



**ÇEŞİTLİ BOR OKSİT KATKILARININ
VERMİKÜLİT ESASLI KORDİYERİT
CAM-SERAMİK ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FADİME TAKMAZ

Danışman

Doç. Dr. Süleyman AKPINAR

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Cansu KURTULUŞ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇEŞİTLİ BOR OKSİT KATKILARININ VERMİKÜLİT ESASLI
KORDİYERİT CAM-SERAMİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Fadime TAKMAZ

Danışman

Doç. Dr. Süleyman AKPINAR

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Cansu KURTULUŞ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Fadime Takmaz tarafından hazırlanan “Çeşitli Bor Oksit Katkılarının Vermikülit Esaslı Kordiyerit Cam-Seramik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 15 / 02 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Süleyman AKPINAR

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Cansu KURTULUŞ

Başkan : Prof. Dr. Şenol YILMAZ
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Atilla EVCİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Süleyman AKPINAR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... / / tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

15 / 03 / 2024

Fadime TAKMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇEŞİTLİ BOR OKSİT KATKILARININ VERMİKÜLİT ESASLI KORDİYERİT CAM-SERAMİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fadime TAKMAZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Süleyman AKPINAR

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cansu KURTULUŞ

Bu çalışmada, kordiyerit bileşimindeki oksitleri yapısında bir arada bulunduran vermikülit hammaddesinin ergitici özelliğe sahip bor oksit içerikli katkıları ile saflığı ve nihai ürün teknik özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek oranda katkılandırılarak camlaştırılması ve sonrasında kristalizasyonu ile kordiyerit cam-seramik üretimi hedeflenmiştir. İlk olarak kordiyerit sitokiyometrisine uygun olarak vermiküllit, alümina ve kuvars hammaddelerinden oluşturulan karışıma % 10, %20, %30 oranında bor bileşikleri (boraks, borik asit, kolemanit) ilavesi ile seramik toz karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan toz karışımlarının endüstriyel koşullarda ergitilmesi (~ 1450°C) sonrası fritleştirme ile elde edilen fritlerin kristalizasyonu ile kordiyerit esaslı cam-seramik üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen cam-seramiklerin mikroyapı ve teknik özellikleri karakterize edilerek, kullanılan hammadde ve katkıların nihai cam-seramik yapının faz, mikroyapı, fiziksel, mekanik özellikleri üzerinde etkileri araştırılmıştır. Örnekler üzerinde yapılan analizler bor oksit katkılarının vermikülit esaslı kordiyerit cam-seramiklerin faz yapısı ve mikroyapısal gelişiminde önemli etkiye sahip olduğu ve bu sayede nihai ürüne yüksek mekanik dayanım kazandırdığı belirlenmiştir. Çalışma sonuçları gerek cam gerekse de seramiklerden göreceli olarak daha iyi özelliklere sahip cam-seramik malzeme gibi yüksek katma değerli ürünlerin üretiminde ülkemiz yerel hammadde kaynaklarının kullanılabilme potansiyelini göstermiştir.

2024, ix + 53 sayfa

Anahtar Kelimeler: Cam, Cam-Seramik, Kordiyerit, Faz Dönüşümü.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF VARIOUS BORON OXIDE ADDITIVES ON VERMICULITE BASED CORDIERITE GLASS-CERAMIC PROPERTIES

Fadime TAKMAZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Süleyman AKPINAR

Co-Supervisor: Asst. Prof. Cansu KURTULUŞ

In this study, it was aimed to produce cordierite glass-ceramics by fritting and subsequent crystallization of vermiculite raw material, which contains the oxides in the composition of cordierite together, by doping with fluxes that have containing boron oxide. Firstly, ceramic powder mixtures were prepared by adding 10%, 20%, 30% boron compounds (borax, boric acid, colemanite) to the mixture of vermiculite, alumina and quartz raw materials in accordance with cordierite stoichiometry. Cordierite-based glass-ceramics were produced by crystallization of the frits obtained by fritting after melting ($\sim 1450^{\circ}\text{C}$) of the prepared powder mixtures under industrial conditions. The microstructure and technical properties of the obtained glass-ceramics were characterized and the effects of the raw materials and additives used on the phase, microstructure, physical and mechanical properties of the final glass-ceramic structure were investigated. The analysis of the samples showed that boron oxide additives have a significant effect on the phase structure and microstructural development of vermiculite-based cordierite glass-ceramics and thus provide high mechanical strength to the final product. The results of the study showed the potential of using local raw material resources of our country in the production of high value-added products such as glass-ceramic materials with relatively better properties than both glass and ceramics.

2024, ix + 53 pages

Keywords: Glass, Glass Ceramic, Cordierite, Phase Transformation.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma konusunun belirlenmesi, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında bilgisini desteğini eksik etmeyen tez danışmanım Doç. Dr. Süleyman AKPINAR'a, çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Atilla EVCİN'e, Dr. Öğr. Üyesi Cansu KURTULUŞ'a, Doç. Dr. Hakan ÇİFTÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması döneminde manevi desteklerini esirgemeyen Zeynep ÇETİNKAYA'ya, Merve KANLICA'ya, Oğuz EVCİN'e ve Onur DOĞAN'a teşekkür ederim.

