anortite dönüşmesine rağmen, tek fazlı anortit yapısı elde edilemediği görülmüştür. Borik asit katkısının anortit oluşumunu hızlandırdığı, ancak yüksek bor oranının anortit oluşumunu çok fazla etkilemediği tespit edilmiştir. SEM incelemeleri, genelde bor katkılı numunelerin katkısızla göre daha uniform bir yapıya sahip olduğunu, ancak borik asit katkısının artmasıyla yapıda kısmi ergimelerin arttığını 1200°C’de hem katkılı hem de katkısız numunelerde ergimenin meydana geldiği ve yapının yüksek oranda camsı faz içerdiğini göstermiştir. Borik asit katkılı ve katkısız numunelerin yoğunluk ölçümleri, yoğunluk ile sıcaklık ve borik asit katkısı arasında kararlı bir değişimin olmadığını göstermiştir. Borik asit katkılı ve

katkısız numunelerde elde edilen maksimum relatif yoğunluk değeri yaklaşık %61 olarak saptanmıştır. Daha yüksek yoğunluk değeri elde etmek için 1300°C’de yapılan sinterleme işleminde, numuneler ergidiğinden bu numunelerin karakterizasyonu mümkün olmamıştır.

Bilim Kodu	: 1.094
Anahtar Kelimeler	: Uçucu kül, anortit, borik asit
Sayfa Adedi	: 66
Tez Yöneticisi	: Doç. Dr. Metin GÜRÜ

**ANORTHITE PRODUCTION FROM FLY ASH WITH
ADDITION OF BORON**

(M.Sc. Thesis)

Uğur AYDOĞAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2006

ABSTRACT

In this study, anorthite ceramic, used as base material of integrated circuit in electronics industry, is tried to produce from fly ash of thermal power station with addition of boric acid by means of powder metallurgy. The specimens that was produced with addition of different amounts of boron (2%, 4% and 6%) and without boron were sintered between 900°C – 1300°C and characterised using XRF, XRD and SEM. XRF results indicated that the composition of the specimens were near to the anorthite composition but they also contained high amounts of impurities. These impurities were due to fly ash that was used in the anorthite production. XRD analysis revealed that anorthite is formed at 900°C and its amount is increased with temperature. However, no single phase of anorthite was obtained eventhough it was about completely transformed to anorthite at 1200°C. Boric acid addition accelerated the formation of anorthite but high levels of boron did not have a significant effect on anorthite formation. SEM analysis showed that boron added samples had more uniform microstructure than boron free samples. Nevertheless, as the boron content was increased, the partial meltings rised and at 1200°C both boron added and boron free samples contained significant amount of glassy phase. Density measurements of boron contained and boron free specimens indicated that there were no consistent relation between density and temperature and density and boron content. The maximum relative density obtained in boron added and

boron free samples was around 61%. In order to obtain higher density value, the specimens were subjected to further sintering at 1300°C and resulted in melting. Therefore it was not possible to characterise those specimens.

Science Code : 1.094
Key Words : Fly ash, anorthite, boric acid
Page Number : 66
Adviser : Assoc.Prof.Dr. METİN GÜRÜ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Doç. Dr. Metin GÜRÜ'ye, ayrıca manevi desteklerini esirgemeyen eşime, değerli dostum Kimya Yüksek Mühendisi Murat BİLEN'e ve mesai arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı'nın 2001K120590 No.'lu DPT projesi kapsamında yürütülen bu tez çalışmasına desteklerinden dolayı Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı'na ve değerli yöneticilerine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. SERAMİK MALZEMELER	4
2.1. Seramiklerin Sınıflandırılması	5
2.1.1. Geleneksel seramikler.....	7
2.1.2. İleri teknoloji seramikleri	8
2.2. Seramiklerin Kullanım Alanları	10
2.2.1. Alümina seramikler ve kullanım alanları.....	10
2.2.2. Seramiklerin yeni kullanım alanları.....	12
2.3. Türkiye’deki İleri Seramik Endüstrisinin Durumu	13
3. UÇUCU KÜL	15
3.1. Uçucu Külün Tanımı	15
3.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması	15

Sayfa

3.3. Uçucu Külün Oluşumu	16
3.4. Uçucu Külün Özellikleri	17
3.4.1. Uçucu külün fiziksel ve mekanik özellikleri	17
3.4.2. Uçucu külün kimyasal özellikleri.....	18
3.5. Uçucu Külün Kullanım Alanları	20
4. BOR	22
4.1. Bor Elementi.....	22
4.2. Ticari Bor Mineralleri	23
4.3. Bor ve Ürünlerinin Başlıca Kullanım Alanları.....	24
4.3.1. Cam sanayi	24
4.3.2. Seramik sanayi	25
5. ELEKTRONİK DEVRE ALTLIK MALZEMELERİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	27
5.1. Anortitin Özellikleri	27
5.2. Anortit Üretim Yöntemleri	28
5.2.1. Sol-jel yöntemi	28
5.2.2. Toz metalürjisi yöntemi	29
5.2.3. Cam-seramik yöntemi.....	29
5.3. Anortit Şekillendirme Yöntemleri.....	30
5.3.1. Slip – döküm	30
5.3.2. Kuru presleme	30
5.3.3. İzostatik presleme	30
5.3.4. Sıcak presleme	31

Sayfa

5.3.5. Enjeksiyonla kalıpta şekillendirme	31
5.3.6. Ekstrüzyon.....	31
5.3.7. Şerit-döküm.....	32
5.4. Literatür Araştırması	32
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	37
6.1. Hammaddelerin Özellikleri	37
6.1.1. Uçucu kül	37
6.1.2. Borik asit	38
6.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar.....	41
6.3. Uçucu Külden Pellet ve Numunelerin Hazırlanması	42
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	45
7.1. Sinterlenen Pelletlerin XRF Analizleri.....	45
7.2. Anortit Oluşumunun XRD Kullanılarak İncelenmesi	46
7.3. Anortit Numunelerinin SEM İncelemesi.....	51
7.4. Yoğunluk	55
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
8.1. Sonuçlar.....	59
8.2. Öneriler.....	60
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	66

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. İleri seramik malzemelerin işlev ve uygulama alanları.....	14
Çizelge 3.1. Türkiye’deki bazı termik santral uçucu küllerinin kimyasal bileşimleri (% ağırlıkça).....	19
Çizelge 3.2. Türk standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal bileşimleri.....	20
Çizelge 4.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri.....	22
Çizelge 4.2. Ticari öneme sahip bor mineralleri.....	23
Çizelge 4.3. Başlıca rafine bor bileşikleri.....	24
Çizelge 4.4. Ürün bazında bor ürünleri kullanım alanları.....	26
Çizelge 5.1. Anortitin bazı özellikleri.....	28
Çizelge 5.2. Anortit ve alümina seramik dielektriklerin özellikleri.....	33
Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan uçucu külün kimyasal analizi.....	37
Çizelge 6.2. Deneyde kullanılan borik asitin kimyasal yapısı.....	39
Çizelge 6.3. Borik asidin tane boyutu dağılımı.....	40
Çizelge 6.4. Borik asidin bazı fiziksel özellikleri.....	40
Çizelge 6.5. Anortit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) içerisindeki oksit miktarları ve %’leri.....	42
Çizelge 6.6. Borik asit katkılı ve katkısız numunelerin ortalama tane boyutları.....	44
Çizelge 7.1. Bor katkılı ve katkısız karışımların 900°C-1300°C’lerde 2 saat sinterlendikten sonraki XRF analizi.....	45

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. Uçucu külün XRD analizi.....	38
Şekil 6.2. Borik asitin XRD grafiği (BA=borik asit).....	39
Şekil 6.3. Borik asitin DTA-TG grafiği.....	40
Şekil 6.4. Borik asit katkılı ve katkısız numunelerin ortalama tane boyutları.....	43
Şekil 7.1. 900°C - 1200°C arasında sinterlenen borik asit içermeyen (katkısız) pelletlerin XRD analizi.....	46
Şekil 7.2. 900°C - 1200°C arasında sinterlenen %2 borik asit içeren pelletlerin XRD analizi.....	49
Şekil 7.3. 900°C - 1200°C arasında sinterlenen %4 borik asit içeren pelletlerin XRD analizi.....	50
Şekil 7.4. 900°C - 1200°C arasında sinterlenen %6 borik asit içeren pelletlerin XRD analizi.....	51
Şekil 7.5. Borik asit katkılı ve katkısız pelletlerin yoğunluklarının sıcaklığa göre ve % relatif değişimi.....	56
Şekil 7.6. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen pelletlerin yoğunluklarının borik asit miktarına göre ve % relatif değişimi.....	57

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 7.1. 900°C’de Borik asit içermeyen (katkısız) ve borik asit içeren karışımların elektron mikroskobu fotoğrafları.....	52
Resim 7.2. 1100°C’de Borik asit içermeyen (katkısız) ve borik asit içeren karışımların elektron mikroskobu fotoğrafları.....	53
Resim 7.3. 1200°C’de Borik asit içermeyen (katkısız) ve borik asit içeren karışımların elektron mikroskobu fotoğrafları.....	54

1. GİRİŞ

Seramikler, sahip oldukları mekaniksel, termal ve elektriksel özellikleri dolayısıyla çok önemli ve stratejik malzemelerdir. Seramik malzemeler son 20 yılda endüstriyel olarak çok yaygın kullanım alanı bulmuştur [1]. Özellikle elektronik ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak 1980'li yıllardan itibaren başta savunma sanayi, makine ve kimya sanayi gibi sektörlerde metal malzemelere alternatif malzeme olarak hatta tamamen seramik malzemeler kullanılmaya başlanmıştır [2]. Bu süreç, günümüzde yeni seramiklerin geliştirilerek yeni uygulama alanlarında kullanılması ile sürmektedir.

Malzeme bilimi alanındaki çalışmalar, özellikle seramik ve kompozit malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır. Malzeme biliminde araştırma-geliştirme faaliyetleri çok pahalı yatırımlar gerektirmektedir. Bu nedenle bu sektörde söz sahibi olanlar ekonomileri güçlü olan ülkeler ve firmalardır. Özellikle Amerika ve Japonya gibi teknoloji devi ülkelerde gerek üniversiteler gerekse özel araştırma-geliştirme laboratuvarları milyonlarca dolarlık bütçeleri ile yeni seramik malzemelerin elde edilmesi ve mevcut olanlarında kullanım alanlarına göre dezavantaj teşkil eden birtakım özelliklerinin iyileştirilmesi yönünde büyük bir hızla çalışmaktadırlar.

Dünya seramik sektöründe bu gelişmeler olurken ülkemiz seramik sektöründe aynı hızda bir gelişmenin olduğu söylenemez. Çünkü daha önce de belirtildiği gibi malzeme bilimi önemli miktarda maddi kaynak akışı gerektirmektedir. Bu da gelişmekte olan ülkeler için istenilen oranda mümkün olmamaktadır. Ülkemiz seramik sektörü daha çok geleneksel seramikler olarak adlandırılan yer ve duvar karosu, vitrifiye ürünler, porselen cam ürünleri alanında gelişmiştir. İleri teknoloji seramikleri alanında özellikle son yıllarda önemli çalışmalar yapılmaktadır.

Elektronik endüstrisinde son zamanlarda meydana gelen gelişmeler çok yüksek hızla sahip bilgisayarların, daha kompakt elektronik cihazların ve yüksek frekans aygıtlarının kullanılması yönündedir. Bu ise, bu tür cihazlarda devreleri desteklemek amacıyla kullanılan devre altlığının daha düşük dielektrik sabitine ve dielektrik

kayıplarına ve yüksek elektriksel yalıtkanlığa sahip olmasını gerektirir. Ayrıca, kullanılan devre altlıklarının düşük ısı genleşme katsayısına ve düşük pişme sıcaklığına sahip olması gerekmektedir [3].

Bu amaçla geliştirilen ve ilk olarak IBM tarafından yarı iletken sektöründe altlık olarak kullanılan malzemelerden biri kordiyerit ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) ve kordiyerit bazlı cam seramiklerdir [4]. Düşük ısı genleşme katsayısı ($4,82 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), alüminadan düşük dielektrik katsayısı (1 MHz’de 6,2) sebebiyle elektronik endüstrisinde altlık olarak kullanılmaya uygun malzemelerden birisi de anortit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) polikristalin seramiklerdir [5, 6].

Ülkemizde toz kömür kullanılarak yapılan elektrik üretimi, enerji üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Bu üretim sonucu açığa çıkan uçucu kül miktarı milyon tonlarla ifade edilmektedir. Ülkemizde kullanım açısından, endüstriyel atıklar içerisinde en büyük potansiyeli uçucu kül oluşturmaya rağmen, bunun ancak %25’i tuğla, çimento ve beton yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca, son zamanlarda uçucu kül, üzerinde çok çalışılan ve geniş kullanım alanı bulan cam-seramiklerin üretiminde de kullanılmaktadır [7-8]. Uçucu kül, fiziksel ve kimyasal yapısı nedeniyle cam-seramik endüstrisi için bir hammadde kaynağı olabilecek özellikler taşımaktadır. Ayrıca, ucuz ve bol bulunması da önemli avantajlarıdır. Bu nedenlerden dolayı, cam-seramik üretiminde uçucu kül kullanımı, hem çevre kirliliğini önlemede hem de bu sektöre ucuz ve bol hammadde kaynağı sağlaması yönünden değerlendirilmesi gereken bir konudur.

Ayrıca, dünya bor rezervinin %72’sine sahip olan ülkemiz için bor madeni “stratejik” bir hammadDEDİR. Bor madenleri, uzay teknolojilerinden bilişim sektörüne, nükleer teknolojiden savaş sanayine ve tarım, kozmetik, cam, seramik, deterjan, sağlık sektöründen enerji sektörüne 4000’in üzerinde ürün çeşidinde kullanılmakta olan bir madendir [9]. Çok çeşitli sektörlerde kullanılan bor mineralleri ve ürünlerinin kullanım alanları genişleyerek artmaktadır. Ülkemizde bor tüketimin artırılması ve bora dayalı sanayinin geliştirilmesi bu açıdan oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, ülkemiz termik santrallerinden üretilen uçucu küller ve en önemli maden varlığımız olan bor kullanılarak ileri teknoloji uygulamalarına yönelik anortit seramik malzeme üretilmesi hedeflenmiştir.

2. SERAMİK MALZEMELER

Seramik kelimesi, Yunanca, pişirilmiş eşya anlamına gelen "keramos" kelimesinden gelmektedir. Seramik üretimi eski çağlardan beri gerçekleştirilmekte olup arkeolojik buluntular seramik üretiminin M.Ö. 6500 yıllarına tarihlenebileceğini ortaya koymuştur [10].

Seramik malzemeler farklı bileşimde kristal ve cam yapılı fazları içermekte ve genellikle gözenek ihtiva etmektedirler. Bu farklı yapı bileşenlerinin miktarı ve dağılımları seramik malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin, yapıda mevcut fazların yerleşim düzenini değiştirmek, yalıtkan olan bir seramik malzemeyi iletken hale getirmekte veya bunun tersi olabilmektedir. Bu nedenle, seramik malzemelerin geliştirilmesi konusunda ana fikir, mikroyapı üzerine yoğunlaşmıştır [10].

Japonların porselen konusundaki üstünlükleri, II. Dünya savaşından önce tüm uluslarca bilinmektedir [10]. Savaş sonrası, refrakter tuğladaki Japon teknolojisinin, çelik endüstrisinin gelişmesinde önemli katkısı olmuştur. Seramik alanındaki bu gelişmeler geleneksel seramikler konusunda araştırma ve geliştirmeye büyük önem vermektedir. Günümüzde seramik malzemelere ilginin artmasının başlıca nedenleri aşağıda belirtilmiştir [11].

- a) Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık,
- b) Kimyasal kararlılığın yüksek olması,
- c) Çok sert olmaları,
- d) Metallerden hafif olmaları (% 40 mertebesine varan),
- e) Hammadde olarak bol miktarda bulunması ve genellikle metallere kıyasla ucuz olması,
- f) Pahalı ve stratejik metallere ihtiyaç göstermemesi,
- g) Erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları,
- h) Oksitlenmeye karşı dirençlerinin yüksek olması,
- i) Sürtünme katsayısının düşük olması,

j) Basma kuvvetinin yüksek olması.

2.1. Seramiklerin Sınıflandırılması

Genel olarak tanımlandığında, seramik kapsamına metalik ve organik esaslı olmayan tüm malzemeleri almak mümkündür. Bu bakımdan özellikle doğada bol miktarda bulunan metal oksitleri başta olmak üzere silikatlar, karbürler, nitrürler, borürler, camlar, cam-seramikler ve çimento türündeki malzemeler seramik sınıfına girmektedirler. Ayrıca seramik malzemelerin kendi aralarında metallerle ve polimerlerle yaptıkları birleşimlerle "kompozit malzemeler" oluşturmaları mümkündür.

Seramik malzemelerin ortak özelliği, bu malzemelerin atomları arasındaki bağlanmanın iyonik, kovalent ya da karma olarak ortaya çıkmasıdır. Bu güçlü bağ sınıfından dolayı seramikler genelde ısıya ve korozyona dayanıklı malzemeler olarak bilinirler. Ancak bu güçlü bağların bu malzemelerde oluşturduğu kırılganlık özelliği de seramiklerin bir zaafı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu malzemelerde iç yapıda bulunabilecek en küçük bir hata, çatlak oluşmasına neden olur. Çatlaklar ise özellikle çekme gerilmesi altında hızla ilerleyerek malzemelerin kırılmalarına yol açar. Birçok seramik malzemedeki atomlar arası bağlanmadan dolayı elektronlar lokalize olarak ısı ve elektriği yapı içinde iletmezler [12]. Bu özelliğiyle bazı seramikler ısı yalıtımında ve elektrik izolasyonunda yaygın olarak kullanılırlar.

Seramikler genel olarak metallerin oksit, nitrür, karbür ya da borür bileşeni olduklarından, kristal yapılan metallerle nazaran daha karmaşık bir durum oluşturur [2]. Bazı durumlarda seramiklerde kristal ve amorf yapının bir kombinasyonu da görülebilmekte ve iç yapının kontrollü olarak istenen yönde tasarımı yapılabilmektedir. Bu bakımdan, seramiklerin bileşim ve mikroyapı açısından istenen kimyasal, fiziksel, ısı, mekanik ve elektriksel ihtiyaçlara göre tasarımlarını mümkün kılar.

Özellikle gelişen teknolojilerin getirdiği tasarım kolaylığıyla arzu edilen niteliklere sahip kritik seramik malzeme oluşturulması en önemlileri bilgisayar, iletişim, elektronik ve mikro elektronik gibi dallarda yeni teknolojiler gelişmesine yol açmıştır [2].

Seramik malzemeleri geleneksel ve yüksek teknoloji seramikleri olarak iki ana grupta incelemek mümkündür. Geleneksel seramikler grubuna kilden mamul sıhhi gereçler, fayans, karo ve porselenler, tuğla ve kiremitler ve elektrik izolatör malzemeleri, refrakterler, camlar ve çimento malzemeleri girmektedir. Yüksek teknoloji seramikleri için ise, zaman zaman "modern seramikler", "mühendislik seramikleri", "ince seramikler", "teknik seramikler", "ileri seramikler" gibi tanımlarda kullanılmaktadır. Bu grup seramikler, "yapısal seramikler" ve "fonksiyonel seramikler" diye ikiye ayrılmaktadır.

Seramik malzemelerin üretim süreçleri önemli benzerlikler gösterirler. Her şeyden önce doğal hammaddenin öğütülmesi, işlenmesi, uygun katkılarla homojen karışımlar haline getirilmesi gerekir [11].

Geleneksel killer şekillendirme sırasında su kullanılırken, modern uygulamalarda yoğunlaştırma aşamasında uçuşan organik polimer bağlayıcılar katkı olarak kullanılır [11]. Daha sonra uygulamada istenen şekle göre, döküm, enjeksiyon kalıplama, kuru presleme, soğuk izostatik presleme gibi tekniklerle malzeme en son formuna getirilir. Bu aşamadan sonra malzemenin plastikliği için katılan maddelerin bünyeden tamamen atılarak, yoğunlaşması için pişirilmesi veya sinterlenmesi, süreci başlatılır [11]. Ergime sıcaklığı altında malzemelerin pişirilmesi teknik terim olarak "sinterleme" olarak bilinir ve malzemenin yoğunlaşması, toz parçacıkların birleşmesi, kaynaması, gözeneklerin kapanması ve malzemenin büzülerek çekmesi bu süreç sırasında oluşur. Bu aşama sonucu elde edilen malzeme küçük düzeltme, parlatma ve diğer mekanik işlemlerden sonra doğrudan uygulamaya hazır haldedir [2].

2.1.1. Geleneksel seramikler

Kilden mamul ürünler

Kaolen ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), feldspat (K_2O veya Na_2O , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), kuvars (SiO_2), diğer minerallerin kombinasyonu neticesinde elde edilen ürünler bu sınıfta nitelendirilir.

Piştirme kapları, porselenler, süs ve dekorasyon eşyaları, banyo ürün ve aksesuarları, sağlık gereçleri, fayanslar, tuğla ve benzeri yapı malzemeleri bu tipik uygulamalara örnek gösterililebilir [12, 13].

Refrakterler

Yüksek alüminalı, silika-alümina esaslı, magnezit (%80-90 MgO , Fe_2O_3 ve Al_2O_3) krom-magnezit esaslı (%60 MgO , Cr_2O_3 ve Fe_2O_3), fosterit (%57 MgO , %54,3 SiO_2), spinel (%72 Al_2O_3 , %28 MgO), süper refrakterler (%50-95 SiC , kuvarz kil), zirkon esaslı (%66 ZrO_2 , %33 SiO_2) olarak grup ve tiplere ayrılan refrakter malzemeler fırınlarda kaplama olarak, ısısal yalıtımda, potalarda, metal üretim malzemeleri olarak, filtre, kalıp ve ısıtma elemanları olarak son derece önemli uygulamaları olan seramiklerdir [13, 14].

Camlar

Pencere ve şişe camları olarak bilinen $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ az miktarda renklendiricilerle üretilirler. Bunların yanı sıra %14-30 PbO içeren optik ve x-ışınlarından korunma amaçlı yüksek refraktif indekse sahip camlar yaygın olarak kullanılır [2, 10]. Cam yapısındaki alkali ve Ca iyonlarının B^{+3} iyonu ile değiştirilmesi neticesinde ısı genleşmesi çok düşük ve korozyona dayanımlı Pyreks olarak da bilinen camlar elde edilir. Genellikle tüp, boru, basınç göstergeleri, laboratuvar alet ve gereçleri ve elektrik yalıtım malzemeleri olarak kullanılırlar [2, 13].

Çimentolar

Genelde kalsiyum silikatlardan oluşan bileşimlerdir, yapıları $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ve bunlara ilâve Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO ve SO_3 içerir. Bu yapılarda sertleşme su ile reaksiyon sonucu oluşan jelimsi yapının parçacıkları birbirine bağlayarak kompozit bir oluşuma yol açması ile olur. Yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar için kalsiyum alüminat çimentoları veya fosfatlı çimentolar kullanılırlar [12, 13].

2.1.2. İleri teknoloji seramikleri

Yüzyılımızın en çarpıcı bilimsel gelişmeleri sonucu ortaya çıkan yüksek teknoloji ve buna bağlı yepyeni uygulama alanı arasında "Yüksek Teknoloji Seramikleri" nin özel bir yeri vardır. Bilgisayar teknolojisinin süratli gelişiminde entegre devre paket altlıklarında kullanılan üstün ısı özelliklere sahip seramik malzemelerin büyük rolü olmuştur [1].

Yapısal seramikler

Seramik malzemelerin kırılma dayanımı ve aşınma direnci gibi mikroyapısal değişkenlerin etkilenen özellikleri ile sertlik, yoğunluk, ısıl dayanım, yüksek elastik modül gibi kristal yapısı ve atomlar arası bağlanmadan etkilenen özelliklerinin önem kazandığı uygulamalarda kullanılan seramiklere "yapısal amaçlı yüksek teknoloji seramikleri" denmektedir [2]. Bu grupta özellikle Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 , SiC , B_4C , CBN , TiC , TiB_2 , TiN , AlN gibi seramikler tek veya çiftli, üçlü veya daha fazla elemanların kombinasyonu ile oluşan kompozitler olarak göze çarpmaktadır [2,16].

Tekstil makinelerinde kullanılan aşınmaya dayanıklı sentetik iplik kılavuzları, yüksek hızlı torna tezgahlarında kullanılan kesici seramik takımlar, otomobillerde hızlı ivme sağlayıcı turbo yükleyici, madencilik, çimento sektörü, hafif balistik yelek ve zırhlı araç koruyucu kaplamalarda, modern aç-kapa mekanizmalı musluk, spor malzemeleri uygulamaları yapısal amaçlı yüksek teknoloji seramik malzemeleri

grubuna giren örneklerden bazılarını oluşturmaktadırlar.

Yapısal yüksek teknoloji seramiklerinin en önemli çağdaş kullanımlarına bir örnek olarak içten yanmalı motorlarda uygulamaları verilebilir. Günümüzde Japonya ve Almanya'da silikon nitrür esaslı turbo-yükleyici motorların kullanılmasına çalışılmaktadır [1].

Fonksiyonel seramikler

Malzemelerin dielektrik, elektriksel ve ısı yalıtkanlık, manyetik ve iletkenlik gibi maddenin elektronik yapısının ortaya koyduğu özelliklerin kullanıldığı uygulamaları genel olarak "fonksiyonel amaçlı seramikler" şeklinde tanımlamak mümkündür.

Örneğin, ferrit olarak tabir edilen fonksiyonel amaçlı seramik malzemelerin ana bileşeni demir oksit (Fe_2O_3) olmakla birlikte diğer bir çok oksit seramiklerini de yapısında katkı olarak ihtiva ederek malzemenin manyetik özelliklerinde istenen yönde değişiklikler yapmak mümkündür. Bu gruba giren malzemeler yapılarına bağlı olarak çevreden algıladıkları sinyalleri elektronik yapılarında ortaya çıkabilecek değişikliklerle ortaya koyarlar [2, 15]. Bu değişikliklerin tespiti ve anında ölçümü ise bize seramiklerin fonksiyonel görevlerini verir. Yine bunu örneklerle izah etmek gerekirse ZnO ve SiC gibi malzemeler enerji nakil hatlarında sistemin aşın voltajları absorbe eden cihazları aşırı yüklenmeden korurlar. Termistör olarak isimlendirilen ve ısı ile direnç değişimi gösteren Ni, Co ve Mn oksitlerden yapılmış malzemeler 300 °C'ye varan sıcaklıklarda hassas ısı ölçümü için kullanılırlar. Otomobillerde egzoz sıcaklığının kontrol edilerek yakıt yanma oranının ayarlanması da Zr_2O 'den yapılmış algılayıcılar vasıtası ile gerçekleştirilir. Zehirleyici ve yanabilen türdeki kaçakların algılanmasında da SnO_2 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ve ZnO türündeki seramik malzemelerin yarı iletken özelliklerinden faydalanılır. Optik telekomünikasyon işlemlerinde silika camından üretilmiş fiber optik malzemelerin kullanılması kabloların boyutlarının küçülmesinin yanı sıra transmisyon kalitesinin de artmasına yol açmıştır. AlGa-As veya InGaAsP türündeki yarı iletkenlerden de yine optik telekomünikasyonda büyük önem taşıyan lazer ışık kaynakları oluşturulmuştur [2]. Seramiklerin piezoelektrik ve manyetik

özelliklerinden faydalanılarak statik ve dinamik basınçların ölçümü mümkündür. Kuvars (SiO_2), baryum titanat (BaTiO_3) ve PbTiO_3 - PbZrO_3 bu türdeki malzemelere örnek teşkil eder [1].

2.2. Seramiklerin Kullanım Alanları

2.2.1. Alümina seramikler ve kullanım alanları

Alümina, oksit esaslı seramik hammaddeleri arasında tüketimi en fazla olanıdır. Yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısısal kararlılık ve korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri yanı sıra düşük birim maliyeti alümina tüketimini arttırmaktadır [16]. Alümina, yer kürede doğal olarak en fazla bulunan minerallerden boksit içinde bulunur. Dünya alümina üretiminin yaklaşık %90'ı alüminyum metal üretiminde kullanılırken geriye kalan %10'luk kısım ise ısıya dirençli dolgu malzemeleri, pigment, katalizör, refrakterler, aşındırıcılar ve seramik malzemelerin üretiminde kullanılırlar. Seramik sektöründe kullanılan alüminanın dünya yıllık üretimi 4 milyon ton civarındadır. Bayer yöntemi neticesinde oluşan alüminyum hidroksitler yapıdaki kristal suyunu uçurmak için yapılan kalsiyum işlemleri sırasında bir çok ara fazdan geçtikten sonra alfa (α) veya gama (γ) formu olmak üzere iki kararlı nihai kristal yapısına ulaşırlar. Kristal yapısı sıkı paketlenmiş hekzagonal sistem olan α alüminanın ergime sıcaklığı 2053 °C'dir. Kristal yapı içerisinde Al iyonlarının bulunduğu koordinasyon sayısı 6 olan sıkı paket pozisyonlarının 2/3'i Al iyonlarınca doldurulmuş, 1/3'ü ise boş bulunmaktadır [16].

Bayer yönteminden gelen ve az miktarda kalsinasyon işlemi gören α -alümina yüksek miktarda ara geçiş fazları gösterdiklerinden seramik sektöründe doğrudan kullanılamazlar. Ülkemizde de Seydişehir Alüminyum İşletmelerinden özellikle elek altı olarak tabir edilen alümina tam α yapısına dönüşmemiş olduğundan yapısal seramik uygulamalarında doğrudan kullanılmamaktadır. Elek altı alüminanın çeşitli kalsinasyon ve temizleme işlemleri ile yapısal seramiklerde de kullanılabilirliği TÜBİTAK-M.A.M, Malzeme Bölümü bünyesinde yapılan çalışmalar ile ortaya konmuştur [17].

Alüminanın yüksek sertliği ve mekaniksel dayanımı çalışma esnasında aşınmaya maruz kalan makina elemanları ve mühendislik malzemeleri şeklinde olan kullanımı ön plana çıkarmıştır. Yapısal amaçlı mühendislik uygulamalarının başında korozyon olan ve olmayan pompa salmastraları, musluk ve vana contaları, tekstil sektöründe kullanılan iplik kılavuzları, madencilik ve çimento sektöründe kullanılan aşınmaya dirençli plaka kaplamaları, metalleri taşlamada kullanılan seramik taşlama diskleri ve bıçak gibi kesici metalleri keskinleştirmede kullanılan taşlama elemanları sayılabilir.

Enjeksiyonla kalıplama, ekstrüzyonla çekme, kuru presleme ve döküm gibi silikat esaslı geleneksel seramiklere rahatlıkla uygulanan üretim yöntemlerinin, alümina seramiklerinde uygulanması karmaşık şekilli parçaların başarılı olarak üretilmesini mümkün kılmıştır [16].

Alümina seramiklerin en iyi bilinen askeri uygulaması hafif balistik panel yüzeylerinin balistik dayanımı arttırmak için seramik plakalarla kaplanmasıdır. 1960'lı yıllardan beri uygulanan bu yöntem özellikle ABD-Vietnam savaşı sırasında geliştirilmiştir. Balistik amaçlı kullanımlar için değişik seramik malzemeler önerilmekle birlikte alümina, fiyatının uygunluğu nedeniyle en fazla tüketilen teknik seramik malzemesidir. Plakaların şekillendirilmesinde kuru ve/veya izostatik presleme yöntemleri kullanılır. Seramik ile kaplı balistik sistemin çalışma prensibi süpersonik hızlarla gelen mermilerin sivri delici kısımlarının sert seramik tarafından parçalanarak körleştirilmesi veya ufalanması, daha sonra da ufalanmış bu parçacıkların polimer esaslı balistik altlık ile durdurulması esasına dayanır. Farklı tehdit seviyelerine göre seramik ve altlık malzeme kalınlıklarının kombinasyonu ile birçok zırh delici mermi çeşiti durdurulabilir [16].

Alümina esaslı yapısal seramiklerin tıbbi alanda uygulamaları son 20 yıldan beri üzerinde çalışılmakta olan bir konudur. Günümüzde alümina, kemiğin yerine ve ağızda dişin yerini alabilecek şekilde kullanılabilmektedir [16].

2.2.2. Seramiklerin yeni kullanım alanları

Seramik çelik

Tüm üstün niteliklerine karşın seramik malzemelerin en belirgin zaafları kırılgan olmalarıdır. 1975 yılında Avustralyalı üç bilim adamı R.C Garvie, R.H.C Hannik ve R.T Pascoe, zirkonyum oksit (zirkonya) seramikleri üzerinde yaptıkları araştırmalarda "dönüşüm toklaştırması" olarak adlandırılan bir mekanizmayla seramik malzemelerin daha tok ve sağlam özelliklere kavuşmasını sağladılar [18]. Ayrıca, %8 yittria ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonya seramiklere kolloidal prosesin etkileri de araştırılmıştır [19].

Çevre kirlenmesine karşı katalitik dönüştürücüler

Çağdaş teknolojik imkanlarla birlikte geliştirilen malzeme sistemleriyle zararlı ve atık gazların temizlenebilmesi mümkün kılınmıştır. "Katalitik Konvertör" olarak bilinen, oto egzoz gazlarından çıkan karbon monoksit, azot oksitleri ve zararlı hidrokarbonları filtreleyerek zararsız gaz bileşimlerine dönüştüren sistemler geliştirilmiş ve başarıyla uygulanmaktadır. Seramik hammaddelerden yapılan ve tipik bir "bal peteği" şeklinde olan, taşıyıcı malzeme üzerine kaplanan katalizörler esas filtreleme işlevini yaparlar [20].

Yıldırım ve şok söndürücü seramikler (ZnO seramik varistörler)

Bir elektrik güç hattına yıldırım düştüğünde oluşan yüksek gerilimden dolayı tüm sistemler bozulur ve kesintilere sebep olur. Yıldırım düşmesiyle oluşan yüksek elektrik enerjisini sistemleri bozmadan hapsederek zararsız hale getirmek için ZnO (çinko oksit) seramik varistörler kullanılır [12]. Çinko oksit seramik kristalleri normal şartlarda yarı iletkenlerdir, ancak kristal yapılarına bazı bizmut oksit gibi seramik malzemeler ilave edildiğinde çok iyi iletken malzeme özelliği gösterirler. Bu özellikleriyle katkılanmış çinko oksit seramik taneleri yalıtkan bir seramik matriks içine gömülürler; bu haliyle oluşan malzeme elektriksel olarak lineer

olmayan özelliktedir. Düşük gerilimlerde, malzemenin elektriksel iletkenliği de düşüktür, çünkü yalıtkan matriks elektrik akımının çinko oksit taneleri arasında iletilmesini önlemektedir. Yüksek gerilim şartlarında ise, yüksek enerjili elektrik akımı bu matriksi geçerek iletken çinko oksit taneleri arasında iletilir ve malzeme iletken olarak işlev görmeye başlar. Yalıtkanlıktan iletkenliğe dönüşüm özelliği tamamen malzemenin iç yapısının tasarımından geçer. Bu tasarım sonucu çinko oksit varistör olarak bu seramikler her türlü elektrik ve elektronik sistemde otomatik ayarlı devre kesiciler olarak hemen hemen her türlü gerilim uygulamasında yaygın olarak kullanılırlar [21].

Bilimsel ve teknolojik gelişmeler ileri endüstriyel uygulamalar için daha sert, sağlam ve dayanıklı, üstün fiziksel, mekanik, kimyasal, elektromanyetik özelliklere sahip seramiklerin üretilmesiyle pek çok alanda yeni ufuklar açılacak ve yaşam düzeyini yükseltebilecektir. Bu bakımdan "Yüksek Teknoloji Seramikleri" önümüzdeki yüzyılın en stratejik malzemeleri olarak önemli bir rol oynayacaktır.

2.3. Türkiye'deki İleri Seramik Endüstrisinin Durumu

Endüstrileşme sürecinde, ileri teknoloji alanları arasında bulunan "İleri Seramikler Bilim ve Teknolojisi", Türkiye gibi "hızla endüstrileşmekte olan" ülkeler için, temel endüstriyel atılımlar ve sıçramalar açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bu alanda ülkemizde ulusal bilim ve teknoloji birikimini geliştirmek üzere özellikle araştırma-geliştirme ağırlıklı faaliyetler yürütülmektedir.

İleri seramikler bilim ve teknolojisinde; ülkemizde özellikle son yıllarda üniversitelerimizde önemli birikimler söz konusudur. Güçlü laboratuvar imkanlarının oluşturulması, bu dalda yeni programların oluşturulması, bölümler açılması ve insan gücü potansiyelinin giderek güçlenmesi son dönemin en önemli gelişmeleri olarak dikkat çekmektedir. Bilimsel birikimlerin teknolojik uygulamaya aktarımı yönünde son derece önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Ülkemiz için büyük önem taşıyan endüstriyel aktarımı ve yöntemler hayata geçirilerek çeşitli modeller oluşturulmuştur [22]. Çizelge 2.1'de ileri seramik malzemelerin işlev ve uygulama alanları verilmiştir.

Buradan seramik malzemelerin endüstriyel olarak ne kadar geniş bir kullanım alanına sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.1. İleri seramik malzemelerin işlev ve uygulama alanları

<i>İşlev</i>	<i>Örnek Malzeme</i>	<i>Uygulama örneği</i>
teknik işlevler yüksek sıcaklık dayanımı	silikon nitrür, silikon karbür	gaz türbini, dizel motor
kesme dayanımı	bor nitrür, titan karbür, titan nitrür, tungsten karbür, bor karbür	kesici takımlar
Yağlama, aşınma dayanımı	bor nitrür, molibden disülfat alflmina, bor karbür	katı yağlayıcılar, bilyalar, mekanik sızdırmazlık, deliciler
ısıl işlevler, ısıl dayanım	alümina, silikon nitrür, silikon karbür	Elektrotlar
ısı yalıtımı, ısı transferi	titan oksit, alüminyum nitrür, zirkonyum oksit, bor oksit, alumina	yalıtkan, izolaör, nükleer reaktör, elektrik, elektronik parçalar, radyatör
Optik işlevler, ışık geçirgenlik	alümina, yitriyum oksit, baryum oksit	sodyumlu lambalar, optik lensler
ışık indükleme, floresans	silikon oksit, galyum-arsenit seramikleri, neodimyum yitriyum cam	optik fiberler, foto sensör, yarı iletken lazer, diyotlar
elektiriksel işlevler, süper iletkenlik, yarı iletkenlik, piezoelektriklik yalıtım, iletkenlik, iyonik iletkenlik	yitriyum-baryum-bakır oksit, çinko oksit, baryum titanat, kurşun zirkonat, titanat, alümina, silikon karbür, baryum titanat, zirkonya, beta-alumina	magnet varistör, güneş pili, sensör, ateşleme cihazı, devre elemanları, mikrokondenser sensör, katı elektrolit
manyetik işlevler, manyetizma	demir oksit, baryum oksit	ferrit magnetleri, hafıza kartları
biyolojik işlevler, biyoseramikler	alümina, apatitler	sunı diş, kemik
kimyasal işlevler, absorplama	köpük silika, alümina	absorban, katalizör taşıyıcı, biyoreaktör
katalist, korozyon	zeolit zirkonya, alümina	katalizör, elektrotlar

3. UÇUCU KÜL

3.1. Uçucu Külün Tanımı

Uçucu küller, düşük ısı değeri ve endüstride yakıt olarak kullanılmayan kömürlerin, toz haline getirilerek termik santrallerde yakılması sonucu bacadan çıkan gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince parçacıklar halindeki atıklardır. Uçucu küller termik santralden baca gazları ile taşınan, mekanik veya elektrostatik toz tutucularda tutulan çok ince küllerdir.

Birçok ülkede yıllık üretimin %25 'ten fazlası değerlendirilmektedir. Hatta bu rakamlar bazı ülkeler için %100 değerine bile ulaşmaktadır. Ülkemiz uçucu kül üretiminde yaklaşık 15 milyon ton ile dünyada onuncu sırada yer alırken, üretilen uçucu küller kayda değer ölçüde değerlendirilememektedir.

Türkiye’de uçucu kül kullanımı 1968’i yıllarda başlamış olup bunlar arasında; çimento üretiminde puzolanik katkı maddesi ve beton içinde ikincil bağlayıcı madde olarak çimentoyla birlikte, tuğla ve yapı bloğu üretiminde, suni agrega üretiminde, enjeksiyon uygulamalarında, dolgu malzemesi olarak, yol inşaatlarında temel ve temel altı tabakası olarak, zemin iyileştirilmesinde, atıkların stabilizasyonunda ve zirai amaçlarla kullanım sayılabilir [23].

3.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Kimyasal yapılarına göre sınıflandırma

Uçucu küllerin kimyasal yapılarına göre olan sınıflandırılması şu şekildedir;

- a) Silikat-alümina esaslı uçucu küller: Bunlar taşkömürü uçucu külleridir ve esas yapılarını silika aluminatlar oluşturmaktadır. Tane yapılarının çok ince ve camsı olmasıyla birlikte, çok miktarda silis ve alüminyum içermektedirler.
- b) Silikat-kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarındaki temel oksitler, kuvars ve kalsittir.
- c) Sülfür-kalsit esaslı uçucu küller: Bu gruptaki uçucu küller genellikle linyit

kömürünün yanması sonucu oluşmaktadır. Kimyasal yapılarının büyük bir kısmını kükürt trioksit ve kalsit oluşturmaktadır.

Elde edildiği kömür cinsine bağlı sınıflandırma

Termik santrallerde yakıt olarak, ülke kaynaklarına göre taşkömürü veya linyit kömürü kullanılmaktadır. Bu nedenle, uçucu küller elde edildiği kömür cinsine bağlı olarak iki gruba ayrılır;

- a) Linyit uçucu külleri: Kullanım alanları fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Linyit uçucu külünde, toprak alkali metalleri taşkömürü uçucu küllerine oranla daha fazladır. Bu özelliğinden dolayı daha çok uygulama alanı bulunmaktadır.
- b) Taşkömürü uçucu külleri: Taşkömürünün uçucu külü genel olarak 3-100 μm tane boyutunda tamamen kuru olarak elde edilir. Taneciklerin büyük bir kısmı camı minerallerden meydana gelmektedir. Özgül yüzeyleri linyit uçucu küllerine göre daha büyüktür [24].