Fadime TAKMAZ
Afyonkarahisar, 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
2.1 Cam Seramikler	2
2.1.1 Cam Seramik Sistemleri.....	3
2.1.1.1 BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (BAS) Cam Seramik Sistemi.....	3
2.1.1.2 CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (CAS) Cam Seramik Sistemi	4
2.1.1.3 Li ₂ O -Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (LAS) Cam Seramik Sistemi	6
2.1.1.4 MgO -Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (MAS) Cam Seramik Sistemi	7
2.1.2 Cam Seramiklerin Özellikleri	8
2.1.3 Cam Seramiklerin Üretim Yöntemleri	9
2.1.3.1 Klasik Yöntem ile Cam Seramik Üretimi	9
2.1.3.2 Toz Yöntemi ile Cam Seramik Üretimi	10
2.1.3.3 Sol-Jel Yöntemi ile Cam Seramik Üretimi.....	10
2.1.4 Cam Seramiklerin Kullanım Alanlarını	11
2.1.5 Kordiyerit Esaslı Cam-Seramikler	11
2.2 Vermikülit Minerali ve Cam-Seramik Üretiminde Kullanımı.....	12
2.3 Bor Bileşikleri ve Cam-Seramik Üretiminde Kullanımı	13
2.3.1 Kolemanit.....	13
2.3.2 Borik Asit	14
2.3.3 Susuz Boraks.....	15
3. MATERYAL ve METOT	17
3.1 Kullanılan Malzemeler	17
3.2 Deneysel Çalışmalar	18
3.2.1 Bileşimlerin Hazırlanması.....	18

3.2.2 Ergitme	18
3.2.3 Şekillendirme	19
3.2.4 Sinterleme	19
3.3 Karakterizasyon	20
3.3.1 Diferansiyel Termal Analiz (DTA).....	20
3.3.2 X-Işınları Difraksiyonu (XRD) Analizi	21
3.3.3 Yoğunluk Testi.....	21
3.3.4 Mikro Yapı Analizi (Taramalı Elektron Mikroskobu, SEM)	22
3.3.5 Küçülme Davranışlarının Tespiti	23
3.3.6 Üç Nokta Eğme Testi	23
4. BULGULAR	24
4.1 DTA Sonuçları	24
4.2 Sinterleme Sonuçları.....	26
4.3 XRD Sonuçları.....	28
4.4 Yoğunluk Testi Sonuçları	29
4.5 Küçülme Davranışları Testi Sonuçları.....	31
4.6 SEM Sonuçları	32
4.7 Mukavemet Sonuçları	35
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	37
6. KAYNAKLAR.....	38

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

dH ₂ O	Distile su
Mg	Miligram
mW	Megawatt
mm	Milimetre
Cm	Santimetre
µm	Mikrometre
MPa	Megapaskal
GPa	Gigapaskal
mA	Miliamper
cm ³	Santimetreküp
Gr	Gram
Sn	Saniye
Dk	Dakika
Å	Angström
°C	Santigrat Derece
HBO ₂	Metaborik Asit
TiO ₂	Titanyumdioksit
Cr ₂ O ₃	Krom Oksit
ZrO ₂	Zirkonyumdioksit
P ₂ O ₅	Fosfor Pentoksit
Al ₂ O ₃	Alümina
SiO ₂	Silisyumdioksit
Si ₃ N ₄	Silisyum Nitrür
MgO	Magnezyum Oksit
GdBO ₃	Gadolinyum Borat
B ₂ O ₃	Bor Oksit
La ₂ O ₃	Lantan Oksit
BaO	Baryum Oksit
Nd ₂ O ₃	Neodimyum Oksit
ZnO	Çinko Oksit
MgF ₂	Magnezyum Florür

Kısaltmalar

2D	2 Boyutlu
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
PCB	Baskılı Devre Kartları
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X Işınları Difraksiyonu
XRF	X Işınlr Floresansı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ Sistemi cam oluşum bölgesi.....	4
Şekil 2.2 CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ Sistemi faz diyagramı.....	5
Şekil 2.3 Li ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ Sisteminin, a) cam oluşum bölgesi b) faz diyagramı.....	6
Şekil 2.4 MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ Sistemi cam oluşum bölgesi	7
Şekil 2.5 Vermikülit minerali.....	13
Şekil 3.1 Fritleştirme işlemi akım şeması	19
Şekil 4.1 Boraks katkılı numunelerin DTA grafiği	24
Şekil 4.2 Borik asit katkılı numunelerin DTA grafiği.....	25
Şekil 4.3 Kolemanit katkılı numunelerin DTA grafiği	25
Şekil 4.4 Katkısız, %10 susuz boraks,%10 borik asit ve %10 kolemanit katkılı karışımların XRD analiz sonuçları.....	29
Şekil 4.5 Numunelerin bulk yoğunluk sonuç grafiği	30
Şekil 4.6 1000°C’de sinterlenmiş katkısız numunelerin SEM ve EDX görüntüleri	32
Şekil 4.7 1000°C’de sinterlenmiş %10 boraks içeren numunelerin SEM ve EDX görüntüleri	33
Şekil 4.8 1000°C’de sinterlenmiş %10 borik asit içeren numunelerin SEM ve EDX görüntüleri.....	34
Şekil 4.9 1000°C’de sinterlenmiş %10 kolemanit içeren numunelerin SEM ve EDX görüntüleri	35

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Kullanılan hammaddelerin kimyasal içeriği	17
Çizelge 3.2 Hazırlanan bileşimler	18
Çizelge 4.1 Borik asit katkılı numunelerin sinterleme sonrası görüntüleri	26
Çizelge 4.2 Boraks katkılı numunelerin sinterleme sonrası görüntüleri	27
Çizelge 4.3 Kolemanit katkılı numunelerin sinterleme sonrası görüntüleri.....	28
Çizelge 4.4 Numunelerin bulk yoğunluk ve su emme test sonuçları	30
Çizelge 4.5 Numunelerin küçülme oranları	31
Çizelge 4.6 Numunelerin mukavemet sonuçları	36



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Pres Makinası.....	19
Resim 3.2 Kül Fırını.....	20
Resim 3.3 DTA/TG cihazı	20
Resim 3.4 XRD Analiz cihazı.....	21
Resim 3.5 3 Nokta eğme test düzeneği	23



1. GİRİŞ

Cam-seramikler, geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesine sahip olan önemli bir malzeme sınıfını temsil etmektedir. Günümüzde, bu malzemelerin kullanım alanları arasında mutfak eşyaları, termal yalıtım sistemleri, tıbbi cihazlar, elektronik cihazlar ve daha birçok endüstriyel ve ticari uygulama alanı bulunmaktadır.