3.3. Uçucu Külün Oluşumu

Uçucu kül, katı yakıtlardan elektrik üreten termik santrallerde kömürün yakılması sonucu elde edilir. Değirmenlerde öğütülerek toz haline getirilen kömür, sıcak hava ile birlikte yanma fırını içerisine püskürtülmektedir, Yanma işlemi sonucunda oluşan külün tanecik boyutu, yakılan kömürün tane boyutundan daha da küçüktür ve baca gazları ile birlikte sürüklenir. Külün sürüklenmesini azaltmak için, yanma havasının ve toz kömürün kazana teğetsel olarak üflenmesi tercih edilir. Bu durumda külün iri kısmı kazanda kalır ve kazanın alt kısmından kaba kül olarak alınır [25].

1773-1973 K sıcaklık aralığında kömür tozlarının yakılması sonucunda oluşan küllerin, yaklaşık %20'si kazanın alt kısmına düşer ve su ile soğutularak uzaklaştırılır. Bunlara taban külü denir. Külün %80'i ise, oluşan baca gazları ile birlikte taşınır. Uçucu kül olarak isimlendirilen bu kül, bacanın üst kısmında elektro filtre veya siklon adı verilen toz tutucularda tutulurlar. Bu küller daha sonra toz

tutucuların alt kısmında bulunan bunkerlerde biriktirilir ve periyodik olarak santral dışına alınır [24, 26, 27].

3.4. Uçucu Külün Özellikleri

Termik santrallerde, toz kömürün yakılması sonucu oluşan uçucu kül, kömürün cinsine, bıraktığı kül miktarına, kimyasal yapısına, kazanlara yükleme programına ve kül temizleme işlemleri ile kazan tipine bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir [24, 27].

3.4.1. Uçucu külün fiziksel ve mekanik özellikleri

Uçucu küllerin renkleri açık veya koyu gri ile siyah arasında değişmekte olup, renginin açıklığı veya koyuluğu elde edildiği kömüre ve yakma koşullarına bağlıdır [28]. Ayrıca, küldeki karbon, demir ve nem miktarı küllerin renklerini etkilemektedir. Mikroskop altında incelendiklerinde süngerimsi, gözenekli veya gözeneksiz küresel aglomere tanelerden meydana geldikleri görülmektedir. Linyit kömürü uçucu külleri, taş kömürü uçucu küllerinden daha koyu renklidir. İyi yanmış kömürün uçucu külü, iyi yanmamış kömürün uçucu külünden daha açık renktedir. İyi yanmamış kömürlerin uçucu küllerinin koyu rengi, yapılarında mevcut yanmamış karbondan ileri gelmektedir [24].

Bir uçucu külün tanecik şekli ve şekil özellikleri, kömürün kaynak ve üniformluğuna, yanmadan önceki öğütülme derecesine, yanma ortamına (sıcaklık seviyesi ve oksijen derişimi), yanmanın üniformluğuna ve kullanılan toplama sistemine bağlıdır. Uçucu kül taneciklerinin çoğunluğu camsı, içi dolu veya boş küresel şekillidir [29].

Uçucu küllerin tane boyutu, kullanılan kömürün cinsine ve öğütülme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Taş kömürü uçucu küllerinin tane boyutu, linyit uçucu küllerinin tane boyutundan daha küçüktür. Tane boyutuna etki eden ikinci faktör ise, yakma sistemini terk eden boyutu küçük uçucu küllerin elektro filtrelerde veya siklonlarda tutulma hassasiyetleridir. Sistemi terk eden küller ne kadar iyi yakalanırsa, o oranda ince taneli küller elde edilmektedir. Elektro filtrelerde daha

ince uçucu küller tutulabildiği için, elektro filtrelerde tutulan uçucu küllerin tane boyutu, siklonlarda tutulana göre daha küçüktür. Genel olarak, uçucu küllerin tane boyutları 1-100 μm , özgül yüzeyleri ise 0,1-0,5 m^2/g arasında değişmektedir [28, 30].

Uçucu küllerin özgül ağırlıkları yapılarındaki kuvars, alümine, demir ve karbon miktarlarına bağlı olarak değişmektedir. Uçucu külün demir miktarı arttıkça özgül ağırlığı da artmaktadır. Ayrıca özgül ağırlığı, külün mineralojik yapısına göre de değişmektedir. Örneğin; içi dolu küresel tanelerden oluşan uçucu küllerin özgül ağırlıkları yüksek iken, süngerimsi tanelerden oluşanları daha düşüktür. Uçucu küllerin içerisinde değişik özgül ağırlıklara sahip farklı taneler de bulunabilmektedir [28]. İçerisine bir mıknatıs daldırıldığında, bir miktar uçucu külün mıknatısa yapıştığı görülmüştür. Manyetik özelliği olmadığı halde yapışan tanecikler, hafif bir hava akımı ile uzaklaştırılır. Yapılan deneyler sonucunda, uçucu küllerin yaklaşık %25'inin mıknatısta kaldığı görülmüştür. Kimyasal analizler, mıknatıs tarafından tutulan numunenin %63'ünün Fe_2O_3 olduğunu göstermiştir [31].

Uçucu külün ergime sıcaklığı, elde edildiği şartlara, uygulanan prosesin maksimum ve minimum sıcaklıklarına bağlı olarak değişir. Yapılan bir deneyde, yarı yükseltgen-yarı indirgen ortamda uçucu kül konisinde 1173-1373 K arasında hafif bir çökme olduğu göze çarpmış, belirgin şişme 1373-1473 K aralığında gerçekleşmiş, tam ergime ve sıvılaşma ise 1523-1673 K aralığında meydana gelmiştir; şişme olayı gaz çıkışı nedeniyle olmaktadır [32]. Yükseltgen bir ortamda, 873 K'da yanabilen maddeler uzaklaşmış ve 1673 K dolayında ergime başlamıştır. Uçucu kül ergidiğinde genellikle tuğla rengine dönüşür; ısıtma, ergime sıcaklığından önce kesildiğinde uçucu kül taneleri birbirine yapışarak aglomere olmaktadır.

3.4.2. Uçucu külün kimyasal özellikleri

Uçucu küller %2-3 oranında suda çözünürler. Küldeki Al_2O_3 ve SiO_2 asidik; Na_2O , K_2O , CaO , MgO ve Fe_2O_3 ise bazik karakterdedir [33]. Bu bileşiklerden sudaki çözünürlüğü en yüksek olan CaO 'dir; bu nedenle, uçucu kül çözeltilerinin bazik karakteri, içerdiği CaO 'in derişimine büyük ölçüde bağlıdır. Uçucu küllere asitlerin

etkisi çok azdır seyreltik asit içerisinde uçucu küllerin çözünürlüğü en fazla %15'tir. Ancak bu miktar, uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik yapısına bağlı olarak daha da düşük olabilmektedir [24].

Uçucu küller, gözenekli veya dolu camsı küresel taneler ile yanmamış mineralleri süngerimsi ve köşeli aglomere tanelerden meydana gelmektedirler.

Genellikle bir uçucu külde, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , MgO , Na_2O , K_2O ve TiO_2 gibi oksitlerin hemen hemen tamamına rastlanmaktadır. Ancak, bu oksitlerin küldeki derişimleri geniş aralıklarda değişmektedir. Örneğin; silikat-alümine esaslı bir uçucu külde SiO_2 ve Al_2O_3 , silikat-kalsit esaslı bir uçucu külde SiO_2 ve CaCO_3 , sülfür-kalsit esaslı bir uçucu külde ise SO_3 ve CaCO_3 ana oksitlerdir. Çizelge 3.1'de Türkiye'deki bazı termik santral uçucu küllerinin kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Uçucu küllerde bulunan mineral fazlar ise genellikle, kuvars (SiO_2) mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4) ve gibstir [anhidrit (CaSO_4)]. Uçucu küllerin bir kısmı SiO_2 ve Al_2O_3 'ten meydana gelirken, diğer bir kısmı alkali ve toprak alkali elementlerin özellikle SiO_2 ve Al_2O_3 ile yaptıkları camsı fazlardan oluşur [23].

Çizelge 3.1. Türkiye'deki bazı termik santral uçucu küllerinin kimyasal bileşimleri (% ağırlıkça) [34]

BİLEŞİK	AFŞİN	ÇATALAĞZI	SEYİTÖMER	SOMA	TUNÇBİLEK	YATAĞAN
SiO_2	27,4	56,8	40,6	39,8	56,4	51,2
Al_2O_3	12,8	6,8	9,1	22,3	23,0	22,9
Fe_2O_3	5,5	24,1	7,7	4,4	10,1	7,8
CaO	39,7	1,5	19,9	25,4	2,1	13,0
MgO	2,5	1,4	8,1	1,9	3,3	2,8
SO_3	6,2	2,4	10,6	4,8	0,4	0,3
Alkali	0,3	2,9	1,4	0,4	0,9	2,9
TiO_2	0,7	3,0	eser	0,6	eser	0,9

Termik santrallerde kullanılan yakıta ve yanma şartlarına bağlı olarak uçucu küllerin kimyasal bileşimleri değişiklikler göstermektedir. Türk Standartları Enstitüsü tarafından hazırlanmış olan “uçucu Küller” başlıklı TS 639 standardında belirtilen kimyasal bileşimler Çizelge 3.2.’de verilmiştir [35].

Çizelge 3.2. Türk standartlarına göre uçucu küllerin kimyasal bileşimleri [23]

Kimyasal Bileşik	% (Ağırlıkça)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, en az	70
MgO, en çok	5
Nem, en çok	5
Kızdırma kaybı, en çok	10

Uçucu küller içerdikleri SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 miktarına bağlı olarak ASTM C 618 standardına göre “F” ve “C” olarak iki genel sınıfa ayrılmaktadır. Üç temel bileşen olan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ’in yüzde toplamı %70 veya daha fazla ise uçucu kül teknik olarak F sınıfı kül olarak adlandırılır. “C” sınıfı uçucu küller önemli oranda CaO bileşikleri içerdiğinden, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bileşenlerinin toplamının %50’den büyük olması gerekmektedir. “F” sınıfı küller bitümlü kömürün yanması, “C” sınıfı küller ise linyitin yanması sonucu elde edilmektedir. İki uçucu kül sınıfı arasında en çok dikkati çeken kimyasal fark, “C” sınıfı uçucu küllerin yüksek düzeyde CaO içermesinden kaynaklanmaktadır. Şayet CaO miktarı %10’dan fazla ise bu tür küller “yüksek kireçli uçucu kül”, %10’dan küçükse “düşük kireçli uçucu kül” olarak adlandırılmaktadır [36].

3.5. Uçucu Külün Kullanım Alanları

Ülkemizde miktarı her geçen gün biraz daha artan uçucu küller, ya kuru olarak atık sahalarında biriktirilmekte ya da su ile karıştırılmak suretiyle uçucu kül barajlarına pompalanmaktadır. Her iki durumda da çevrenin kirlenme riski ortadan kaldırılamamaktadır. Çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda ucuz bir malzeme kaynağı olarak kullanmak amacıyla, uçucu küllerin çeşitli alanlarda değerlendirilmesine çalışılmaktadır [27].

Uçucu küller, çok ince taneli olmaları, sertleştikleri zaman yüksek dayanım vermeleri ve kilin yapısındaki oksitleri içermeleri nedeniyle, tuğla üretiminde kullanılabilir. Uçucu küllerin bünyesindeki karbon, tuğlaların pişirilmesi sırasında enerji tasarrufu da sağlamaktadır [26].

Uçucu küller, çimento yapımında kullanılan hammaddelerin içerisine ilave edilerek, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanırlar. Ayrıca, beton yapımında kullanıldıkları zaman, betonun yüzey temizliği ve işlenebilirlik özelliği iyileşmektedir. Aynı zamanda betonun su geçirgenliği ve büzülme oranı azalırken, dayanım artmaktadır [23, 33].

Uçucu küller, kil ve feldspat ilavesi yapılarak, geleneksel (tabak, fincan vs.) ve sanatsal (vazo, küllük, süs eşyaları) seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu küller seramik sanayiinde kullanıldığında bir takım avantajları beraberinde getirmektedir. Bunlar, tane boyutunun küçüklüğü, öğütme masraflarının olmayışı, maliyetinin çok düşük olması ve içerdiği karbonun pişirme işlemleri sırasında sağladığı enerji şeklinde sıralanabilir [37]. Uçucu küller ayrıca, son zamanlarda üzerinde çok çalışılan ve geniş kullanım alanı bulunan cam-seramiklerin üretiminde de kullanılmaktadır [7].

İnşaat sektöründe hafif yapı malzemesi olarak kullanılan gaz beton, çimento, kireç, kum ve alüminyum tozları ile uçucu küllerin karıştırılması sonucu elde edilmektedir.

Uçucu küller ayrıca, maden ocaklarında filtre, döküm kumu, ısı yalıtım malzemesi, metal yüzeylerinin püskürtme ile temizlenmesi, tarımda yoğun toprağın gevşetilmesi ile rutubet tutma yeteneğinin artırılması, sudaki ağır metal giderimi ve bataklık kurutma amaçlı kullanılabilir [23, 34].

4. BOR

4.1. Bor Elementi

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan ve atom numarası 5 olan bor elementi, kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur.

Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken kristalin bor kolay reaksiyon vermez. Bor, yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve bazı diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlayıcı olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur [38]. Çizelge 4.1’de bor elementinin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri [39]

Özellik	Değeri
Atom Numarası	5
Atom ağırlığı	10,811±0,005 veya 0,007
Yoğunluk (kgm ³)	2,46
Molar Hacim (cm ³)	4,39
Ergime noktası	2190+20 °C
Kaynama noktası	3660 °C
Isıl genleşme katsayısı	5x10 ⁶ - 7x10 ⁶
(25-1050 °C arası, 1 °C için)	
Knoop sertliği	2100-2580 HK
Mohs sertliği (elmas-15)	11
Vickers sertliği	5000 HV
Entalpi (kJ/mol)	50,2
Füzyon Buharlaştırma	507

4.2. Ticari Bor Mineralleri

Doğada yaklaşık 230'dan fazla bor minerali mevcut olup, analitik bilgi teknolojilerine bağlı ekipmanların gelişimi ile bu sayının gittikçe artması beklenmektedir. Ticari öneme sahip olan bor mineralleri; tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandemit, borasit, szaybelit, hidroborasit gibi minerallerdir. Bor mineralleri, yapılarında farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) içerirler [39]. Ticari öneme sahip bor mineralleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Ticari öneme sahip bor mineralleri [40]

<i>Mineral</i>	<i>Formülü</i>	<i>Bulunduğu yer</i>
<i>Boraks (Tinkal)</i>	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	Türkiye, A.B.D.
<i>Kernit (Razorit)</i>	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	Türkiye, A.B.D., Arjantin, Çin
<i>Üleksit</i>	$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$	Türkiye, Arjantin
<i>Propertit</i>	$NaCaB_5O_9 \cdot 5H_2O$	Türkiye, A.B.D
<i>Kolemanit</i>	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	Türkiye, A.B.D., Arjantin, Peru
<i>Pandemit(Priseit)</i>	$Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 7H_2O$	Türkiye
<i>Borasit</i>	$Mg_3B_7O_{13}Cl$	Almanya
<i>Szaybelit</i>	$Mg_2B_2O_5 \cdot H_2O$	B.D.T. (Eski S.S.C.B.)
<i>Hidroborasit</i>	$CaMgB_6O_{11} \cdot 6H_2O$	Türkiye

Bor minerallerinin ham olarak kullanıldığı endüstriler var olmakla birlikte, yaygın olarak rafinasyon işlemi sonucu elde edilen bor bileşikleri (Çizelge 4.3.) endüstrinin vazgeçilmez hammaddelerindendir.

Çizelge 4.3. Başlıca rafine bor bileşikleri [41]

<i>Bileşikler</i>	<i>Formüller</i>	<i>% B₂O₃</i>
Boraks Pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	47,8
Boraks Dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,5
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69,2
Borik Asit	H ₃ BO ₃	56,3
Susuz Borik Asit	B ₂ O ₃	100,0

4.3. Bor ve Ürünlerinin Başlıca Kullanım Alanları

Çok çeşitli sektörlerde kullanılan bor mineralleri ve ürünlerinin kullanım alanları genişleyerek artmaktadır. Üretilen bor minerallerinin %10'a yakın bir bölümü doğrudan mineral olarak tüketilirken geriye kalan kısmı bor türevleri üretiminde kullanılmaktadır [40].

21. yüzyılın petrolü olarak nitelenen bor madenleri, Türkiye'nin en önemli maden varlığıdır. Bor madenleri, uzay teknolojisinden bilişim sektörüne, nükleer teknolojiden savaş sanayine ve tarım, kozmetik, cam, seramik, deterjan, sağlık sektöründen enerji sektörüne 4000'in üzerinde ürün çeşidinde kullanılmakta olan bir madendir. Bor bu özelliği nedeniyle *sanayinin tuzu* olarak tanımlanmaktadır.

4.3.1. Cam sanayi

Bor oksit özellikle; borosilikat cam, tekstil tipi ve izolasyon tipi cam elyaflarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Düz cam ve cam kaplarda ise bor kullanım oranı düşüktür.

Bor, ergimiş haldeki cam ara mamulüne katıldığında onun akışkanlığını arttırıp, yüzey sertliğini ve dayanıklılığını yükselttiğinden ısıya karşı izolasyonunun gerekli görüldüğü cam mamüllerine katılmaktadır.

Borlu camlar, özel fırın kaplarında, laboratuvar malzemelerinde, arabaların far ve sinyal camlarında, cam yününde, tekstil tipi cam elyafında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bor içeren özel camlar, optik ve elektrik özelliklerinden dolayı uzay sanayiinde, elektronik endüstrisinde ve nükleer reaktörlerde kullanılmaktadır.

4.3.2. Seramik sanayi

Bor oksit, boraks, kolemanit ve diğer sodyumlu borlar seramik sırların üretiminde kullanılmaktadır. Bor oksitin temel fonksiyonu, esas itibarıyla cam ve malzeme arasında ısısal açıdan uyum sağlamak ve sırn ısısal genleşme katsayısını düzenlemek ve ergimenin ilk aşamalarında cam oluşumunu sağlamaktır. Sırlara bor eklenmesi mekanik özellikleri iyileştirir, özellikle çizilme direncini artırır.

Seramik sırlarında kullanılan bor oksit oranı ağırlıkça %8-24 arasında, emaye sırlarında ise bor oksit oranı %8-32 arasında değişir. Seramiği çizilmeye karşı dayanıklı kılan bor, %3-24 miktarında kolemanit halinde sırlara katılır. Bazı hallerde bor oksit veya susuz boraks da kullanılır.

Ülkemizde seramik kaplama malzemelerinin başlangıcı Çanakkale Seramik Fab. A.Ş. ile 1957 yılına dayanmaktadır. Başlangıçta hammadde kaynaklarının yakınlarına konuşlandırılan fabrikalar (Çan, Söğüt, Bilecik, Eskişehir, Kütahya, Uşak) bir çok konuda olduğu gibi frit konusunda da kendi kendilerine yeterli olacak şekilde yatırımlarını gerçekleştirmişlerdir. Son yıllarda Kale Frit'in yeni yatırımıyla, Türkiye'nin frit ithalatında düşüş olacağı tahmin edilmektedir.

Bor ayrıca aşağıdaki belirtilen sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır;

- Temizlik ve beyazlatma sanayi (sabun ve deterjanlar)
- Tarım (gübre, yabani otların ve haşerelerin kontrolü)
- Metalurji, metalurjik kaynak ve lehimcilik
- Nükleer uygulamalar
- Kompozit malzemeler (bor elyafları)

- Uzay ve havacılık sanayi
- Borlu katı yakıtlar (hücre yakıtları (fuel cells), füze / uçuş yakıtları)
- Yanmayı önleyici (geciktirici) maddeler yangın söndürücüler, yangına dayanıklı malzemeler [40, 41, 42].

Çizelge 4.4. Ürün bazında bor ürünleri kullanım alanları [41]

<i>Ürün</i>	<i>Kullanım Alanları</i>
Kalsiyum Bor Cevheri (Kolemanit)	Tekstil kalite cam elyafı, bor alaşımları, metalurjik curuf yapıcı, nükleer atık depolama
Sodyum Bor Cevherleri (Üleksit ve Probertit)	Yalıtım cam elyafı, borosilikat camlar, gübre
Tinkal	Rafine borların üretimi (deka-penta), sodyum perborat, susuz boraks, disodyum oktaborat, pentaborat, metaborat,
Borik Asit	Antiseptikler, bor alaşımları, nükleer uygulamalar, yangın geciktiriciler, naylon, fotoğrafçılık, tekstil, gübre, katalistler, cam, cam elyaf, emaye, sır, antiseptikler, kozmetik
Susuz Boraks	Gübreler, cam elyaf, cam, metalurjik curuf yapıcı, emaye- sır, yangın geciktirici, kaynak-lehimcilik,
Sodyum Perborat	Deterjan ve beyazlatıcılar, tekstil, dezenfektan ve bazı diş macunları
Disodyum Metaborat	Yapıştırıcı, deterjanlar, zirai ilaçlama, fotoğrafçılık, tekstil
Sodyum Pentaborat	Yangın geciktiriciler, gübreler
Rafine Boraks Dekahidrat	Yapıştırıcılar
Rafine Boraks Pentahidrat	Çimento, ilaç ve kozmetikleri, korozyon önleyici, böcek ve mantar zehirleri, elektrolitik rafinasyon, gübreler, yangın geciktiriciler, cam, cam elyafı, böcek ve bitki öldürücü, deri ve tekstil
Disodyum Oktaborat Tetrahidrat	Yangın söndürücüler, gübreler, tarım ilaçları ve ağaç koruyucular

5. ELEKTRONİK DEVRE ALTLIK MALZEMELERİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Elektronik endüstrisinde kullanılan cihazlarda devreleri desteklemek amacıyla kullanılan devre altlığı malzemelerinden biri alumina (Al_2O_3)'dır. Fakat, alumina yüksek dielektrik sabitine sahip olması nedeniyle ($K=9$), devrelerde sinyal gecikmesine neden olmaktadır [5]. Ayrıca, alumina altlıklar yüksek sıcaklıklarda sinterlendiğinden, bu altlıklar üzerinde kullanılan iletken malzemelerin yüksek ergime sıcaklığına sahip olması gerekmektedir (örneğin; Mo veya W). Bu tür iletken malzemeler ise, yüksek elektrik direncine sahip olmaları nedeniyle sinyallerde gecikmelere sebep olurlar. Bu nedenle, son yıllarda Cu, Ag, Au veya Ag-Pd gibi düşük ergime sıcaklıklarına sahip iletkenlerin kullanılmasına imkan verecek şekilde düşük sinterleme sıcaklığına (özellikle $<1000^\circ\text{C}$), düşük dielektrik sabitine ve düşük ısı genleşme katsayısına sahip malzemelerin geliştirilmesine hız verilmiştir. Bu amaçla geliştirilen ve ilk olarak IBM tarafından yarı iletken sektöründe altlık olarak kullanılan malzemelerden biri kordiyerit ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) ve kordiyerit bazlı cam seramiklerdir [4].

Düşük ısı genleşme katsayısı ($4,82 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), aluminadan düşük dielektrik katsayısı (1 MHz'de 6,2) sebebiyle elektronik endüstrisinde altlık olarak kullanılmaya uygun malzemelerden birisi de anortit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) polikristalin seramiklerdir [5, 6]. Anortit seramiklerin altlık malzeme olarak kullanılabilmesi için Cu, Au, Ag gibi iletken metallere birlikte sinterlenmelerine imkan verecek şekilde düşük pişme sıcaklıklarına sahip olması gerekmektedir.

5.1. Anortitin Özellikleri

Stokiyometrik anortit bileşimi ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ve bunun kimyasal bileşimi % 20,16 CaO, % 36,65 Al_2O_3 , % 43,20 SiO_2 şeklindedir. Anortit yüksek sıcaklıklarda iyi elektrik yalıtkanlığının yanı sıra, çok düşük termal genleşme katsayısına sahip olduğundan çok yüksek termal şok direnci göstermektedir (Çizelge 5.1.)

Doğal anortit kalsiyumlu bir feldspat türüdür. Genellikle beyaz ve gri renkte olup camsı bir parlaklığa sahiptirler. Günümüzde anortit malzemelerin sentetik yollarla üretilerek kullanılması tercih edilmektedir [43].

Çizelge 5.1. Anortitin bazı özellikleri [5,6,20]

<i>Bileşim</i>	<i>Isıl Genleşme Katsay</i> <i>($\times 10^{-6}/^{\circ}C$)</i>	<i>Kırılma Mukavemeti</i> <i>(MPa)</i>	<i>Özgül Ağırlığı</i> <i>(gr/cm³)</i>	<i>Dielektrik</i> <i>Katsayısı</i>
CaO.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	4,82	120	2,763	1 MHz'de 6,2

5.2. Anortit Üretim Yöntemleri

Anortit üretiminde başlıca üç metot kullanılmaktadır; Bunlar sol-jel, toz metalürjisi ve cam-seramik ile anortit seramiklerinin elde edilmesidir [20].

5.2.1. Sol-jel yöntemi

Günümüzde "sol-jel" yöntemi, seramik tozları, cam, katalizör ve membran yapımı, kaplamalar, elyaflar için kullanılmaktadır. Sol-jel yöntemi prensipte malzemelerin moleküler düzeydeki karışımını esas alır [20]. Sol-jel yöntemi ile monolitik seramik ve kaplama üretiminde en çok kullanılan hammaddelerden biri metal-alkoksitlerdir. Sol-jel uygulamalarında "sol" kelimesi sıvı içindeki katı kolloidal parçacıkları, "jel" ise katı ve sıvı faz arasındaki fazı sembolize eder. Bu nedenle sol-jel yöntemiyle hazırlanan jeller kolloidal ve polimerik jeller olmak üzere 2'ye ayrılır.

Monolitik şekillerin eldesinde kullanılan sol-jel yöntemini 4 adımda toplamak mümkündür [2].

1. Alkoksit Hidrolizi
2. Peptizleşme veya Polimerizasyon
3. Jel eldesi
4. Kalsinasyon/Sinterleme.

5.2.2. Toz metalürjisi yöntemi

Bu yöntem diğerlerine göre daha basit ve daha ucuz olmasına rağmen, özellikle yüksek yoğunluklu seramikleri elde etmek zordur. Bu yöntem aslında sol-jel metoduna göre ikincil bir proses olarak kabul edilebilir. Çünkü burada kullanılan başlangıç tozlarını elde etmenin bir yolu da sol-jel yöntemidir. Toz metalürjisi yönteminde, karışımı oluşturan tozların homojen dağılımının sağlanması prosesin en önemli aşamalarından birisidir. Bileşimi oluşturan karışım ne kadar iyi karıştırılır ve homojen olursa sinterleme sonrası malzeme özellikleri de o kadar iyi olur. Hazırlanan karışım, uygulama alanına uygun bir şekillendirme yöntemiyle şekillendirilir ve sinterleme işlemine tabi tutulur. Burada sinterleme olayı difüzyon ile gerçekleştiği için kolay kolay teorik yoğunluğa ulaşmak mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı karışıma sinterlemeyi kolaylaştıracı bir takım katkıların ilavesi gereklidir [20].

5.2.3. Cam-seramik yöntemi

Cam-seramik yapıları malzemeler özellikle son yıllarda üzerinde çok çalışılan konulardan biridir. Aynı zamanda anortit üretim yöntemlerinden olup temel prosesleri, ısı işlemlere kadar toz metalürjisiyle aynıdır. Yine burada şekillendirme prosesi de farklılık göstermektedir.

Hazırlanan karışım, 1400°C üzerindeki sıcaklıklarda ergitilmekte, ergimiş olan karışım hazırlanmış olan kalıplara dökülerek şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Sonra da soğuduğunda amorf halde olan yapı sisteme katılan çekirdeklendirici oksit tozlarıyla düşük sıcaklıklarda çekirdeklendirilerek kristal yapı bir malzeme elde edilmektedir. Bu yöntemde aslında pratik olmasına rağmen nihai ürünün özellikle mekaniksel özellikleri diğer metotlara göre zayıf kalmaktadır. Çünkü yüksek sıcaklıklardaki ısı işlemler sırasında ergimiş olan malzeme, kalıplara dökülünce ani soğuma sıcaklık değişimleri ile oluşan gerilimler dolayısıyla yapıda mikro ve makro çatlaklar oluşmakta bu da mekaniksel özellikleri olumsuz etkilemektedir [20].

5.3. Anortit Şekillendirme Yöntemleri

Anortit seramiklerini şekillendirmenin pek çok yöntemi vardır. Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağına uygulama alanının gerektirdiği şartlara göre karar verilmektedir. Nihai ürünün basit veya karmaşık şekilli olması ve üründen istenen birtakım özelliklere göre şekillendirme yöntemleri farklılık arz etmektedir.

5.3.1. Slip – döküm

Hazırlanan sulu karışım, alçı kalıplara dökülür. Karışımındaki su, gözenekli alçı kalıp tarafından emilir. Bu yöntem, basit bir yöntem olup esas olarak her boyut ve şekildeki parça üretimi için elverişlidir. Ancak, pişme esnasında çekme miktarı tipik olarak % 25-30 mertebesindedir. Bu durum, son ürünün boyut tahmininde güçlük yaratır. Ayrıca, birkaç aşama gerektiren yavaş bir prosestir. Bu nedenle, yöntem prototip çalışmalarda ve kısa süreli üretim dönemlerinde kullanılır [10, 11].

5.3.2. Kuru presleme

Bu yöntemde, seramik tozları, uygun bir bağlayıcı ve yağlayıcı ile karıştırılarak, metal bir kalıp içersinde tek eksenli yük altında kuru olarak sıkıştırılır. Bu yöntemde toz boyutunun dağılımı önem taşır. Yöntem, plaka gibi düz parçaların üretimine uygundur. Kuru preslemedeki bünyeler slip dökümdeki sulu karışımının içeriğine göre daha az homojen karışmışlardır. Daha da önemlisi preslenmiş parçalar önemli oranda hava boşluğu ihtiva ederler. Bu da yoğun bir yığın malzeme elde edilmesini güçleştirir. Ancak bu durum preslenecek karışıma çeşitli preslenmeyi kolaylaştırıcı katkıların ilavesi ile minimuma indirilebilir [10, 11].

5.3.3. İzostatik presleme

Bu yöntemde tozlar, kuru preslemede olduğu gibi hazırlanır ve sıvı geçirmeyen lastik kalıba konur. Sistemin havası boşaltılır. Kalıbı çevreleyen sıvı sıkıştırılır. Bu şekilde ham (pişmemiş) yoğunluk %50 mertebesine ulaşır ve pişme ile de bu değer teorik

yoğunluğa ulaşabilir. Basit geometrideki parçalar daha sonra atölyede son şekillendirmeye tabi tutulur [10, 11].

5.3.4. Sıcak presleme

Seramik ürünlerindeki yoğunlaşmayı arttırmak için genellikle sıcak preslemeye başvurulur. Sinterleme, yüksek sıcaklık ve uzun bir sürede yapılırsa bile nihai malzemede, yoğunluk ancak %80-90 mertebesinde gerçekleşmektedir. Sinterlemede yoğunlaştırma, difüzyon prosesine dayandığından tam bir yoğunlaştırma ancak difüzyonun hızlı olduğu ergime noktasına yakın yüksek sıcaklıklarda gerçekleşebilir. Ancak, bu uygulamada bir takım güçlükler vardır. Örneğin, refrakter ve seramik malzemelerin ergime noktaları çok yüksek olduğundan, çok yüksek sıcaklıklarda, sinterleme hem teknik açıdan hem de ekonomik açıdan mümkün değildir. Diğer taraftan, süper alaşımlar için de yüksek sıcaklıklarda sinterleme, tane büyümesi ve mevcut fazların kararlılığı açısından pratik olarak mümkün değildir. Benzer şekilde, süper iletken seramiklerin üretiminde de faz dönüşümü nedeniyle yüksek sıcaklıklarda sinterleme yapmak mümkün değildir. Bütün bu güçlükler, sinterlemenin tam bir yoğunlaştırma için yeterli olmadığının göstermektedir [10, 11].

5.3.5. Enjeksiyonla kalıpta şekillendirme

Bu yöntem, sürekli üretim halinde kullanılır. Üretimin hızı yüksek olup, maliyeti düşüktür. Bu proseste toz boyutu mikronun altındadır ve çeşitli termoplastik reçine ve plastikliği arttırıcı katkı maddeleri ilave edilir. Bu yöntemle kompleks şekilli anortit seramik malzemelerin üretilmesi mümkündür [10, 11].

5.3.6. Ekstrüzyon

Seramik tozları, yeterli plastikliği sağlamak amacıyla %25-30 mertebesinde organik bağlayıcı ile karıştırılır ve rutubet kontrol edilerek arzu edilen boyutlarda metallerde olduğu gibi ekstrüzyona tabi tutulur. Tüp, çubuk, tuğla, fayans gibi sabit kesite sahip ürünlerin imali için uygundur. Özellikle katalitik konvertör altlığı olarak ve egsoz

gaz filtrelerinde kullanılan yüksek gözenekli bal peteği yapısındaki anortit benzeri kordiyerit malzeler bu yöntemle şekillendirilmektedir [10, 11].

5.3.7. Şerit-döküm

Bugünkü modern teknoloji, ince şerit veya plaka halinde seramiklere gereksinim duymaktadır. Bu ürünler için genellikle “şerit-döküm” (tape-casting) yöntemi uygulanmaktadır. Şerit-döküm, elektronik seramik endüstrisinin en önemli proseslerinden birisidir [1].

Şerit döküm yöntemi, inorganik seramik malzemenin sıvı içerisinde dağıldığı seramik karışımın hazırlanması ile başlar. Burada sıvı faz, çözücü içerisinde seyreltilmiş halde organik bağlayıcılar ile plastikliği değiştiren katkı maddelerini içermektedir [1, 10, 11].

Hazırlanan sıvı karışım, düz bir yüzeye yayılır ve çözücünün bünyeden uçurularak uzaklaşması sağlanır. Böylece, kurutulan malzeme inorganik seramiği ve geçici plastik bağlayıcıyı içerir. Kurutulan şerit, yüzeyden sıyrılabilir ve kağıt veya deri gibi ele alınabilir. Anortit seramiklerinin kullanım alanlarından olan elektronik devre altlığı uygulamalarında anortitin ince bir şerit ve levha halinde şekillendirilmesinde şerit döküm tekniği kullanılabilir [20].

5.4. Literatür Araştırması

Gdula tarafından yapılan çalışmada dielektrik uygulamalar için uygun özellikte anortit seramiklerin ucuz hammaddelerden (kaolin ve CaCO_3) basit yöntemler kullanılarak üretilebileceği açıklanmıştır. “Isısal genleşme katsayısı ile silikon yerine iyi bir seçenektir” sonucuna varılmıştır. 1425°C ’da hava sinterlemesi sonucu %98 teorik yoğunluğa sahip ince taneli oluşumlar elde edilmiştir [5].

Çizelge 5.2. Anortit ve alümina seramik dielektriklerin özellikleri

Özellik	Anortit	Alümina	Açıklama
Dökme Yoğunluğu g/cm ³	2,71	3,62	ASTM C20-46
Teorik Yoğunluk (%)	98,3	96,0	
Dielektrik katsayısı (°C x10 ⁻⁷)	6,2	8,9	1 MHz, 25 °C

Sumi, Kobayashi ve Kato tarafından yapılan çalışmada bor oksit ilavesiyle kaolin ve magnezyum hidroksitten kordiyeritin düşük sıcaklıkta üretimi gerçekleştirilmiş ve bor oksitin prosese etkisi üzerinde durulmuştur. Borun sıcaklığı 850°C -900°C'ye düşürdüğü belirtilmiştir [44].

Mergen ve Aslanoğlu tarafından yapılan çalışmada kaolin kalsit, kuvars ve bor oksit kullanımı ile çok ince taneli malzeme kullanmadan anortit seramik elde edilmiştir. Elde edilen anortit seramiğin teorik yoğunluğu %87 olduğu görülmüştür. Bu sonuç 950°C sıcaklıkta sinterleme ile elde edilmiştir. 1100°C'de sinterleme sıcaklığında bor içermeyen anortit fazı elde edilmiştir. Seramik malzemelerin, bakırın ergime sıcaklığı olan 1082°C'in altında daha düşük sinterleme sıcaklığına ve 5'in altında dielektrik sabitine sahip ve düşük ısısal genleşmeye sahip olduğu belirtilmiştir [3].

Kumar, Singh ve Ramachandrarao uçucu küllerden kordiyerit sentezi ve refrakter özelliklerini araştırmışlardır. Termik santrallerden elde edilen temiz uçucu küllerden elde edilen kordiyeritin sanayi tipi kordiyeritle aynı özellikleri hatta yüksek sıcaklıklarda daha iyi özellikler gösterdiği belirlenmiştir [45].

Kobayashi ve Kato tarafından yapılan çalışmada düşük sıcaklıkta, sinterlenebilir çok tabakalı anortit seramiklerin elde edilmesi açıklanmıştır. Günümüzde çoğu bilimsel çalışmalar/araştırmalar klasik anlamda kullanılan alüminanın yerine alternatif seramikler geliştirilmesine yöneliktir. Bu malzemeler daha çok yarı iletken entegre devre performansların artırılmasına yönelik alanlarda kullanılmaktadır. Bu amaçla seramik malzemeler düşük dielektrik sabiti, düşük ısısal genleşme katsayısı ve 1000°C'nin altında bir sinterleme sıcaklığına sahip olması gerektiği açıklanmıştır. Anortit seramikler nispeten saf kaolin ve değişik tane büyüklüğüne sahip kalsitlerden

sentezlenerek elde edilmiştir. Öğütülen girdiler basınç altında 900°C - 1200°C arasında ısıtılmıştır. 1000°C’da ısıtılması ile yoğun anortit seramikler elde edilmiştir. İnce öğütülmüş kalsit kullanılması durumunda, bağıl (görelî) yoğunluk %94 ve su absorpsiyonu yaklaşık sıfır bulunmuştur. Nispeten büyük taneli kalsit kullanılması halinde ise, görelî yoğunluk daha düşük ve su absorpsiyonu ise daha yüksek bulunmuştur [46].

Sampathkumar N.N., Umarji A.M. ve Chandrasekhar B.K. tarafından yapılan çalışmada, uçucu küllerden kordiyerit elde edilmesi üzerinde durulmuştur. Bu şekilde elde edilen kordiyeritin diğer yollardan elde edilen kordiyeritin özellikleri ile aynı olduğu belirtilmiştir. Bu şekilde üretilen kordiyeritin mikroyapısı içinde zengin magnezyum kordiyerit fazının olduğu tespit edilmiştir [47].

A.Mergen, Kayed T.S., Bilen M., Qasiawi A.F. ve Gürü M. tarafından yapılan çalışmada kaolin, CaCO_3 ve kolemanit kullanılarak anortit üretimini gerçekleştirmişlerdir. Bu yolla 1350°C’de %90 teorik yoğunluğa sahip anortit elde edilmiştir [48].

Boudchicha, Achour ve. Harabi tarafından yapılan çalışmada kordiyerit ve anortit içerikli seramiklerin sinterlenmesi ve kristalleşmesi incelenmiştir. Bu çalışmada, düşük ısısal genleşme katsayısı, yüksek ısısal şoklara dayanıklılık ve düşük dielektrik sabiti nedeniyle kordiyerit ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) ve anortit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) ve bunların karışımlarının, motorlarda gazların yanmasında destekleyici malzeme olarak, ayrıca gaz türbinlerinde ve endüstriyel ısı değiştiricilerde destekleyici malzeme olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir. Sol-jel ve cam seramik prosesleri çok pahalı ve karmaşık olup, anortit ve kordiyerit içeren seramiklerin kaolin ve doloma karışımının 1250°C’de reaksiyonu ve sonra 1350°C’da sinterlenmesiyle elde edilmesinin mümkün olduğu belirtilmiştir [49].

Traore, Kabre ve Blanchart tarafından yapılan çalışmada kaolin ve kalsit karışımından gehlenit ve anortit kristalizasyonu incelenmiş ve uygun oranlarda kil ve kalsit karışımlarından ince taneli yapıda seramik malzemenin özelliklerinin

artırılabilceğı açıklanmıştır [50].

Kurama ve Ay tarafından yapılan çalışmada kordiyerit eldesinde öğütme zamanının ve MgO kaynağının etkisi üzerinde durulmuştur. Kordiyerit seramiklerin mükemmel ısısal şoklara dayanıklılık özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir [51].

Sumi, Kobayashi ve Kato tarafından yapılan çalışmada magnezyum bileşiklerinden ve kaolinden katkı maddeler olmadan yoğun kordiyerit seramikler hazırlanmasını araştırmışlardır. Magnezyum hidroksit sulu çözeltiden yaklaşık 0,1 µm tane büyüklüğünde elde edilir ve bu karışımın ısıtılması ile 900°C’de ısısal reaksiyon sonucu amorf madde µ-kordiyerit amorf maddenin 950°C’de kristalleşmesiyle ve 950°C’den 1200°C’ye ısıtılmasıyla tedrici olarak elde edilir. Elde edilen maddenin de 1350°C’de ısıtılmasıyla %95 yoğunluğa sahip, $2,2 \times 10^{-6}/K$ ısısal genleşme katsayısına sahip α-kordiyerit seramik malzeme elde etmişlerdir [52].

Sumi, Kobayashi ve Kato daha önceki çalışmalarında kalsine edilmiş ve çok ince taneli magnezyum bileşikleri ve kaolin karışımının 1300°C’de ısıtılmasıyla α-kordiyerit seramiğı elde etmişlerdi. Bu yöntemde çok ince taneli öğütülmüş malzeme elde etmek için uzun süre malzemeyi öğütmek gerektiğinden malzemenin safsızlığını önlemenin zor olduğunu belirtmişlerdi. Daha sonra safsızlığı artırmak için alternatif bir yol arayışına girmişlerdir. Magnezyum klorit çözeltisinden magnezyum hidroksit elde edilmesi ve bunun kaolin ile karıştırılıp 1350°C’de reaksiyona tabi tutulması ile kordiyerit elde edilmesini çalışmışlardır [53].