Cam-seramiklerin özellikleri ve performansı, kullanılan hammadde bileşimi, işleme yöntemleri, termal işlem parametreleri ve mikroyapısal bileşenler gibi birçok faktöre bağlıdır. Örneğin, kordiyerit esaslı cam-seramikler, düşük termal genleşme, düşük dielektrik sabiti ve yüksek mekanik mukavemet gibi eşsiz özellikler sergilemekte olup, bu üstün özellikleri mikroyapısındaki kordiyerit fazından kaynaklanmaktadır.

Literatürde cam-seramiklerin düşük sıcaklıklarda kristalizasyonu üzerinde çeşitli oksit katkıların etkilerinin araştırıldığı çalışmaların başarılı sonuçları vardır. Ancak bu araştırmalar daha çok ergitme ve soğutma döngüsü sonrası cam formuna dönüştürülmüş başlangıç hammaddelerinin cam-seramik yapıya dönüşümünde kristalleşme kabiliyetini arttırmaya ve kristalizasyon sıcaklıklarını azaltmaya yöneliktir.

Gerek hammaddelerin erime sıcaklığını azaltan gerekse de camların kristalizasyon davranışını olumlu yönde etkileyen bor bileşikleri kordiyerit-cam seramik üretiminde yüksek kullanılabilirlik potansiyeline sahiptir. Bor oksit içeren cam-seramiklerin, belirli bir sıcaklık aralığında kontrollü kristalizasyonu sağlanabilmekte ve istenilen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmaları mümkün olabilmektedir. Bu nedenle, bor oksit katkılarının uygun şekilde kullanılması, cam-seramiklerin özelliklerinin optimizasyonunda kritik bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışması, vermiculit esaslı kordiyerit cam-seramiklerin üretiminde bor oksit katkılarının etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, cam-seramiklerin endüstriyel uygulamalarda daha iyi performans sergilemesi adına değerli bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca, cam-seramiklerin tasarımı ve üretimi üzerine genel bir anlayışı geliştirmeye ve bu alandaki araştırma ve geliştirme çabalarına katkıda bulunmaya yönelik önemli bir adım olacaktır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Cam Seramikler

Camların kristalleşebilmesi ile ilgili ilk bilgiler, 1739 yılında Fransız kimyager Reaumur'un yaptığı deneylere dayanmaktadır (Kuban 1991). Cam-seramiklerin tarihi, ilk cam-seramiklerin geliştirildiği 1950'lerin sonlarına kadar uzanmaktadır (II 1996). O zamandan bu yana, bu alanda sürekli araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmış ve benzersiz özelliklere ve uygulamalara sahip çeşitli cam-seramik türleri ortaya çıkmıştır (Honma vd. 2022). Bu alandaki ilk çalışma, cam-seramiklerin geliştirilmesi için temel zemini oluşturan Corning Inc., araştırma grubu tarafından gerçekleştirilmiştir (Kuban 1991; Höland vd. 2001).

Cam-seramikler, özel bir camın çekirdeklenme ve kristal büyüme aşamalarını içeren kontrollü kristalizasyon ile üretilen malzemelerdir (Omar vd. 1991). Cam-seramikler, bir cam matris içinde dağılmış kristal fazlardan oluşan kompozit malzemeler olarak da tanımlanmaktadır (Singh ve Sontakke 2021). Hem cam hem de kristal malzemelerin özelliklerinin bir kombinasyonuna sahiptirler ve kristal fazdan kaynaklanan benzersiz fiziksel özellikler sergilemelerini sağlarlar (Masai vd. 2009). Cam-seramikler, aynı bileşimdeki camdan çok daha yüksek mekanik dayanıma, darbe direncine, yüksek refrakter özelliklere ve düşük ısı genleşme katsayısına sahip polikristal malzemelerdir. Bu ancak, uygun bileşim ve ısı işlem koşullarının dikkatlice seçilmesiyle mümkün olabilmektedir (Omar vd. 1991).

Cam-seramiklerin özellikleri kimyasal bileşimlerine ve termal geçmişlerine bağlıdır ve kristalleşme davranışları özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar (Cheng vd. 2010, Xiong vd. 2010, Fu vd. 2016, DeCeanne vd. 2021, Ghosh ve Datta 2014).

Cam seramiklerde kristaller 1µm ve daha küçük boyutlarda bulunmakta ve ayrıca ısı işlem koşullarına ve cam bileşimine bağlı olarak kalıntı cam fazları bulunmaktadır (Lewis 1989). Ana cam içinde çökelen kristallerin boyutlarının küçük olması tokluk, darbe dayanımı ve erozyon gibi mekanik özellikleri geliştiren en önemli faktördür. İstenilen boyut ve düzende kristal oluşumunun sağlanabilmesi için 1 cm³'te yaklaşık 10¹²-10¹⁵

çekirdek oluşumu olmalıdır. Camın ergitilmesi ve şekillendirilmesi sırasında bu yoğunluğu ve oluşum sıklığını elde etmek için çeşitli katkı maddeleri (çekirdekleştirici) kullanılır. Önemli çekirdeklendirme maddeleri TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 ve P_2O_5 gibi oksitler, platin grubu metaller ve diğer soy metaller ile floritlerdir. Bu katkı maddeleri, çekirdeklenme aşaması göstererek camın kristalleşmesi sırasında bir veya daha fazla kristal fazın çökmesini sağlar (Lewis 1989).