Acimovic ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada magnezyum silikat bileşikleri yerine sepiyolit bazlı kordiyerit seramiklerin üretimi ve yüksek fırınların kaplama olarak kullanılabilmesi olasılığı üzerinde durulmuştur [54].

Wittman ve Zanutto, anortit ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) camlarındaki yüzey kristalleşmesinin araştırmasını klasik çekirdeklenme teorilerinden faydalanarak nicel ve nitel sonuçlar elde edecek şekilde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında anortit camında heterojen çekirdeklenmenin baskın çekirdeklenme mekanizması olduğunu

gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak yüzeyler arası yeniden yapılanmanın hem cam yüzeyindeki ve cam dahilindeki kristal büyümesini kontrol eden mekanizma olduğunu ve bu sonuçların daha önce kordiyerit bazlı camlar üzerine yapılan çalışmaların sonuçları ile benzeştiğini ileri sürmüşlerdir [55].

Liu ve arkadaşları ise, anortit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) camlarındaki faz ayrışmasını elektrik alan uygulanması tekniği ile detaylı olarak çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar; harici olarak uygulanan elektrik alanının camdaki faz ayrışımını hızlandırdığını ve bunun da damlacık fazların farklı boyutlarda oluşmasını sağladığını göstermiştir [56].

Konu ile ilgili olarak Du Pont (ABD) firması tarafından EP0310315 B1 patent no'lu; Zeolitlerden (Si/Al oranı yaklaşık 0,7-6) yaklaşık 900°C 'den yaklaşık 1350°C 'ye kadar sinterleme ile monolitik seramik malzeme üretimi konulu “Zeolitlerden Anortit-kordiyerit bazlı seramikler üretimi” adı altında patent almışlardır.

Ayrıca, Tokuyama Soda PK (Japonya) firması tarafından EP0298701 A3 B1 patent no'lu; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar oranı 3'den düşük, kalsiyum tipi zeolit, bu tip bir ürünün kalsine edilmesiyle elde edilen kalsine ürünler ve kalsiyum tipi zeolit veya kalsine edilmiş bir ürün ve bir alkali metal bileşiği ve 1000°C 'de sinterlenmiş malzemelerden en azından birinin seçilmesiyle oluşturulan bir yapının hazırlanmasıyla anortit elde edilmesi konulu “Anortit sinterlenmiş malzeme hazırlanması için proses” adı altında patent almışlardır.

Yukarıda anlatılan literatür çalışmalarına bakıldığında, uçucu kül kullanılarak kordiyerit bazlı seramik malzemelerin, ayrıca kaolin, kalsit, kalsiyum karbonat gibi diğer hammaddeler kullanılarak anortit malzemelerin üretildiği ve karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar ışığında, ülkemizde termik santrallerden elde edilen uçucu kül kullanılarak bor katkılı anortit malzeme üretimi tez çalışmamıza konu olarak seçilmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada termik santrallerden elde edilen uçucu küller kullanılarak ve borik asit ilavesiyle anortit seramik malzeme üretimi hedeflenmiştir. Borik asitin düşük ergime sıcaklığına sahip olması ve seramik malzemenin yalıtkanlık özellikleri üzerine daha az zararlı etkisi olması sebebiyle sinterleşmeyi kolaylaştırmak üzere katkı maddesi olarak seçilmiştir. Karışım oranının ve sıcaklığın anortit oluşumuna etkileri incelenmiştir.

Bu çalışma ile ülkemiz için “stratejik” bir hammadde olan borun ülkemizde kullanım alanlarının geliştirilebilmesi, termik santrallerde atık olarak elde edilen uçucu küllerin ekonomimize kazandırılması ve böylece son dönemde geliştirilen ileri teknolojik malzemelerin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

6.1. Hammaddelerin Özellikleri

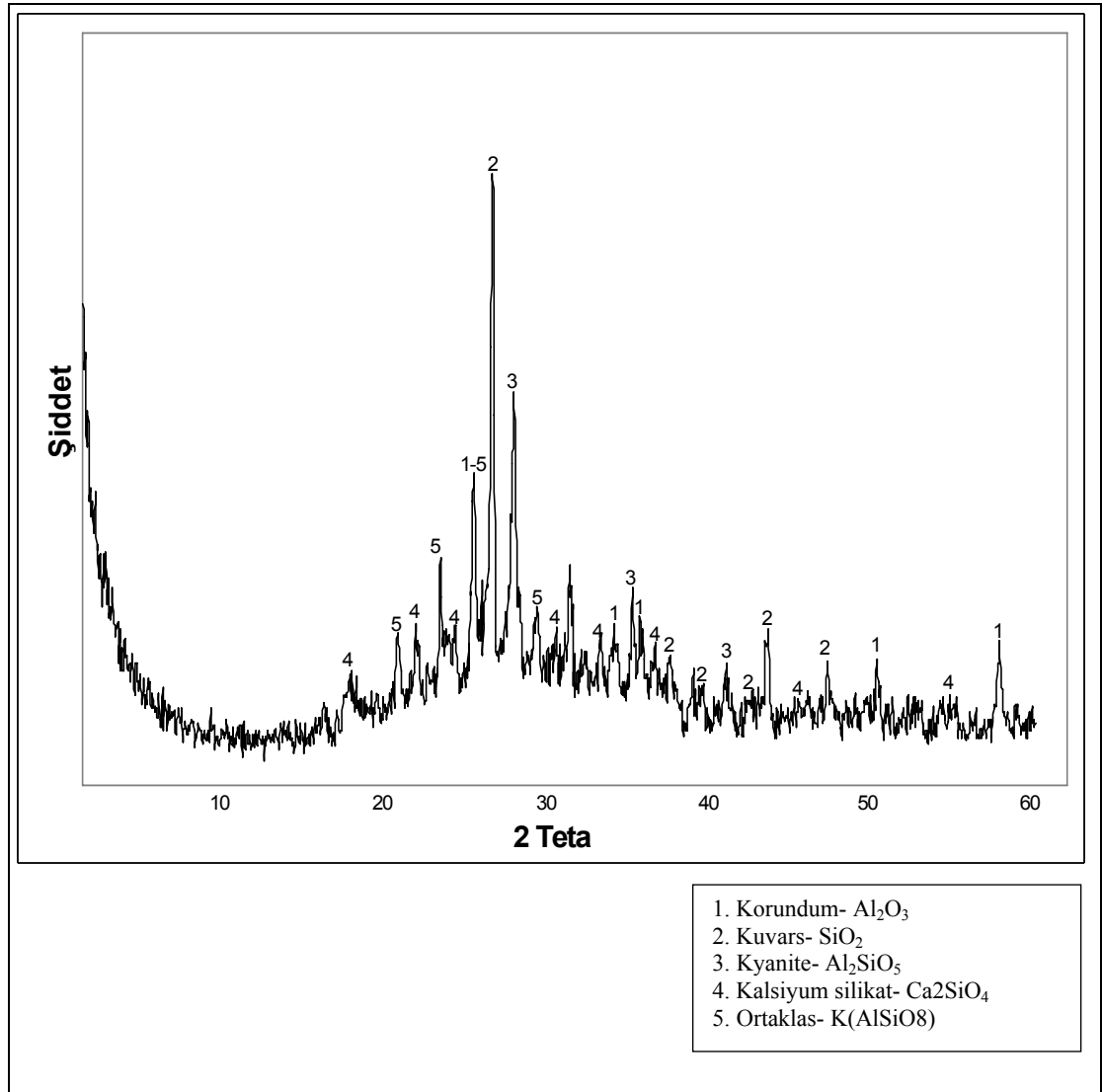
6.1.1. Uçucu kül

Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küller Muğla Yatağan Termik santralinden temin edilmiştir. Uçucu küllerin kimyasal bileşimi X-ışınları floresans cihazı (Shimadzu, XRF-1700) ve X-ışınları kırınım cihazı (Siemens) kullanılarak tespit edilmiştir. Çizelge 6.1’deki uçucu külün XRF analizinden görüldüğü üzere, uçucu kül yüksek miktarlarda SiO_2 , Al_2O_3 ve CaO içermektedir. Bununla birlikte uçucu kül %7 civarında demir oksit, %3 civarında potasyum oksit ve magnezyum oksit içermektedir.

Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan uçucu külün kimyasal analizi

<i>Bileşik</i>	<i>(%)</i>	<i>Bileşik</i>	<i>(%)</i>	<i>Bileşik</i>	<i>(%)</i>
SiO_2	43,04	Fe_2O_3	7,22	MgO	2,81
Al_2O_3	22,32	K_2O	3,26	TiO_2	1,12
CaO	16,15	SO_3	3,14	Diğer	0,94

Uçucu külün XRD analizinde (Şekil 6.1.) ise, uçucu külün kuvars (SiO_2), korundum (Al_2O_3), kyanit (Al_2SiO_5), kalsiyum silikat (Ca_2SiO_4) ve ortoklas $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ içerdiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.1. Uçucu külün XRD analizi

6.1.2. Borik asit

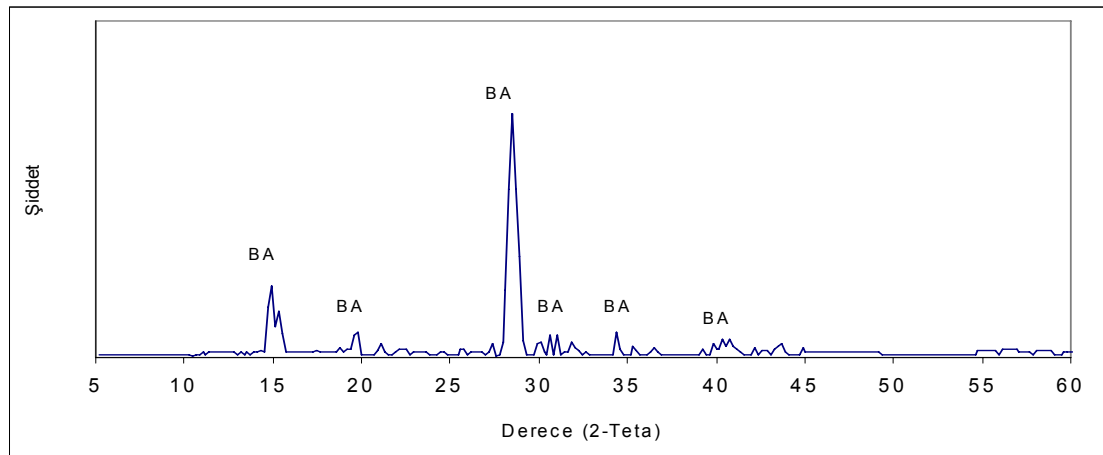
Deneysel çalışmada kullanılan bor oksit, karışıma borik asit şeklinde ilave edilmiştir. Borik asit Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları'ndan temin edilmiştir.

Borik asitin kimyasal bileşimi X-ışınları floresans cihazı (Shimadzu, XRF-1700) kullanılarak tespit edilmiş ve Çizelge 6.2’de borik asitin kimyasal yapısı verilmiştir.

Çizelge 6.2. Deneyde kullanılan borik asitin kimyasal yapısı

Bileşen	Değer	Bileşen	Değer
H ₃ BO ₃	% 99.9	SiO ₂	38 ppm
SO ₄	190 ppm	Mg	250 ppm
Na	46 ppm	K	19 ppm
Ca	52 ppm	Pb	8 ppm
Fe	22 ppm	Cu	3 ppm
Al	18 ppm	Ni	5 ppm

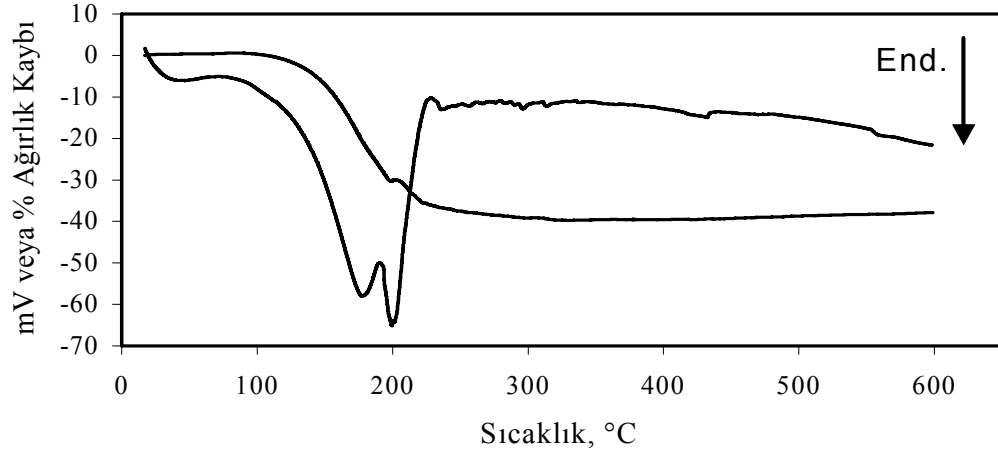
Borik asitin %99,9 saflıkta olduğu ve çok düşük miktarlarda safsızlık olarak SO₄, Na, Ca, Fe, Al ve Mg içerdiği görülmüştür. Ayrıca, saf borik asitin içinde %56,27 oranında bor oksit bulunmaktadır. Kullanılan borik asitin yapılan XRD analizinde ise sadece borik asit piklerine rastlandığı ve yapının tamamen kristalin olduğu belirlenmiştir. Borik asitin XRD grafiği Şekil 6.2.’de verilmektedir.



Şekil 6.2. Borik asitin XRD grafiği (BA=borik asit)

Ayrıca kullanılan borik asite DTA-TG cihazında sıcaklığa karşı ağırlık kaybı ve ısısal değişimleri incelenmiştir. Şekil 6.3.’teki DTA-TG eğrisi incelendiğinde borik asitin yaklaşık 300°C’ye kadar %40 bir ağırlık kaybı olduğunu ve bu ağırlık kaybına karşılık 2 tane endotermik pik oluştuğunu göstermiştir. DTA-TG analizi 10°C/dakika

gaz akış hızı ile azot atmosferinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.3. Borik asitin DTA-TG grafiği

Deneyde kullanılan borik asitin tane boyutları Malvern marka 2600 serisi lazer tane boyut cihazıyla ölçülmüş ve tane boyut dağılımı Çizelge 6.3'te verilmiştir. Ayrıca borik asitin bazı fiziksel özellikleri de Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Borik asidin tane boyutu dağılımı

Tane Boyutu Dağılımı	%
+1,000 mm	1,23
-0,060 mm	3,12

Çizelge 6.4. Borik asidin bazı fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Özgül Ağırlığı, g/cm ³	1,48
Dökme Yoğunluğu, g/cm ³	0,95 ± 0,03
Oluşum Isısı, kcal/mol	-262 ± 0,32
Ürünün Fiziki Durumu	Kristal ve Akıcı

6.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar

Deneylerde kullanılan *normal atmosfer fırını* Alser Teknik A.Ş'den alınmış kamaralı yüksek sıcaklık fırınıdır. Fırınlara ısıtma ve soğutma hızı programlanabilir olup, istenildiği şekilde ayarlanabilmektedir. Isıtma-soğutma ve sinterlemeler normal atmosfer koşullarında yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan pelletler Shimadzu Briquetting machine MP-35 marka tek yönlü soğuk *presleme cihazıyla* hazırlanmıştır. Pelletler 30 mm çapında ve 2 mm yüksekliğinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Pelletlerin hazırlanması için uygulanan basınç 30 ton'dur.

Uçucu külün ve üretilen malzemelerin *kimyasal bileşimi* X-ışınları floresans cihazı (Shimadzu, XRF-1700) kullanılarak tespit edilmiştir.

Deneylerde kullanılan borik asitte ve deneyler sonucunda üretilen numunelerde *oluşan fazların* varlığı XRD kullanılarak tespit edilmiştir. Kullanılan XRD Siemens marka olup numuneler 1 °C/dakikalık tarama hızı ile 0-60°'ler arasında ve CuK α , radyasyonu kullanılarak incelenmiş olup, sonuçlar JADE 7.0 Software Programı ve International Centre For Diffraction Data (Powder Diffraction File, PDF-2-Release 2004) kullanılarak analiz edilmiştir. Pelletler XRD incelemesi yapılması amacıyla kırılıp öğütülmüştür.

Borik asitin ve üretilen malzemelerin *tane boyutları* Malvern marka 2600 serisi lazer tane boyut cihazıyla ölçülmüştür.

Farklı sıcaklıklarda sinterlenerek üretilen pelletlerin *iç yapı incelemesi* JEOL-6360 LV marka EDS (Energy Dispersion Spectroscopy) imkanına sahip taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM incelemesi amacıyla pelletlerin yüzeyleri altın ile kaplanmıştır.

6.3. Uçucu Külden Pellet ve Numunelerin Hazırlanması

Yapılan deneylerde iki farklı karışım kullanılmıştır. Birinci karışım, uçucu küllere, anortit oluşumuna imkan sağlamak amacıyla stokiyometrik anortit bileşimi ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) baz alınarak Al_2O_3 ve CaO tozları ilave edilerek ana karışım elde edilmiştir.

Ayrıca, elde edilecek sonuçların birbiriyle karşılaştırılması amacıyla aynı hammaddeler kullanılarak elde edilen ana karışım içerisine %2, %4 ve %6 oranında bor oksit ilave edilerek bor katkılı ikinci karışım elde edilmiştir. Bor oksit, borik asit (H_3BO_3) olarak karışıma ilave edilmiştir. Karışımların miktar ve oranları aşağıda verilmiştir.

Stokiyometrik anortit bileşimi ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

M_{Ca} : 40,078 g/mol

M_{Al} : 26,98 g/mol

M_{Si} : 28,085 g/mol

M_{O} : 16 g/mol

Çizelge 6.5. Anortit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) içerisindeki oksit miktarları ve %'leri

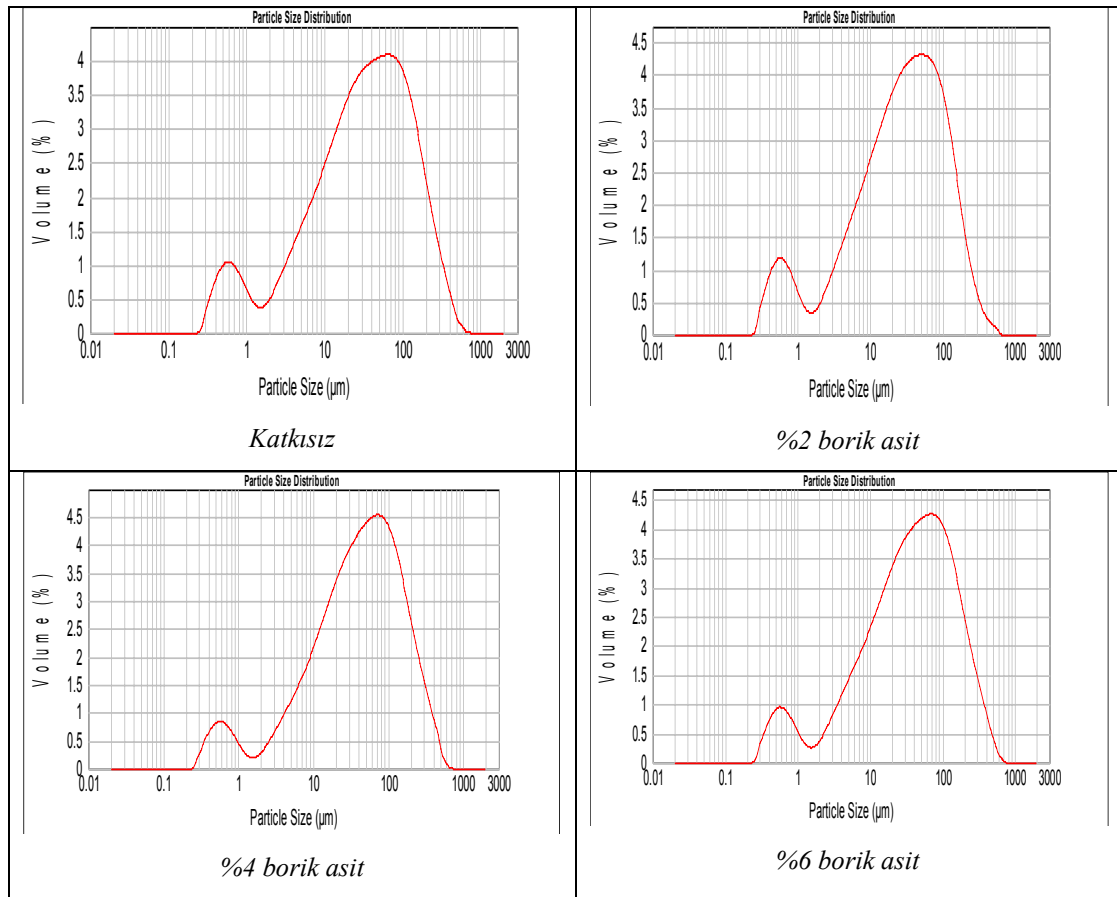
Bileşik	Molekül Ağırlığı (g/mol)	%
CaO	56,08	20,16
Al_2O_3	101,96	36,65
2SiO_2	120,17	43,20
Toplam	278,21	100

Anortit teorik olarak %20,16 CaO, %36,65 Al_2O_3 , %43,20 oranında SiO_2 içermektedir. Deneyin sonuçlarına göre tekrarlanabileceği ihtimali göz önünde bulundurularak başlangıçta 200 g uçucu kül kullanılmış ve uçucu kül içerisine anortit oluşumunu sağlamak amacıyla 28,66 g Al_2O_3 ve 8,02 g CaO ilave edilerek bor katkısız ana karışım elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen ana karışımın %2 (8,40 g),

%4 (16,81 g) ve %6'sı (25,21 g) oranında borik asit ilave edilerek bor katkılı karışım elde edilmiştir.

Söz konusu katkısız ve bor katkılı karışımlar ayrı ayrı halkalı öğütücüde 15 dakika süreyle öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Böylece karışımdaki parçacıkların aynı tane büyüklüğüne getirilmesi sağlanmıştır.

Daha sonra elde edilen karışımda uniformluğu sağlamak amacıyla karışımlar 45 dakika süreyle bilyalı karıştırıcıda karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Tozların tane boyut dağılım grafikleri Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Borik asit katkılı ve katkısız numunelerin 15 dakika öğütme ve 45 dakika karıştırma işleminden sonraki ortalama tane boyutları

Borik asit katkılı ve katkısız numunelerin 15 dakika öğütme ve 45 dakika karıştırma işleminden sonra elde edilen tozların ortalama tane boyutları 30-43 μm arasında

değiştirdiği tespit edilmiştir (Çizelge 6.5.).

Çizelge 6.6. Borik asit katkılı ve katkısız numunelerin ortalama tane boyutları

	Katkısız	%2 B_2O_3	%4 B_2O_3	%6 B_2O_3
<i>Ortalama tane boyutu</i> <i>d(0,5) μm</i>	34	30	43	39

Elde edilen karışımlar tek yönlü soğuk presleme ile 30 mm çapında ve 2 mm yüksekliğinde 30 ton basınç altında silindirik numuneler (pellet) haline getirilerek pelletlerin ham yoğunlukları ölçülmüştür. Ham yoğunlukların hesaplanmasında, düzgün geometrik şeklin kütle ve hacim değerleri kullanılmıştır. Ham yoğunluk değerleri 1,50 g/cm³ olarak bulunmuş olup, bu değer %54 relatif yoğunluğa denk gelmektedir. (Anortitin teorik yoğunluğu 2,76 g/cm³'dür) [20].

Hazırlanan pelletler bir refrakter tuğla üzerine konularak bir kutu fırın içerisinde 10°C/dakika ısıtma hızı ile 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C ve 1300°C sıcaklıklarda 2 saat süreyle bekletilerek sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işleminden sonra yine 10°C/dakika soğutma hızı ile oda sıcaklığına soğutulmuştur.

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, termik santral uçucu külü ve bor (borik asit) kullanılarak, elektronik endüstrisinde entegre devre altlığı malzemesi olarak kullanılan anortit seramik malzeme toz metalurjisi yöntemleri ile üretilmeye çalışılmıştır. Katkısız ve farklı oranlarda (%2, %4 ve %6) borik asit katkısı kullanılarak elde edilen numuneler 900°C – 1300°C sıcaklıkları arasında sinterlenmiş ve sinterlenen pelletler XRF, XRD ve SEM kullanılarak karakterize edilmiştir.

7.1. Sinterlenen Pelletlerin XRF Analizleri

900°C-1100°C arasında 2 saat sinterlenen pelletlerin Çizelge 7.1’de yer alan XRF analizi neticesinde numunelerdeki SiO₂, Al₂O₃ ve CaO oranlarının teorik anortit bileşimi olan %43,20 SiO₂, %36,65 Al₂O₃ ve %20,16 CaO oranlarına yakın olduğu görülmüştür.

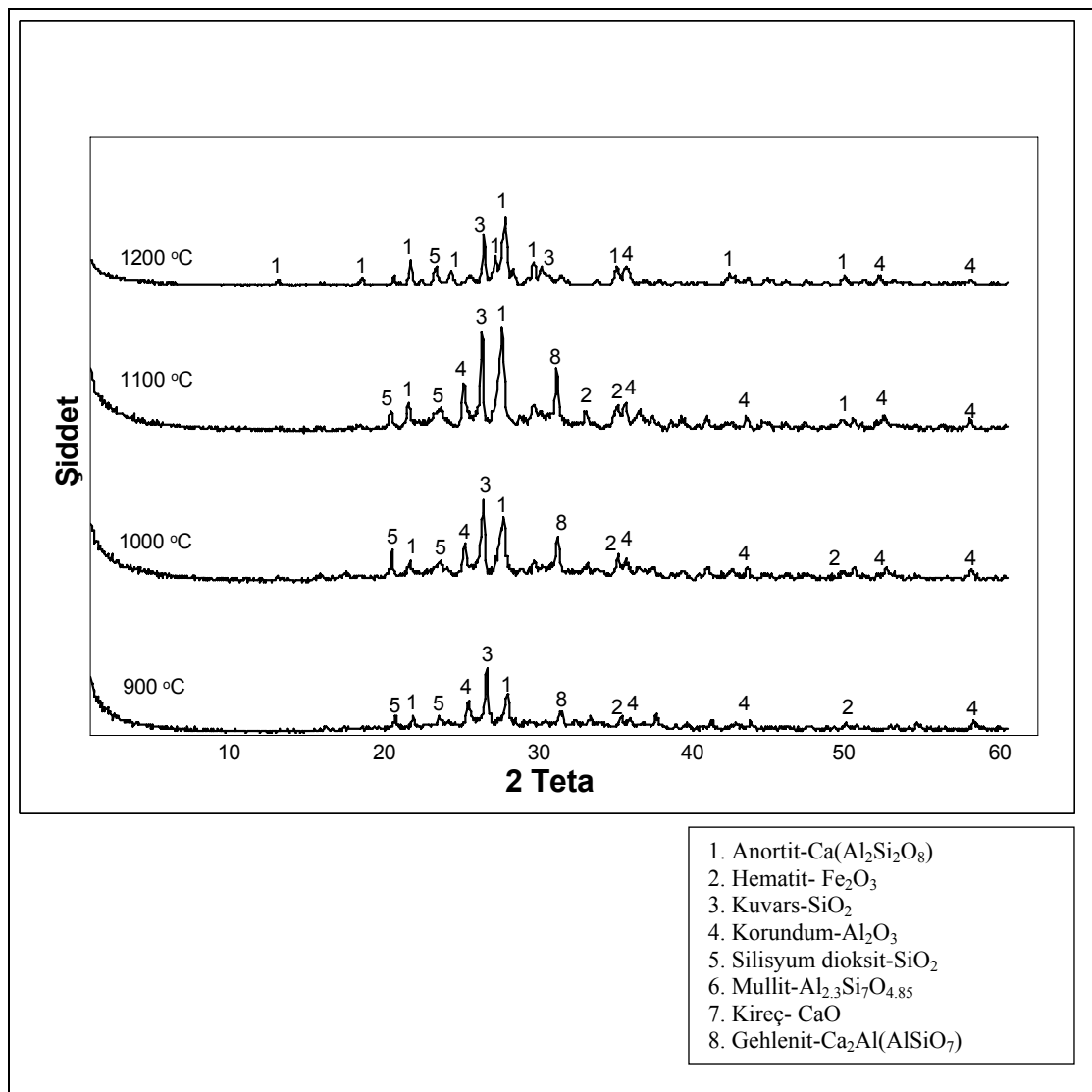
Çizelge 7.1. Bor katkılı ve katkısız karışımların 900°C-1300°C’lerde 2 saat sinterlendikten sonraki XRF analizi

	Sıcaklık (°C)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	SO ₃	TiO ₂
Katkısız	900	39,29	28,45	17,72	5,52	2,57	2,65	2,49	0,86
	1000	37,35	29,72	18,27	5,45	2,37	2,56	2,89	0,82
	1100	40,93	28,26	17,81	5,75	1,96	3,25	0,57	0,84
%2	900	39,61	27,05	18,18	6,18	2,61	2,55	2,46	0,88
	1000	40,77	26,29	18,56	5,77	2,51	2,65	1,57	0,80
	1100	41,05	27,27	18,30	5,92	2,02	2,74	0,87	0,78
%4	900	40,40	27,58	17,27	5,59	2,67	2,56	2,11	0,83
	1000	40,96	27,76	18,14	5,86	2,52	2,57	0,54	0,87
	1100	41,21	27,14	17,68	6,39	1,54	2,58	1,39	0,69
%6	900	40,61	26,31	18,51	5,96	2,56	2,46	1,71	0,90
	1000	40,11	27,95	18,21	6,40	2,29	2,58	0,99	0,86
	1100	41,60	27,58	18,12	6,67	2,13	2,32	0,20	0,82

Ancak tüm sıcaklıklarda üretilen katkısız ve farklı oranlarda borik asit katkılı numunelerde yüksek miktarda Fe₂O₃, K₂O, MgO, SO₃ ve TiO₂’ye rastlanmıştır. Bu bileşikler, anortit üretiminde kullanılan uçucu külden gelmektedir.

7.2. Anortit Oluşumunun XRD Kullanılarak İncelenmesi

Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş katkısız numunelerin XRD'si incelendiğinde 900°C'de anortit olduğu ve sıcaklık arttıkça anortit miktarının arttığı gözlenmiştir. 900°C'de katkılı ve katkısız numunelerde oluşan anortit yanında önemli miktarda kuvars, düşük miktarlarda demir oksit, korundum, mullit, kalsiyum oksit ve gehlenit fazı oluşmuştur (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. 900°C - 1200°C arasında sinterlenen borik asit içermeyen (katkısız) pelletlerin XRD analizi

900°C - 1200°C arasında sinterlenen borik asit içermeyen (katkısız) pelletlerin XRD analizi (Şekil 7.1.) incelendiğinde sıcaklık arttıkça kuvars miktarı azalmakta anortit miktarı ise artmaktadır. Ancak 1200°C’de dahi tek fazlı anortit yapısı elde edilememiştir. Bununla birlikte 1200°C’de sinterlenen numunelerde yapının hemen hemen tamamen anortite dönüştüğü, ancak anortit yanında başlangıç malzemesi olan uçucu külden gelen demir oksit ve anortit oluşturmaya kalan SiO_2 ve Al_2O_3 içerdiği tespit edilmiştir.

900°C - 1200°C arasında sinterlenen %2, %4 ve %6 borik asit ilave edilmiş katkılı numunelerin Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4’te verilen XRD analizi incelendiğinde, 900°C’de yapıda önemli miktarda kuvars olduğu, ancak sıcaklık arttıkça kuvars miktarının düştüğü, buna paralel olarak da anortit miktarının arttığı tespit edilmiştir. 1200°C’de yapının hemen hemen tamamen anortite dönüştüğü ancak yapıda anortit yanında kuvars, alümina ve kalsiyum olduğu görülmüştür.

Bu numuneler katkısız numuneler ile karşılaştırıldığında, aynı sıcaklıkta katkısız numunelerde kuvars ve diğer safsızlıkların oranının daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna karşın borik asit katkılı numunelerde anortit miktarı, aynı sıcaklıklarda katkısız numunelere göre daha yüksektir. Bu sonuç borik asit ilavesinin anortit oluşumunu hızlandığını göstermektedir. Ancak, %2, %4 ve %6 borik asit katkılı numuneler kendi aralarında mukayese edildiğinde aralarında anortit oluşumu ve safsızlık miktarları açısından belirgin bir farkın olmadığı görülmüştür.

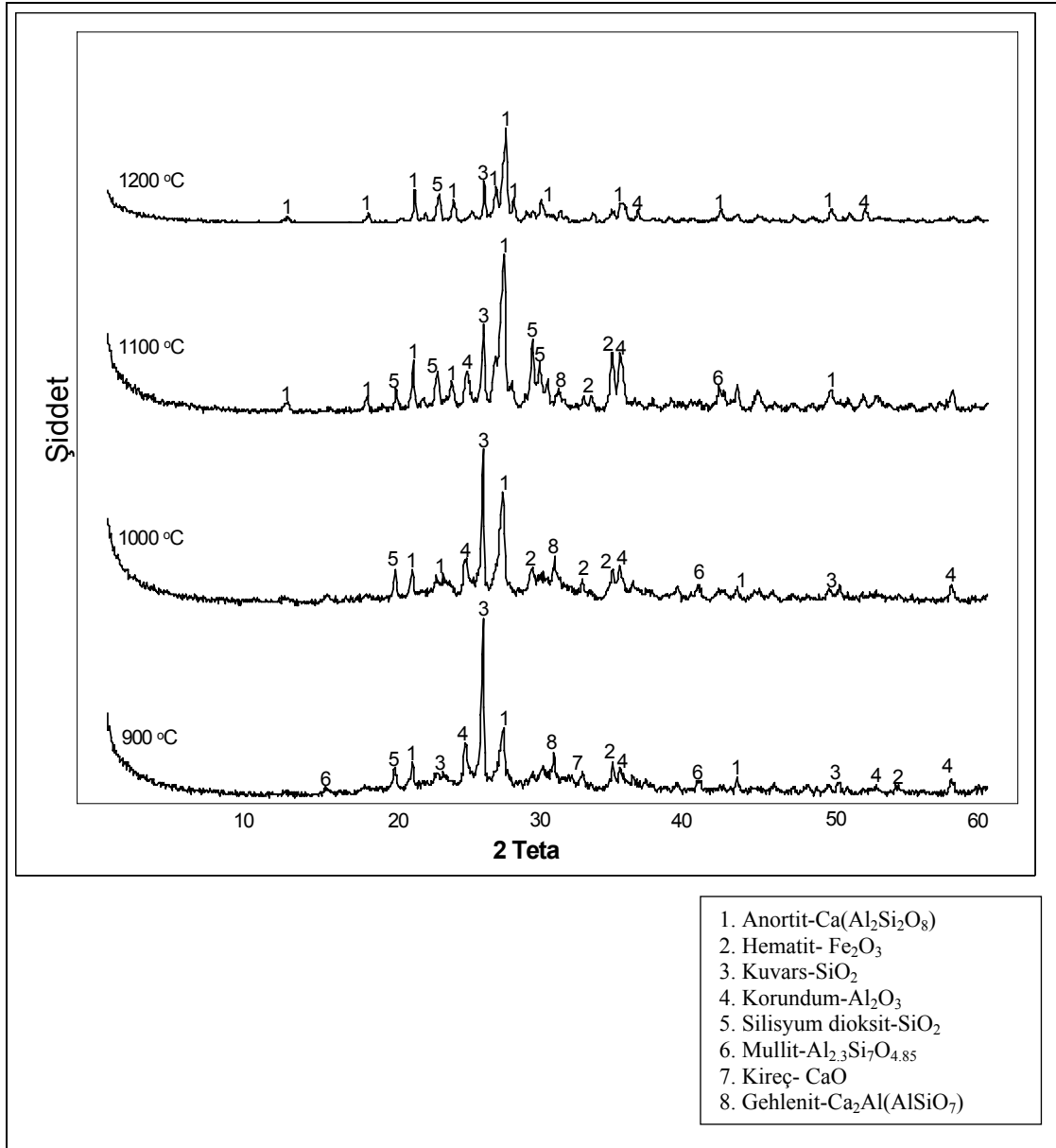
Diğer bir husus ise, 900°C -1200°C’de sinterlenen borik asit katkılı ve katkısız numunelerde XRD pikleri, örneklerin amorf bir yapıya sahip olduğunu ve sıcaklık arttıkça amorf yapının azalarak kristalleşmenin arttığını göstermiştir [57]. Ancak tüm sıcaklıklarda amorf yapının korunduğu tespit edilmiştir.

Literatürde anortit üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı başlangıç hammaddelerinin anortit oluşumuna farklı etkileri olduğu görülmektedir.

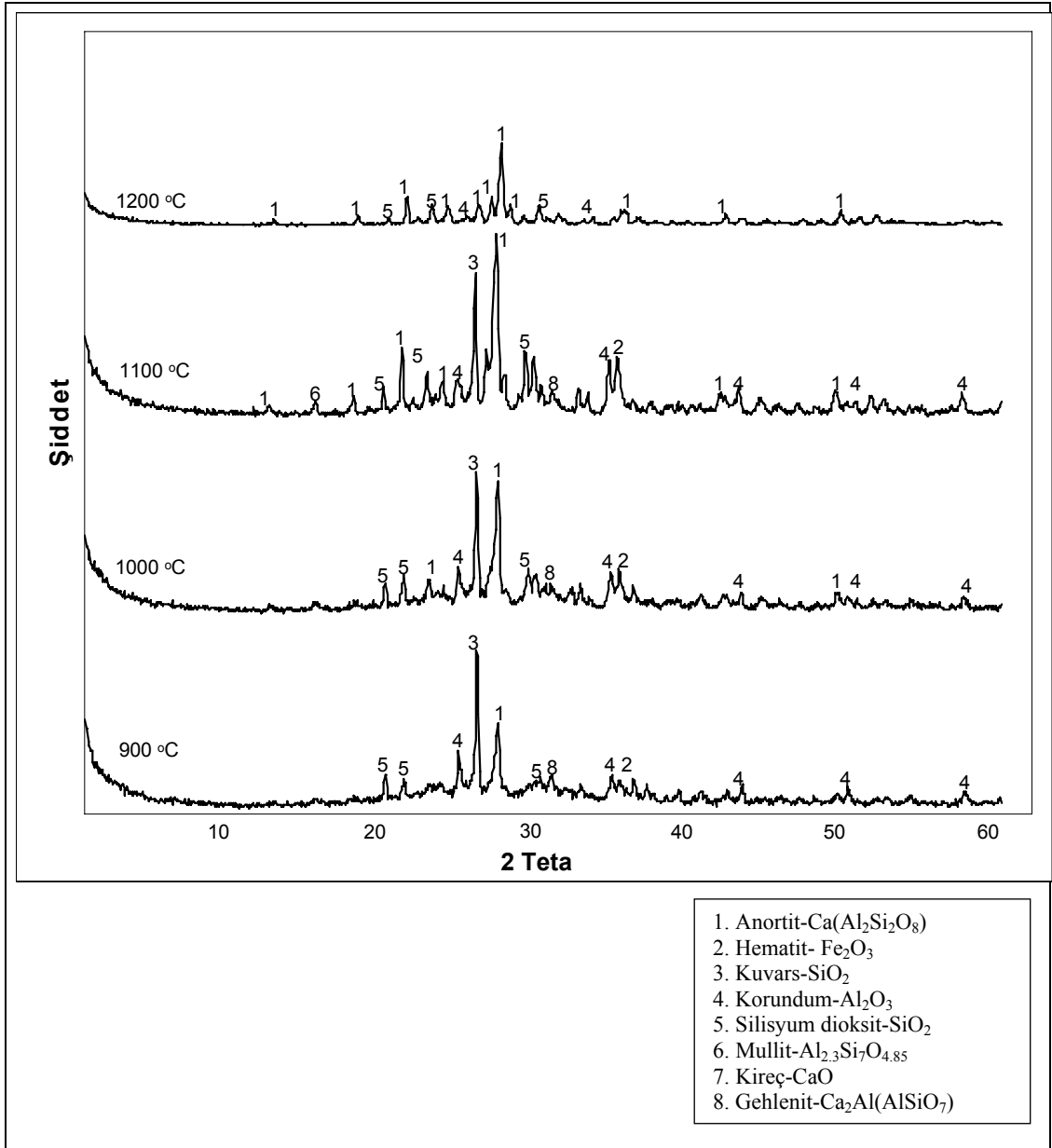
Mergen ve Aslanoğlu tarafından yapılan çalışmada saf kaolen, kalsit ve kuvars kullanılarak 1100°C’de hemen hemen tamamen anortit yapısı elde edilmesine rağmen, anortit fazı yanında gehlenit ve tridimit fazları da gözlenmiştir. Ancak, başlangıç hammaddelerine %3 B₂O₃ katılmasıyla 1000°C’de yapının tamamen anortite dönüştüğü tespit edilmiştir [3].

Yuichi Kobayashi ve Etsuro Kato tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, yüksek saflıkta kaolen ve çok düşük tane boyutlarında kalsit (1,5 µm) kullanılarak 1200°C’de tek fazlı anortit yapısı elde edilmiştir [46].