Cam-seramikler diş hekimliği, optik bileşenler, farmasötikler ve katı oksit elektroliz hücre teknolojisi, yarı iletken malzemeler ve mikrodalga dielektrik bileşenleri gibi çok çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmuştur (Fu vd. 2020, Han vd. 2019, Demirel ve Taygun 2023, Javed vd. 2019, Yan vd. 2021, George ve Sebastian 2010).

2.1.1 Cam Seramik Sistemleri

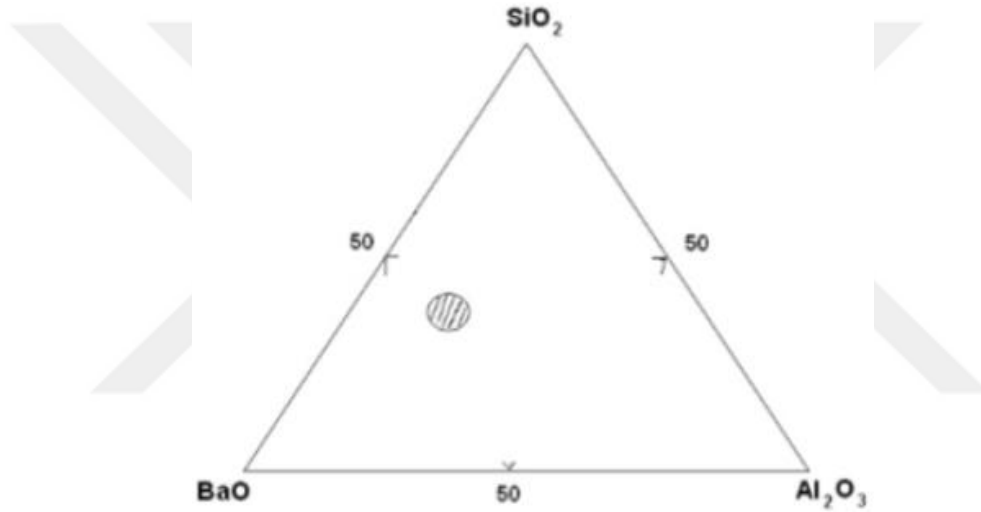
Cam-seramik sistemleri, $BaO-Al_2O_3-SiO_2$ sistemi, $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ sistemi, $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ sistemi, $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ sistemi, $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ sistemi, $BaO-TiO_2-SiO_2$ sistemi ve $(Na_2O-MgO)-CaO-Al_2O_3-SiO_2$ sistemi gibi çeşitli bileşimlerde yaygın olarak çalışılmıştır (Taurines ve Boizot 2012, Deubener ve Höland 2017). Bunlar içerisinde BaO -, CaO -, Li_2O - ve MgO - alüminasilikat sistemleri ticari olarak en çok uygulaması bulunan sistemler olarak öne çıkmaktadır.

2.1.1.1 $BaO-Al_2O_3-SiO_2$ (BAS) Cam Seramik Sistemi

$BaO-Al_2O_3-SiO_2$ (BAS) cam-seramik sistemi, çeşitli alanlarda potansiyel uygulamaları olan yüksek sıcaklıkta kararlı bir malzemedir. BAS, koruyucu kaplama malzemeleri için cazip bir aday haline getiren mükemmel yüksek sıcaklık kararlılığı için çalışılmıştır (Zheng vd. 2008, Sun vd. 2021, Yu vd. 2015). Sistem kristalleşme kinetiği, faz gelişimi ve dielektrik özellikleri açısından incelenmiştir (Hijiya vd. 2009, Cheng vd. 2005, Wu vd. 2014, Kumar ve Rajgopalan 1986). Ayrıca BAS, seramiklerin yoğunlaştırılması için sinterleme yardımcısı olarak kullanılmış ve seramik işlemedeki potansiyel rolünü göstermiştir (Ryu vd. 2009, Yu vd. 2015). Ayrıca BAS, Si_3N_4 kompozitleri gibi kompozit malzemelerdeki potansiyeli için araştırılmış ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerin geliştirilmesinde umut vaat ettiği görülmüştür (Yu vd. 2015, Ye vd. 2001).

BAS sistemi aynı zamanda mikroyapı, kristal fazlar ve dielektrik özellikler üzerindeki etkisi üzerine yapılan çalışmaların odak noktası olmuş ve malzeme bilimi ve dielektrik alanındaki önemini göstermiştir (Chen vd. 2009, Wu vd. 2014). Ayrıca, seramiklerin mikroyapılarını ve enerji depolama özelliklerini geliştirmek için BAS cam ilavesi kullanılmıştır (Liu vd. 2017). BAS cam-seramik malzemeler optik özellikleri açısından da incelenmiş olup, $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ kristalleri içeren cam-seramiklerin güçlü optik doğrusal olmama özelliği sergilediği rapor edilmiştir (Sakamoto ve Yamamoto 2010).

Şekil 2.1’de BAS cam seramik sisteminin cam oluşum bölgesi verilmiştir (Ercenk 2011).



Şekil 2.1 BaO-Al₂O₃-SiO₂ sistemi cam oluşum bölgesi.

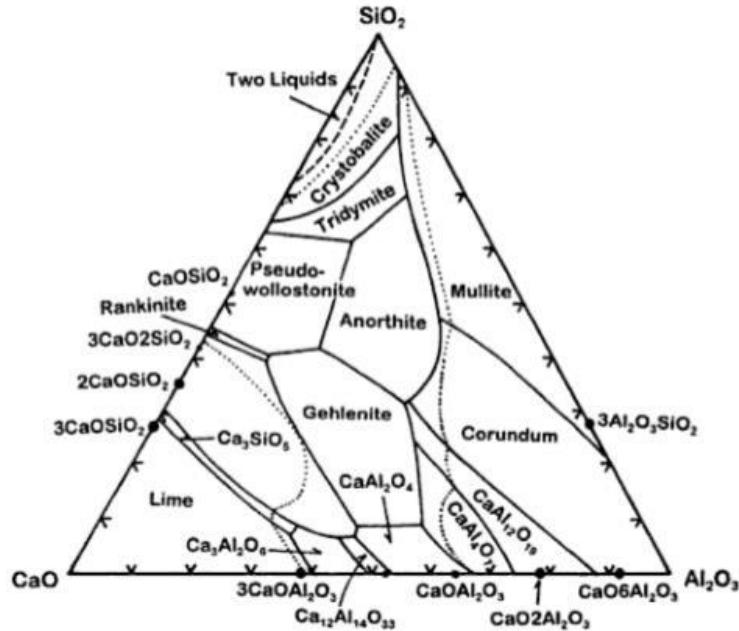
2.1.1.2 CaO-Al₂O₃-SiO₂ (CAS) Cam Seramik Sistemi

CaO-Al₂O₃-SiO₂ (CAS) cam-seramik sistemi, kristalleşme davranışı, mekanik özellikleri ve çeşitli uygulamaları açısından kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sistemin düşük SiO₂ içerikli camlar oluşturduğu ve katı oksit elektrolizör hücreleri için cam-seramik dolgu macunları gibi çeşitli uygulamalar için uygun olduğu bulunmuştur (Khedim vd. 2012). Ayrıca, CaAl₂Si₂O₈ kristallerinin çökmesi yoluyla CAS sisteminin sertleşmesinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir (Inage vd. 2020, Maeda ve Yasumori 2016). Ayrıca, CAS sistemi, vitrifiye uçucu külün kontrollü kristalizasyonu yoluyla cam-seramiklerin sürdürülebilir sentezinde kullanılmış ve sürdürülebilir malzeme sentezi için potansiyelini göstermiştir (Angjusheva ve Fidancevska 2021).

Ayrıca, CAS sistemi biyoaktivitesi açısından incelenmiş ve CaO-SiO₂ bakımından zengin bir cam matris içinde apatit ve wollastonit kristallerinden oluşan biyoaktif bir cam-seramik geliştirilmiştir. Bu gelişme, biyomedikal uygulamalardaki potansiyelini vurgulamaktadır (Hench 1998). Ayrıca, Al₂O₃'ün Na₂O-CaO-SiO₂ sistemindeki cam bileşimlerinin kristalleşme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmış ve CAS sisteminin kompozit malzeme araştırmalarındaki çok yönlülüğüne ve önemine işaret edilmiştir (Mehdikhani ve Borhani 2013).

CAS sistemi, özellikle kataliz ve nükleer malzemelerdeki potansiyel kullanımıyla ilgili olarak vitrifikasyon kabiliyeti, kristalleşme davranışı ve yapısı açısından da incelenmiştir (Cormier vd. 2021, Souag vd. 2021). Sistem ayrıca, erimiş haldeki davranışını anlamak için çok önemli olan viskozite ve yüzey gerilimi gibi termodinamik özellikleri açısından da incelenmiştir (Higo vd. 2014, Sukenaga vd. 2011). Ayrıca, CAS sistemi, alüminosilikat eriyiklerindeki karışmama davranışı bağlamında incelenmiş ve faz ayrımı özelliklerine ışık tutmuştur (Miranda 2019).

Şekil 2.2'de CaO-Al₂O₃-SiO₂ sistemine ait faz diyagramı verilmiştir.



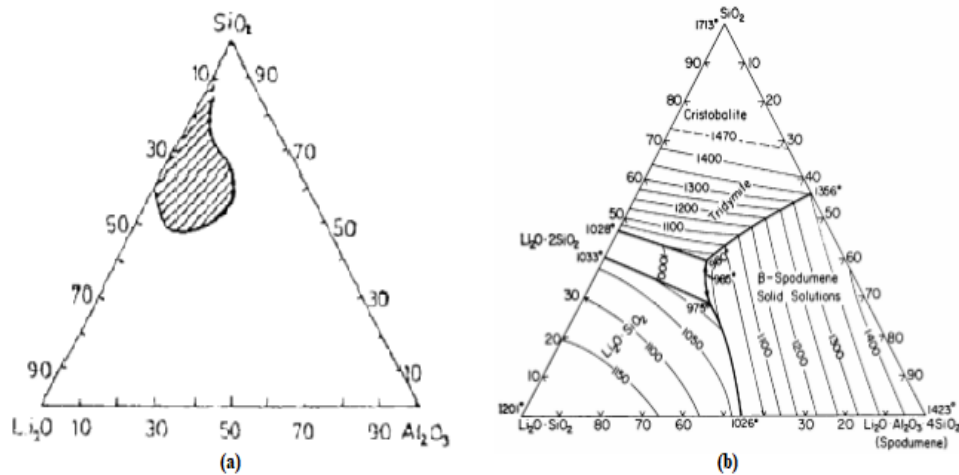
Şekil 2.2 CaO-Al₂O₃-SiO₂ sistemi faz diyagramı (Ercenk 2011).