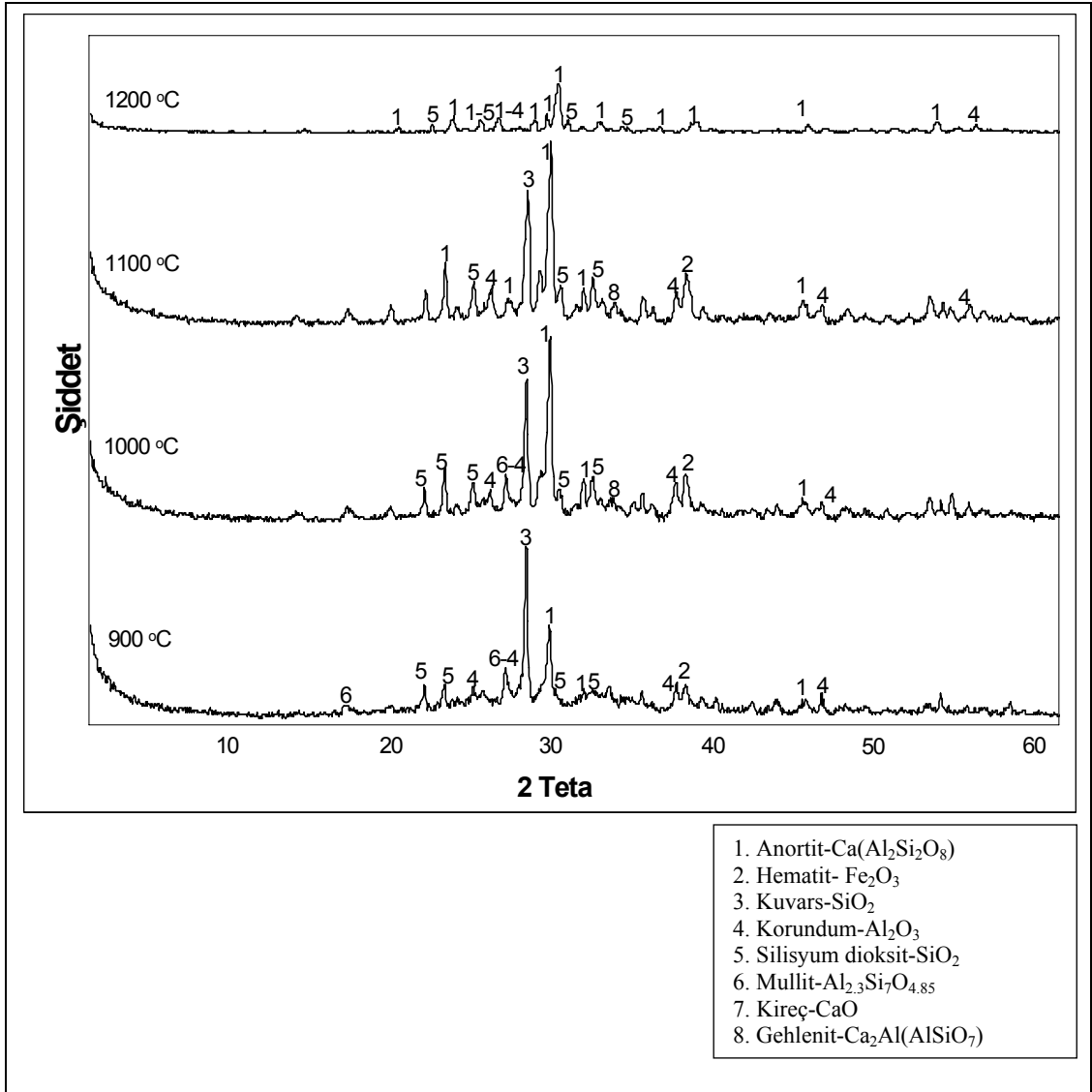
İri tane boyutlarına sahip kalsit, kuvars ve kaolen kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada ise, tek fazlı anortit yapısı ancak 1300°C’de elde edilmiştir. Ayrıca sisteme kolemanit ilavesi anortit oluşum sıcaklığını 1200°C’ye düşürmüştür [48].



Şekil 7.2. 900°C - 1200°C arasında sinterlenen %2 borik asit içeren pelletlerin XRD analizi



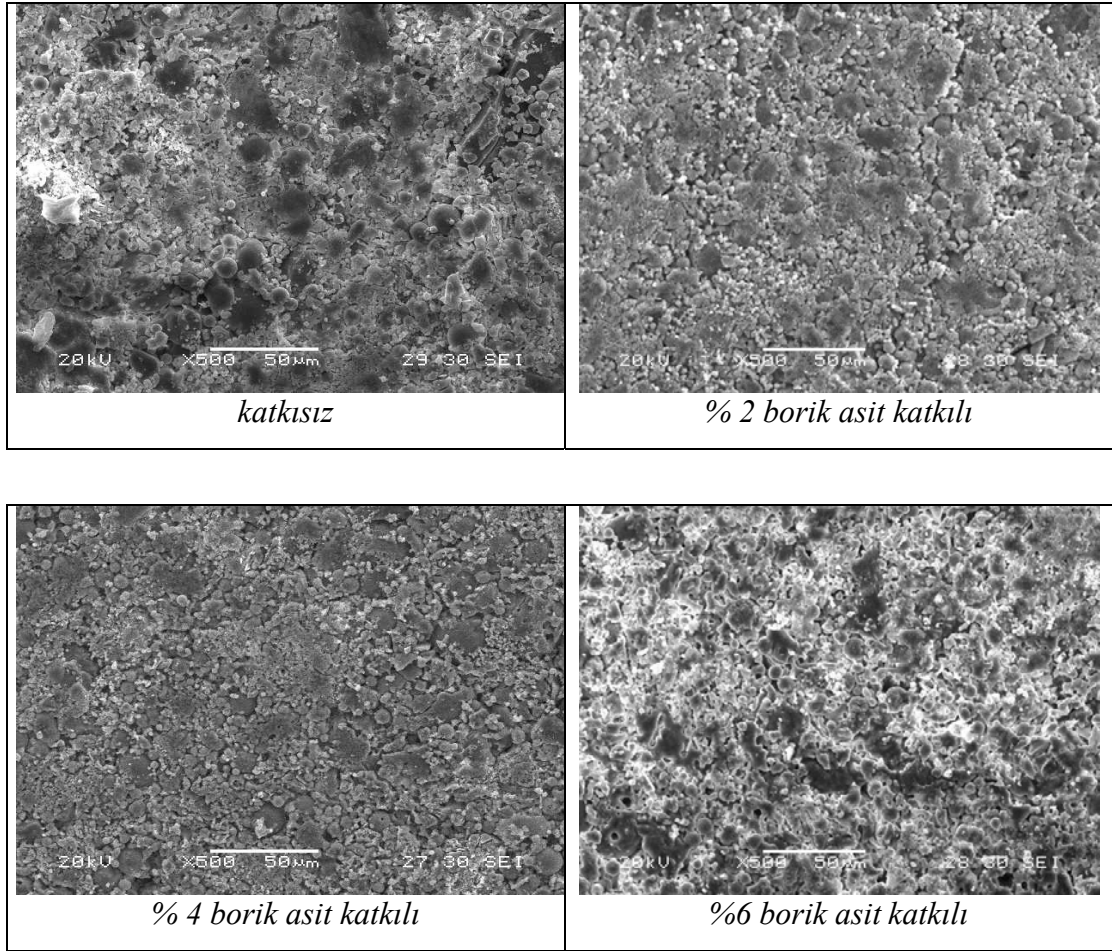
Şekil 7.3. 900°C - 1200°C arasında sinterlenen %4 borik asit içeren pelletlerin XRD analizi



Şekil 7.4. 900°C - 1200°C arasında sinterlenen %6 borik asit içeren pelletlerin XRD analizi

7.3. Anortit Numunelerinin SEM İncelemesi

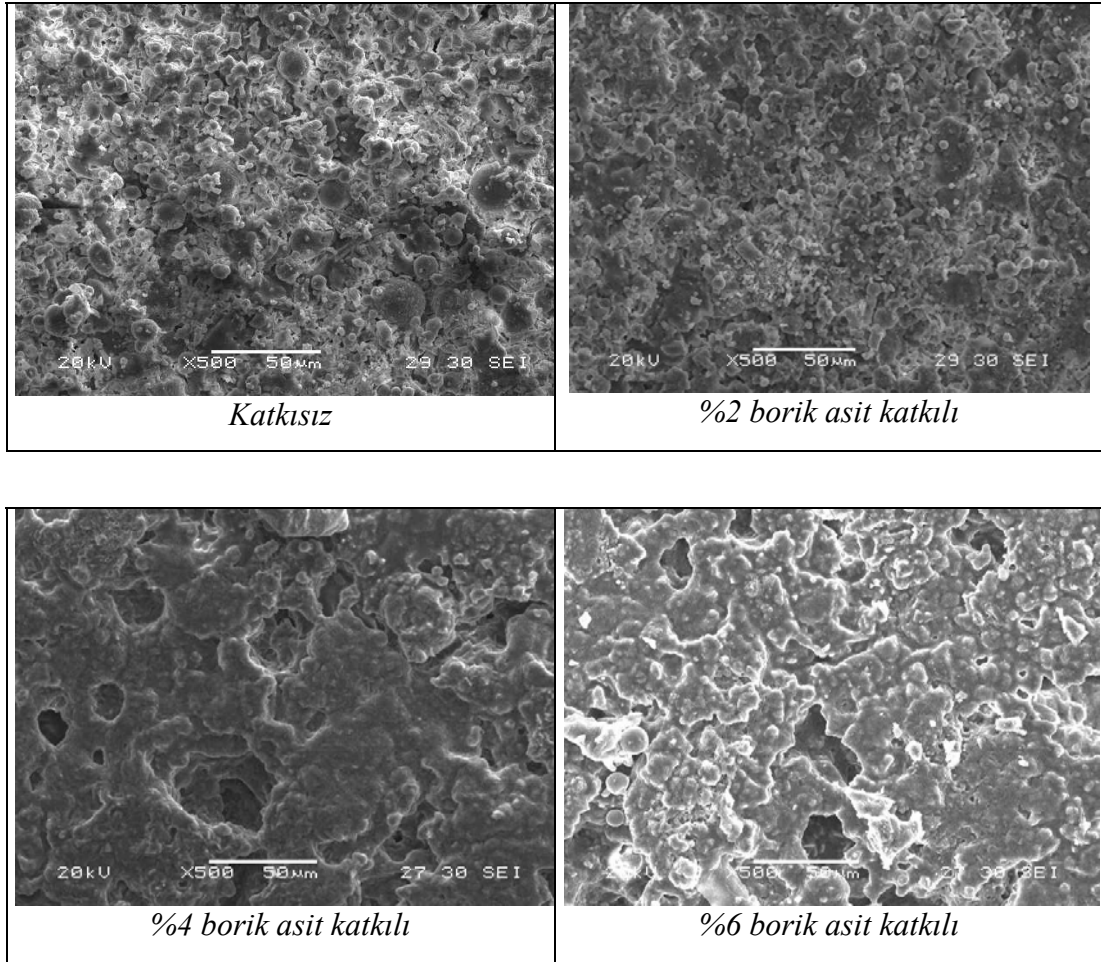
900°C’de sinterlenmiş borik asit içermeyen (katkısız) ve borik asit içeren (%2, %4, %6) katkılı numunelerin SEM fotoğrafları (Resim 7.1) karşılaştırıldığında, katkısız numunenin ince taneler yanında iri tanelere de sahip olduğu, diğer bir deyişle yapının uniform olmadığı görülmüştür. Ancak katkılı numune yapısının ise daha uniform olduğu tespit edilmiştir.



Resim 7.1. 900°C’de Borik asit içermeyen (katkısız) ve borik asit içeren karışımların elektron mikroskobu fotoğrafları (büyütme oranı x500)

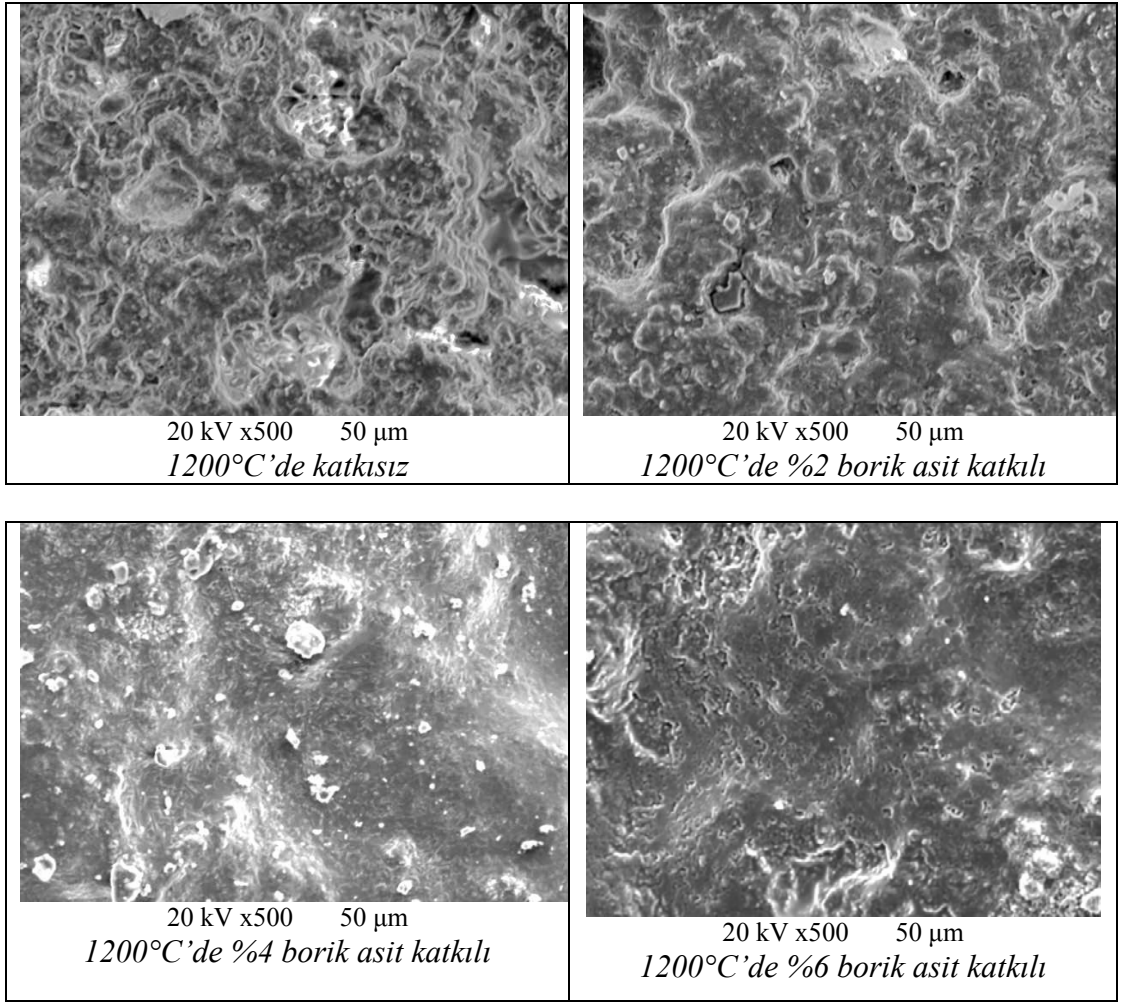
1100°C’de sinterlenen numunelerde ise tane yapısının 900°C’ye göre daha büyük olduğu ve katkılı numunelerde borik asit oranı arttıkça yapıda sinterleşmenin arttığı tespit edilmiştir (Resim 7.2.).

Buna ilaveten 1100°C’de katkılı numunelerde borik asit oranı arttıkça yapıda kısmi ergimelerin ve dolayısıyla camsı faz oranının arttığı, porozite oranının ise azaldığı tespit edilmiştir.



Resim 7.2. 1100°C’de Borik asit içermeyen (katkısız) ve borik asit içeren karışımların elektron mikroskobu fotoğrafları (büyütme oranı x500)

1200°C’de sinterlenen numunelerin SEM kullanılarak yapılan iç yapı incelemesinde hem katkılı hem de katkısız numunelerde ergimenin meydana geldiği ve yapının yüksek oranda camsı faz içerdiği tespit edilmiştir (Resim 7.3.).



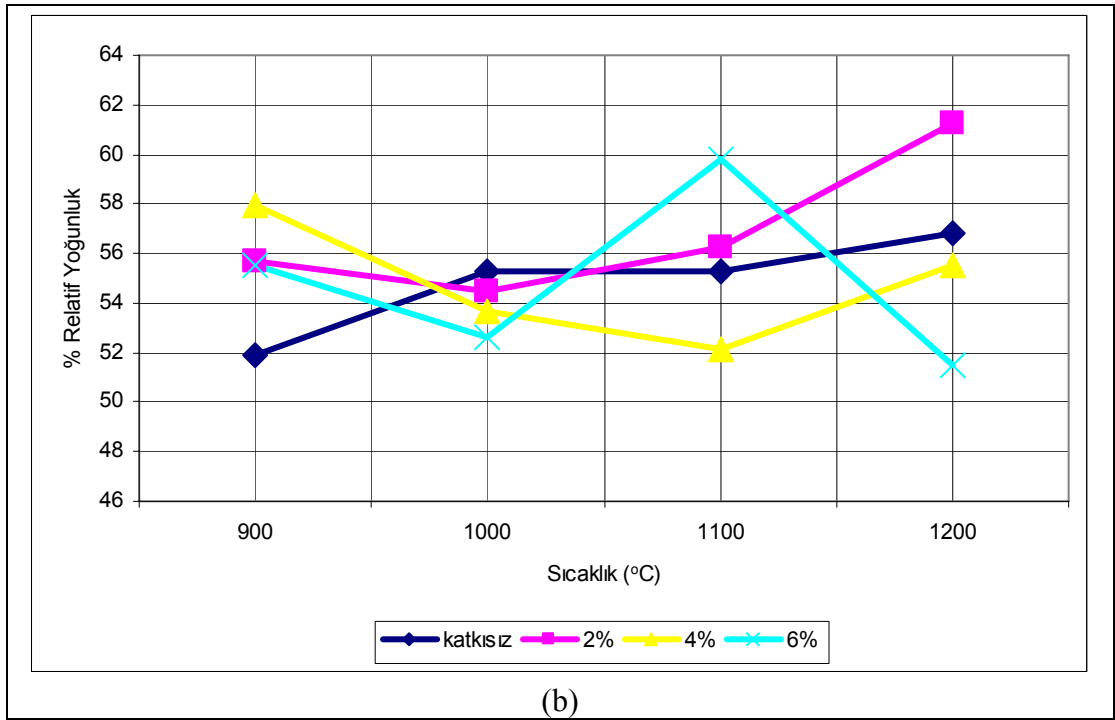
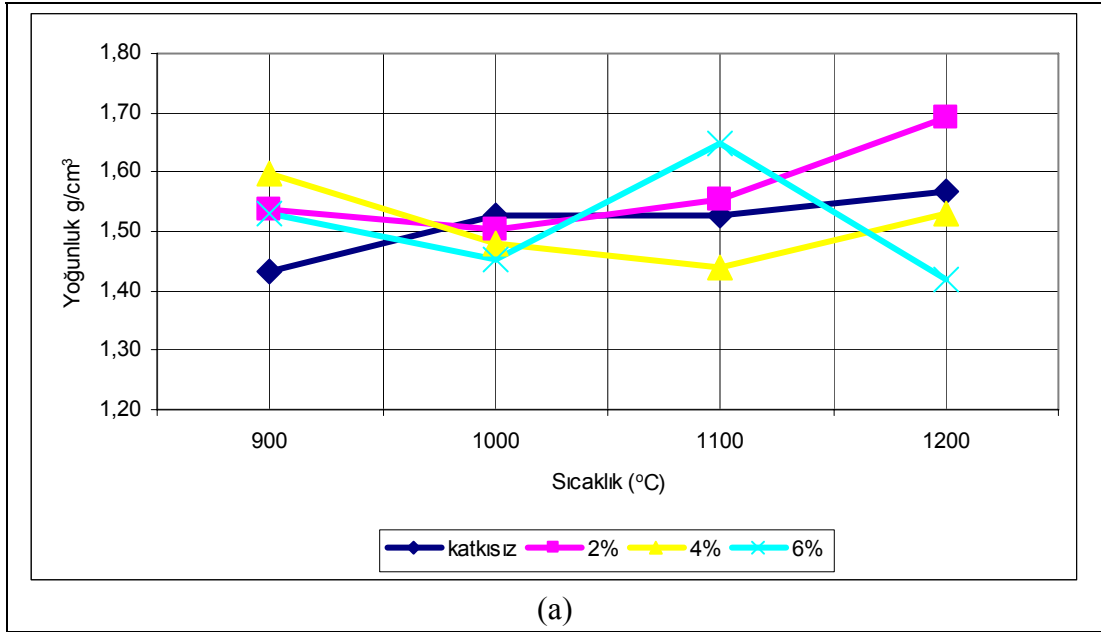
Resim 7.3. 1200°C'de Borik asit içermeyen (katkısız) ve borik asit içeren karışımların elektron mikroskobu fotoğrafları (büyütme oranı x500)

7.4. Yoğunluk

900°C, 1000°C, 1100°C ve 1200°C sıcaklıklarda 2 saat sinterleme işleminden sonra katkısız ve %2, %4, %6 borik asit içeren karışımların yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri incelenmiştir.