2.1.1.3 Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ (LAS) Cam Seramik Sistemi

Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ (LAS) cam-seramik sistemi, eşsiz özellikleri ile çeşitli uygulamalara aday bir malzemedir. Sistem, Li₂Si₂O₅ kristallerinin iç çökmesi için çekirdekleştirici bir ajan olarak hizmet veren P₂O₅ ile lityum disilikat ve diopsidin kontrollü kristalleşmesini içerir (Rampf vd. 2016). La₂O₃ ilavesinin bu sistemdeki cam-seramiklerin kristalleşmesini ve özelliklerini etkilediği bulunmuştur (Lu vd. 2013). Ayrıca, TiO₂'nin çekirdekleştirici bir ajan olarak kullanımı araştırılmış ve LAS camlarının çekirdekleşmesi ve kristalleşmesi hakkında bilgiler sağlanmıştır (Doherty vd. 1967, Mishra vd. 2016). Ayrıca, ana hammadde olarak Brezilya spodümen konsantresi kullanılarak LAS cam-seramiklerin başarılı bir şekilde üretildiği rapor edilmiş ve üretim sürecinde belirli hammaddelerin kullanılma potansiyeli vurgulanmıştır (Rebouças vd. 2019).

Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ sistemindeki cam-seramik malzemelerin çekirdeklenme ve kristalleşme davranışları, şeffaflık özellikleri nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Riello vd. 2001). Ayrıca, izotermal işlemin Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ cam-seramiğin yapısal, mikroyapı ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve bu malzemelerin işlenmesi ve özellikleri hakkında bilgi sağlanmıştır (Lutpi vd. 2020).

Şekil 2.3'te Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ sistemine ait faiz diyagramı ve cam oluşum bölgesi verilmiştir.



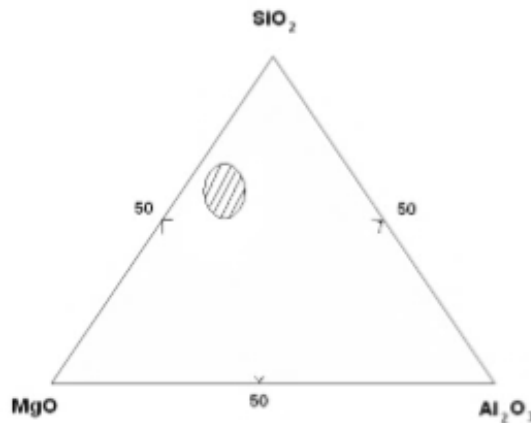
Şekil 2.3 Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ sisteminin, a) cam oluşum bölgesi b) faz diyagramı (Ercenk 2011)

2.1.1.4 MgO-Al₂O₃-SiO₂ (MAS) Cam Seramik Sistemi

MgO-Al₂O₃-SiO₂ (MAS) cam-seramik sistemi, biyouyumlu bir malzeme olup, 140 GPa'a kadar Young modülü ve 14 GPa'a kadar Vickers sertliği ile yüksek mekanik mukavemet sergilemektedir (Patzig vd. 2012). Nd₂O₃ ilavesi, MAS cam-seramiklerin kristaliteleri, mikroyapıları ve özellikleri üzerindeki etkileri açısından araştırılmış ve bu malzemelerin özelliklerini katkı maddeleri aracılığıyla uyarlama potansiyeline işaret etmiştir (Li vd. 2023). Ayrıca, BaO ilavesinin MAS cam-seramiklerin kristalleşmesi, sinterlenmesi ve özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve bu da bu malzemelerin özelliklerini daha da geliştirme olasılığını ortaya koymuştur (Zhang vd. 2022).

MAS sisteminde genellikle düşük sıcaklık kordiyerit cam seramikleri elde etmek için en uygun bileşimleri belirlemeyi amaçlayan çalışmalara odaklanılmıştır (Zaichuk vd. 2022). MAS cam-seramik sistemi, ayrıca yüksek mukavemet ve renksizlik de dahil olmak üzere dişçilik malzemeleri olarak uygun özellikler potansiyeli ile dişçilik uygulamaları için düşünülmüştür (Dittmer ve Rüssel 2011). Bunların dışında, MAS cam-seramiklerin mikrodalga dielektrik özellikleri üzerinde BaTiO₃ ilavesinin etkilerine odaklanan çalışmalarla MAS sistemi mikrodalga dielektrik uygulamalarındaki potansiyeli açısından araştırılmıştır (Kumari vd. 2022).

Şekil 2.4'te MgO-Al₂O₃-SiO₂ sistemine ait cam oluşum bölgesi verilmiştir.



Şekil 2.4 MgO-Al₂O₃-SiO₂ sistemi cam oluşum bölgesi (Ercenk 2011).

2.1.2 Cam Seramiklerin Özellikleri

Cam-seramikler hem cam hem de seramik özelliklerinin bir kombinasyonunu sergileyen benzersiz bir malzeme sınıfıdır. Cam-seramiklerin özellikleri büyük ölçüde cam matrisin özelliklerinin yanı sıra kristal hacim fraksiyonu ve kristal boyutuna bağlıdır (Khalf 2021). Kristal bölgelerin amorf cam matrisine dahil edilmesi, cam-seramiklerin çok çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmasını sağlar (Masai vd. 2009). Örneğin, cam matrise ZrO_2 partiküllerinin eklenmesinin cam-seramiklerin mekanik özelliklerini etkili bir şekilde iyileştirdiği gösterilmiştir (Fu vd. 2020). Mekanik özelliklerdeki bu artış, malzeme içindeki düzenli kristal bölgelerin varlığına bağlanmaktadır. Ayrıca, cam-seramiklerin fotoluminesans, yarı iletken davranış ve biyoaktivite gibi benzersiz fiziksel özellikleri, düzensiz cam bölgelerin ve düzenli kristal bölgelerin kombinasyonunun bir sonucudur (Masai vd. 2009, Nakanishi vd. 2014, Fayad vd. 2019).

Cam-seramiklerin ayrıca, görünür bölgede renk değiştiren luminesansa yol açan dikkate değer ışık depolama özellikleri sergilediği bulunmuştur (Nakanishi vd. 2014). Ayrıca, şeffaf cam-seramikler çeşitli fotonik uygulamalar için ilginç optik özellikler göstermiş ve bu da onları katı hal optik fonksiyonel malzemelerdeki uygulamalar için uygun hale getirmiştir (Gorni vd. 2018, Han vd. 2019). Cam-seramiklerin antibakteriyel özellikleri, kaplama veya iyon değişimi gibi farklı yöntemlerle elde edilmiş ve bu da onları ilaç endüstrisinde kullanıma uygun hale getirmiştir (Demirel ve Taygun 2023). Ayrıca, güçlendirilmiş yüzey katmanlarına sahip şeffaf cam-seramiklerin geliştirilmesi, yeni zırh malzemelerindeki uygulamalar için umut vaat ettiğini göstermiş ve cam seramikler için çeşitli uygulama alanlarını ortaya koymuştur (Cunha vd. 2007).

Diş hekimliği alanında cam-seramikler, uygun mekanik özellikleri ve biyouyumlulukları nedeniyle inley, onley ve kron gibi restoratif uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır (Spitznagel vd. 2018, Ritzberger vd. 2010). Cam-seramiklerin mekanik, termal ve kimyasal özellikleri de dahil olmak üzere özellikleri, diş restorasyonu ve kirli suyun biyoremediasyonu gibi belirli uygulamalara uygunluklarını anlamak için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Ritzberger vd. 2010, García vd. 2003).

2.1.3 Cam-Seramiklerin Üretim Yöntemleri

Cam-seramiklerin üretimi, bir cam matris içinde kontrollü bir kristalizasyon sürecini içerir ve bu da benzersiz bir özellik kombinasyonuna sahip bir malzeme ile sonuçlanır (Fu vd. 2020). Üretim süreci tipik olarak, genellikle ısıtma işlemiyle elde edilen kontrollü kristalleşme yoluyla ince taneli seramiklerin çekirdeklenmesini ve büyümesini içerir (Zaidan ve Abed 2017). Cam-seramikler, kömür uçucu külü ve öğütülmüş renkli cam kırığı gibi atık malzemeler de dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan üretilebilir ve bu da onları sürdürülebilir malzeme üretimi için çevre dostu bir seçenek haline getirir (Rawlings vd. 2006, Tihomirovs ve Korjakins 2023, Glymond vd. 2018).

Cam-seramikler, klasik, toz ve sol-jel olmak üzere üç farklı yöntem ile üretilmektedirler.

2.1.3.1 Klasik Yöntem ile Cam-Seramik Üretimi

Klasik cam-seramik üretim yöntemi birkaç temel adım içerir. İlk olarak, bir öncü cam hazırlanır ve bu cam daha sonra kristalleşmeyi tetiklemek için kontrollü ısıtma işlemine tabi tutularak cam-seramik oluşumu sağlanır (Fu vd. 2020). Üretim süreci, cam-seramik türüne bağlı olarak değişebilir. Örneğin, sürekli fiber takviyeli cam-seramiklerin üretimi özel aparatlar ve daha karmaşık bir süreç gerektirir (Rawlings vd. 2006). Buna karşılık, cam-seramikler, çekirdeklenme ve kristalleşme aşamalarını içeren geleneksel ısıtma yöntemleri kullanılarak ağır metal alçı ve asitleme çamuru gibi atık malzemelerden de üretilebilir (Pan vd. 2015). Ayrıca, metalürjik süreçlerden ve kömür uçucu külünden elde edilenler de dahil olmak üzere atık camdan üretilebilen çeşitli cam-seramik türleri vardır (Tihomirovs ve Korjakins 2023, Glymond vd. 2018).

Klasik cam-seramik üretim yönteminin avantajlarından biri, standart cam işleme yöntemlerinin ardından kontrollü ısıtma işlemi kullanılabilmesi ve bunun sonucunda malzemelerde minimum kalıntı gözeneklilik oluşmasıdır (Cunha vd. 2007). Ayrıca, cam-seramiklerin işlenmesinde ince cam tozlarının kullanılması yüzey kristalizasyonunu kolaylaştırarak ek katalizörlere veya uzun süreli çekirdeklenme/kristal büyüme işlemlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırabilir (Bernardo vd. 2008).

2.1.3.2 Toz Yöntemi ile Cam-Seramik Üretimi

Toz yöntemleri kullanılarak cam-seramik üretimi, cam tozu kompaktlarının sinterlenmesi ve kristalizasyonu yoluyla katı elektrolitler, sanidin, fonksiyonel kaplamalar, biyoaktif malzemeler, kordiyerit bazlı, floramfibol, lityum disilikat ve Y tipi baryum hekzaferrit gibi çeşitli cam-seramik türlerinin sentezini içerir (Schilm vd 2022, Bernardo vd. 2006, Elsayed vd. 2022, Xue vd. 2019, Maleki vd. 2022, Zhang ve Gao 2008, Zhang vd. 2015, Deubener ve Höland 2017). Toz camın sinterlenmesi, özellikle atıklardan kaynaklanan cam-seramikler için yaygın bir işleme rotasıdır ve "ceramming" olarak bilinen, oluşan cam parçaların aşağı akış termal işlemi çeşitli kimyasal sistemler için kullanılmaktadır (Deubener ve Höland 2017, Bernardo vd. 2005, Bernardo ve Scarinci 2008).