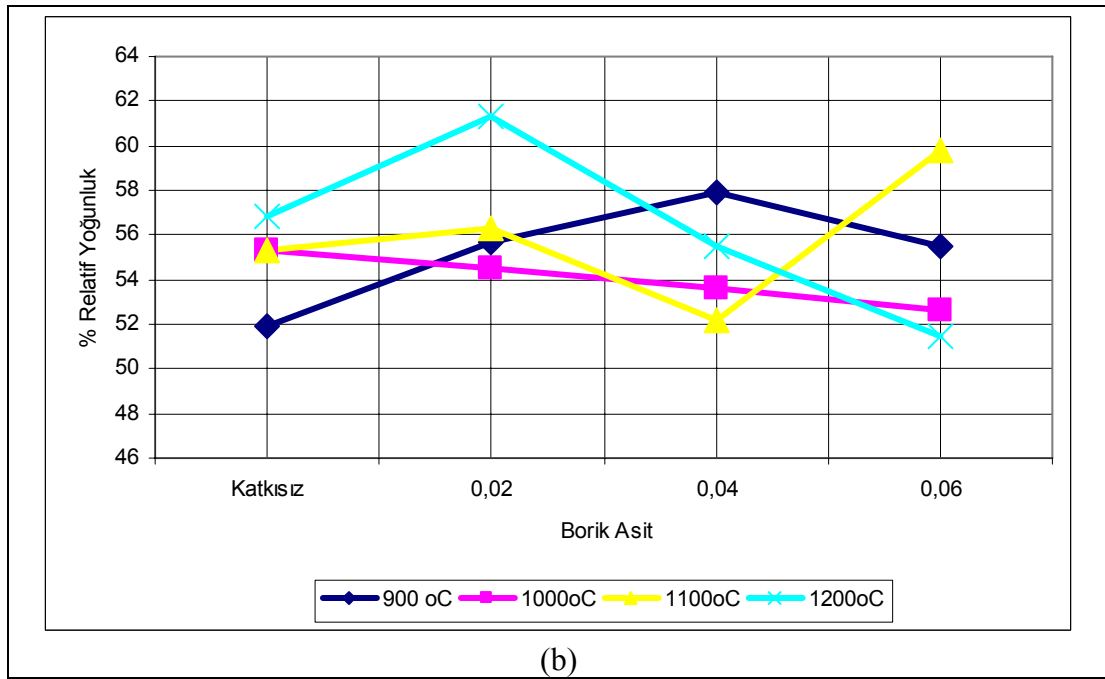
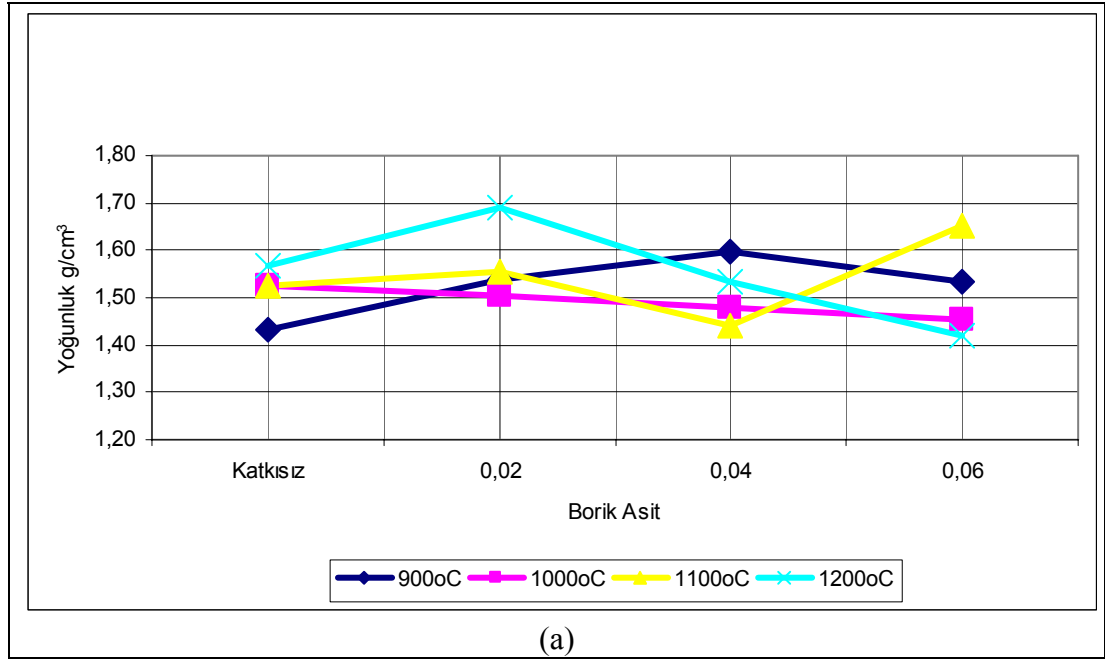
Genel olarak yoğunluk değişimleri incelendiğinde yoğunlukların sıcaklıkla kararlı bir şekilde artmadığı tespit edilmiştir. Şekil 7.5.a'da katkısız numunenin yoğunluğu sıcaklıkla kararlı bir şekilde artarken, katkılı numunelerin değişimleri ise kararlı değildir. Bununla birlikte genel bir değerlendirme yapıldığında, sıcaklık arttıkça borik asit katkılı ve katkısız numunelerin yoğunluk değerleri artmakta, fakat Şekil 7.5.b'de görüldüğü gibi, 1200°C'de dahi ulaşılan maksimum relatif yoğunluk değerleri %62'yi geçmemektedir. Hatta 1200°C'de sinterlenen %6 borik asit katkılı numunede yoğunluk değeri 1100°C'ye göre düşmüştür. Bunun nedeni %6 borik asit katkılı pelletin 1200°C'de kısmen ergimesidir.

Daha yüksek yoğunluk değeri elde etmek için katkılı ve katkısız numuneler 1300°C'de 2 saat süreyle sinterlenmiş, ancak tüm numunelerin bu sıcaklıkta eriyerek fırın taban tuğlasına yapıştığı görülmüş olup, ön şekillendirilmiş malzemenin şeklini koruması sağlanamamıştır. Bu nedenle bu sıcaklıkta uygun pelletler üretmek ve karakterizasyon yapmak mümkün olamamaktadır.



Şekil 7.5. Borik asit katkılı ve katkısız pelletlerin yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimi (a) ve % relatif yoğunluk değişimi (b)

Şekil 7.6.a ve Şekil 7.6.b’de ise borik asit katkısının farklı sıcaklıklarda yoğunluğa etkileri saptanmaya çalışılmış ancak borik asit katkısı ile yoğunluk değişimleri arasında bir ilişki kurulamamıştır.



Şekil 7.6. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen pelletlerin yoğunluklarının borik asit miktarına göre değişimi (a) ve % relatif yoğunluk değişimi (b)

900°C’de %4 borik asit değerine kadar yoğunluk artarken %6 borik asit değerinde yoğunluk düşmektedir. 1000°C’de % borik asit miktarı arttıkça yoğunluk sürekli bir şekilde azalmaktadır. 1200°C’de ise %2 borik asit katkılı pelletlerin yoğunluk değeri katkısız pelletlere göre daha yüksek çıkmasına rağmen, bu değerden sonra sürekli bir

yoğunluk azalması kaydedilmektedir. Özellikle 1200°C'deki sinterleme işleminde % borik asit miktarı arttıkça pelletlerde dış bükey şişmeler olduğu gözlemlenmiştir. Bunun, % borik asit miktarı arttıkça numunenin dış yüzeyinde sinterleşmenin erken başlaması ve erken tamamlanması ve böylece numune içerisindeki ergime sonucu oluşan buhar çıkışına imkan vermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum hacim artışına ve dolayısıyla yoğunluk azalmasına neden olabilmektedir.

Genel olarak yoğunluk ile sıcaklık ve borik asit oranları arasında kararlı bir ilişki kurulamaması kullanılan uçucu külün uniform bir dağılıma sahip olmamasından ve oldukça düşük yoğunluk değerlerinin elde edilmesinden kaynaklanabilir. Ayrıca, uçucu kül içerisinde bulunan ve küle uçuculuk özelliği kazandıran magnezyum, titanyum, alüminyum vb. bileşiklerinin düşük yoğunluk özelliğinin, anortit malzemeye de yansıdığı düşünülmektedir. Diğer bir ifadeyle elde edilen yoğunluk değerleri %60 relatif yoğunluklara denk olup, bu yoğunluk değeri malzemelerin yoğun seramik malzeme olarak adlandırılabilmesi için oldukça düşüktür.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Termik santral atığı olarak ortaya çıkan uçucu küller içerdiği aktif kimyasallar nedeniyle çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır. Bu çalışma ile, çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda uçucu külü ekonomiye kazandırmak üzere, uçucu küllerin başta anortit olmak üzere ileri teknoloji seramik malzeme üretiminde ucuz bir hammadde olarak kullanılmasının mümkün olabileceği gösterilmiştir. Böylece çevreye zarar veren milyonlarca ton uçucu kül değerlendirilerek ülke ekonomisine katkı sağlanmış olacaktır.

Bu çalışmada, termik santral uçucu külü ve bor (borik asit) kullanılarak, elektronik endüstrisinde entegre devre altlığı malzemesi olarak kullanılan anortit seramik malzeme toz metalurjisi yöntemleri ile üretilmeye çalışılmıştır. Katkısız ve farklı oranlarda (%2, %4 ve %6) borik asit katkısı kullanılarak elde edilen numuneler 900°C – 1300°C sıcaklıkları arasında sinterlenmiş ve sinterlenen pelletler XRF, XRD ve SEM kullanılarak karakterize edilmiştir.

8.1. Sonuçlar

1. XRF analizleri farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin bileşiminin anortite yakın olduğunu, ancak numunelerin anortit yanında safsızlıklar içerdiğini göstermiştir.
2. XRD analizleri 900°C’de anortit oluştuğunu ve sıcaklık arttıkça anortit miktarının arttığını, yapıdaki kuvars miktarının ise azaldığını göstermiştir.
3. 900°C’de anortit yanında önemli miktarlarda kuvars ve düşük miktarlarda demir oksit, korund, mullit, kalsiyum oksit ve gehlenit fazları oluşmuştur.
4. 1200°C’de yapı hemen hemen tamamen anortite dönüşmesine rağmen bu sıcaklıkta dahi diğer fazların da bulunmasından dolayı tek fazlı anortit yapısı elde edilememiştir.

5. Borik asit katkısının anortit oluşumunu hızlandırdığı ancak yüksek borik asit oranının anortit oluşumunu çok fazla etkilemediği tespit edilmiştir.
6. SEM incelemeleri, genelde borik asit katkılı numunelerin katkısız göre daha uniform bir yapıya sahip olduğunu, ancak borik asit katkısının artmasıyla yapıda kısmi ergimelerin arttığını göstermiştir.
7. 1200°C’de sinterlenen numunelerin SEM kullanılarak yapılan iç yapı incelemesinde hem borik asit katkılı hem de katkısız numunelerde ergimenin meydana geldiği ve yapının yüksek oranda camsı faz içerdiği tespit edilmiştir.
8. Borik asit katkılı ve katkısız numunelerin yoğunluk ölçümleri, yoğunluk ile sıcaklık ve bor oksit katkısı arasında kararlı bir değişimin olmadığını göstermiştir.
9. Borik asit katkılı ve katkısız numunelerde elde edilen maksimum relatif yoğunluk değeri %61 olarak saptanmıştır. Daha yüksek yoğunluk değeri elde etmek için 1300°C’de yapılan sinterleme işleminde numuneler ergidiği ve tamamen dağıldığı için bu sıcaklıklarda elde edilen numunelerde karakterizasyon yapmak mümkün olmamıştır.

8.2. Öneriler

1. Yüksek yoğunlukta anortit seramik malzeme elde etmek için farklı anortit şekillendirme yöntemleri kullanılarak çalışmanın detaylandırılması.
2. Üretilecek yüksek yoğunluğa sahip anortit seramik malzemenin dielektrik özelliklerinin tespit edilmesi.
3. Çalışmanın farklı termik santrallerden elde edilecek uçucu küller ile farklı bor kaynağı (kolemanit, tinkal vb.) kullanılarak yapılması.

KAYNAKLAR

1. Saito, S., "Advanced Ceramics", **Oxford University Pres**, London, 3-10, 87-94 (1988).
2. Barsoum, M., "Fundamentals of Ceramics", **McGraw-Hill**, Singapur, 17-34, 53-65 (1997).
3. Mergen, A., Aslanoğlu, Z., "Low-Temperature Fabrication of Anorthite Ceramics from Kaolinite and Calcium Carbonate with Boron Oxide Addition" **Ceramic International**, 29: 667-670 (2003).
4. Knickerbocker, S.H., Kumar A.H. ve Herron, L.W., "Cordierite Glass-Ceramics for Multilayer Ceramic Packaging", **Am. Ceram. Soc. Bull.**, 72(1): 90-95 (1993).
5. Gdula, R.A., "Anorhite Ceramic Dielectrics", **Am. Ceram. Soc. Bull.**, 50(6): 555-557 (1971).
6. Ismail, MG., Aria, H., "Sol Gel Synthesis of B₂O₃ Doped Anorthite and its Characterisation", **J. Ceram. Soc. Jap.**, 100(12): 1385-1389 (1992).
7. Cioffi, R., Permce, P., Aronne, A., Quattroni, G., "Nucleation and Crystal Growth in Fly Ash Derived Glass", **Journal of Materials Science**, 28: 6591-6594 (1993).
8. De Guive, E.J., Risbud, S.H., "Crystallization and Properties of Glasses Prepared from Illinois Coal Fly Ash", **Journal of Materials Science**, 19: 1760-1766 (1994).
9. "2004 Yılı Faaliyet Raporu", **Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü**, Ankara, 7-12 (2005).
10. Geçkinli, E., "İleri Teknoji Malzemeleri", (1. Baskı), **İstanbul Teknik Üniversitesi Basımevi**, İstanbul, 285-288 (1992).
11. Reed, J., "Principles of Ceramic Processing", **Wiley**, New York, 89-105 (1995).
12. Richerson, D., "Modern Ceramic Engineering", **Marcel Dekkel**, Newyork, 39-181 (1992).
13. Erdoğan, M., "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", **Nobel**, Ankara, 43-57 (2001).
14. Erdoğan, N., Yıldız, R., "Magnezit ve Bazik Refrakter Malzeme Teknolojisi", **Lale Ofset**, Kütahya, 42-57 (1995).

15. Ichinose, N., "Introduction to Fine Ceramics", *John Wiley and Sons*, Newyork, 117-121 (1987)
16. Mostaghaci, H, "Advanced Ceramic Materials", *TransTech Publications*, Zürih, 399-441 (1996).
17. Toy, Ç., Baykara,T., "21. Yüzyılın Malzemesi Seramikler", *Bilim ve Teknik Dergisi*, 317: 6-13 (1994).
18. Garvie, R-C, Hannik, R.H, "Ceramic Steel", *Nature*, London, 107-111 (1975).
19. Tekeli, S., Gürü, M., "The Factors Affecting Colloidal Processing of 8YSCZ Ceramics", *Key Engineering Materials*, 280-283: 729-734 (2005).
20. Gökçe, H., "Doğal Hammaddelerden Sentetik Kordiyerit Seramiklerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 41-58 (2002).
21. Kingery, D, Chiang, Y., "Physical Ceramics, Principles For Ceramic Science and Engineering", *Wiley-Sons*, Newyork (1997).
22. Baykara, T, "İleri Seramikler, Ulusal Bir Değerlendirme", *Seramik Dergisi*, İstanbul, 1: 28-32 (1998).
23. Bacanak, N., "Termik Santral Uçucu Külünden Üretilen Cam Seramiğin Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 17-29 (2001).
24. E.İ.E. Genel Direktörlüğü, "Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Olanakları", Ankara, 81(45): 11-46 (1979).
25. Duman, N., "Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Karo Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 61-72 (1996).
26. Yılmaz, Ş., "Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 12-46 (1992).
27. Anderson, M, Jackson, G., "Benefication of Power Station Coal and Its Use in Heavy Clay Ceramics", *Trans. J. Brit. Ceram. Soc.*, 82(2): 50-55 (1993).
28. Ergut, Ş., "Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Sinterleşme Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 31 (1994).
29. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in Concrete", *ACI Materials Journal*, 83(5): 381-409 (1987).

30. Toros, H., “Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 41-62 (1987).
31. Kolukısa, S., “Uçucu Kül İçeren Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Özellikleri ve Mikroyapı Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, **Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 93 (1999).
32. Vorries, K.S. “Prediction of Ash Melting Behaviour from Coal Ash Composition, Analytical Methods for Coal and Coal Products”, **Academic Press**, New York, 132 (1978)
33. “An Introduction to Pulverized Fuel Ash”, **Powergen Broch.**, England, 98 (1990).
34. Erdoğan, T.Y., “Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu”, **Bildiriler El Kitabı, TMMOB İnşaat Müh. Odası**, 29-35 (1993).
35. Yılmaz, Ş., “Volkanik Bazalt Kayaçlarından Cam-Seramik Malzeme Üretim Koşullarının Araştırılması ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 14-78 (1997).
36. “Fly Ash and Row or Calcined Natural Puzzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”, ASTM C 618-80, **Annual Book of ASTM Standards**, 14: 381-384 (1980).
37. Mukherji, S.J., Machhoya, B.A., Savsani, R.M., Vyas, D.R., Dan, T.K., “Utilisation of Fly Ash in the Preparation of Ceramic Tableware and Artware”, **Br. Ceram. Trans.**, 6: 254-257 (1993).
38. Roskill, “The Economics of Boron”, 9th Edition, **Roskill Information Services Ltd**, London, 212-217 (1999)
39. “2003 Yılı Faaliyet Raporu”, **Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü**, Ankara, 13 (2004).
40. “Bor Tuzları-Trona-Kaya Tuzu-Sodyum Sülfat-Stronsiyum Çalışma Grubu Raporu”, **DPT**, Ankara, 2822-2, 8-17 (2001).
41. Roskill, “The Economics of Boron”, 10th Edition, **Roskill Information Services Ltd**, London, 83 (2001).
42. “2005 Yılı Faaliyet Raporu”, **Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü**, Ankara, 11 (2005).

43. Seramik Killeri-Kaolen-Feldspat-Pirofillit-Wollastonit-Talk Çalışma Grubu Raporu”, **DPT**, Ankara, 2611-2837 (2001).
44. Sumi, K., Kobayashi, Y. ve Kato, E., “Low Temperature Fabrication of Cordierite Ceramics From Kaolinite and Magnesium Hydroxide Mixtures With Boron Oxide Additions”, **J. Am. Ceram. Soc.**, 82(3): 783-785 (1999).
45. Kumar, S., Singh, K.K., Ramachandrarao, P., “Synthesis of Cordierite from Fly Ash and Its Refractory Properties”, **Journal of Materials Science Letters**, 19: 1263-1265 (2000).
46. Kobayashi, Y., Kato, E., “Low Temperature Fabrication of Anorthite Ceramics”, **J. Am. Ceram. Soc.**, 77(3): 833-834 (1994).
47. Sampathkumar, N.N., Umarji, A.M., Chandrasekhar, B.K., “Synthesis of α -Cordierite (indialite) from Fly Ash”, **Material Research Bulletin**, 30(9): 1107-1114 (1995).
48. Mergen, A., Kayed, T.S., Bilen, M., Qasiawi, A.F., Gürü, M., “Production of anorthite from kaolinite and CaCO_3 via colemanite” **Key Engineering Materials**, 264-268: 1475-1478 (2004).
49. Boudchicha, M.R., Achour, S., Harabi, A., “Cristallization and sintering of cordierite and anorthite based binary ceramics” **Journal of Materials Science Letters**, 20: 215-217 (2001).
50. Traore, K., Kabre, T.S., Blanchart, P., “Gehlenite and anorthite cristallisation from kaolinite and calcite mix” **Ceramic International**, 29(4): 377-383 (2003)
51. Kurama, S., Ay, N., “Cordierite Formation”, **American Ceramic Society**, 81(11): 58-61 (2002).
52. Kobayashi, Y., Sumi, K., Kato, E., “Preparation of dense cordierite ceramics from magnesium compounds and kaolinite without additives”, **Ceramic International**, 26: 739-743 (2000).
53. Sumi, K., Kobayashi, Y., Kato, E., “Synthesis and Sintering of Cordierite from Ultrafine Particles of Magnesium Hydroxide And Kaolinite”, **Journal American Society**, 81(4): 1029-1032 (1998).
54. Acimovic, Z., Pavlovic, L., Trumbulovic, L., Andric, L., Stamatovic, M., “Synthesis And Characterization of The Cordierite Ceramics from Nonstandard Raw Materials for Application in Foundry”, **Material Letters**, 4217: 1-6 (2002).
55. Wittman, E., Zanotto, E. D., "Surface nucleation and growth in anorthite glass", **Journal-Crystalline Solids**, 271(1): 94-99 (2000).

56. Liu, W., Liang, K. M., Gu, X. M., Zheng, Y. K., Gu, S. R., “Phase Separation of $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ Glasses Induced by Electric Field”, *Journal Of Materials Science*, 34: 3455-3459 (1999).
57. Cullity, B.C., “Elements of X-ray diffraction”, 2nd edition, *Addison-Wesley Publ.*, London, 318 (1978).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYDOĞAN, Uğur
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 21.04.1974 Mucur / Kırşehir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 294 2118
 e-mail : u_aydogan@yahoo.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi/ Makine Müh.	1996
Lise	Mucur Lisesi	1991

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1998-2006	Eti Maden İşl. Genel Müdürlüğü	Mühendis
1997-1998	Etibank Bor ve Asit Fb. İşletmesi	Mühendis
1996-1997	Hes Makine A.Ş.	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Basketbol, Masa tenisi,