2.1.3.3 Sol-Jel Yöntemi ile Cam-Seramik Üretimi

Sol-jel tekniği kullanılarak cam-seramik üretimi, gelişmiş biyoaktivite ve biyouyumluluğa sahip malzemeler üretme kabiliyeti nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Catauro ve Bollino 2017, Catauro vd. 2015). Sol-jel yöntemi, organik bileşenleri ayırtırmadan düşük sıcaklıklarda cam ve seramik sentezini içerir ve yeni veya geliştirilmiş seramik ve camların geliştirilmesi için büyük olanaklar sağlar (Hu ve Mackenzie 1992). Bu teknik, belirli hammaddelerle sol-jel prosesi kullanılarak sentezlenen $Ba_2TiSi_2O_8$ cam-seramikleri gibi çeşitli cam-seramiklerin hazırlanmasında kullanılmıştır (Shen vd. 2007). Ayrıca, sol-jel türevli cam-seramiklerin diğer teknikler kullanılarak hazırlanan malzemelere kıyasla daha yüksek biyoaktivite ve biyouyumluluk sergilediği bulunmuştur (Catauro vd. 2015, Catauro vd. 2015).

Ayrıca, sol-jel tekniği fotonik uygulamalara uygun şeffaf cam-seramikler üretmek için kullanılmış ve çeşitli teknolojik gelişmeler için çok yönlülüğünü ve potansiyelini göstermiştir (Pawlik vd. 2019, Gorni vd. 2018). Bu yöntem aynı zamanda kemik dokusu rejenerasyonu için uygun matrisler olarak kabul edilen biyoaktif cam iskeleler üretmek için de kullanılmıştır (Midha vd. 2013).

2.1.4 Cam-Seramiklerin Kullanım Alanları

Cam-seramikler, benzersiz özellik kombinasyonları nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. İnşaat ve mimari bileşenlerin yanı sıra uygun termo-mekanik özellikler gerektiren özel teknik uygulamalarda da yaygın olarak kullanılırlar (Rawlings vd. 2006). Ayrıca, ZnO gibi antibakteriyel maddelerle katılanmış cam-seramikler ilaç endüstrisinde uygulama alanı bulmaktadır (Demirel ve Taygun 2023). Bu malzemeler, önemli özellikleri nedeniyle askeri uygulamalarda, ev aletlerinde kullanılmaktadır (Demirel ve Taygun 2023). Ayrıca cam-seramikler, yapı malzemeleri, pişirme seramikleri, işlenebilir seramikler, biyo-seramikler, elektrikli seramikler ve ısı yalıtımı gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Dang ve He 2019).

Ayrıca, cam matris içinde kristalin fazlar içeren cam-seramik kompozit malzemeler tıp, fotonik, enerji depolama, havacılık, tekstil ve atık yönetimi alanlarında uygulama alanı bulmuştur (Paknahad ve Grosvenor 2017). Şeffaf cam seramikler, ışıldayan malzemeler, güneş uygulamaları için spektral dönüştürücüler, katı hal ışık yayan diyotlar, optik amplifikatörler ve mikrodalga soğurucularda ortaya çıkan uygulamalara sahiptir (Singh ve Sontakke 2021). Cam-seramikler, kemik malzemelerinde potansiyel kullanımları için de incelenmiştir (Barros vd. 2007). Endüstriyel uygulamalarda, cam-seramikler borular, siklon ayırıcılar, karıştırıcılar, tanklar ve kâğıt hamuru makineleri gibi çeşitli bileşenlerde yüksek mukavemetleri, termal ve kimyasal dirençleri nedeniyle kullanılmaktadır (Öztürk vd. 2017). Ayrıca, cam-seramikler yüksek şeffaflıkları nedeniyle optik bileşenlerde potansiyel kullanımları için araştırılmıştır (Maeda vd. 2015).

2.1.5 Kordiyerit Esaslı Cam-Seramikler

Kordiyerit bazlı cam-seramikler, düşük dielektrik sabiti, düşük termal genleşme katsayısı ve iyi mekanik özellikler gibi arzu edilen özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Shao vd. 2004). Bu malzemeler, beyaz eşya endüstrisindeki fırın mobilyaları, mikroelektronik ambalajlar ve düşük sıcaklıkta birlikte pişirilen seramikler için alt tabaka olarak çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Shao vd. 2004, Othman vd. 2021, Sun vd. 2022). Kordiyerit bazlı cam-seramikler yüksek termal ve kimyasal kararlılık sergileyerek

çeşitli alanlarda kullanım için uygun hale gelmektedir (Wang vd. 2011, Othman vd. 2021). Ayrıca, kızılötesi emisyonlarını artırmaya odaklanan çalışmalarla kızılötesi radyasyon performansını artırma potansiyelleri araştırılmıştır (Wang 2010, Wang ve Liang 2008).

Kordiyerit bazlı cam-seramiklerin ana fazı olan kordiyerit kristalin bileşimi, iklimsel etkilere karşı dirençleri ve yüksek milimetre dalga özellikleri de dahil olmak üzere faydalı özelliklerine katkıda bulunmaktadır (Maleki vd. 2022, Ohsato vd. 2011). Ayrıca, şeffaf karo sırları için kordiyerit bazlı cam-seramiklerin kullanılması önerilmiştir ve bu da bu malzemelerin farklı uygulamalardaki çok yönlülüğünü göstermektedir (Chen vd. 2017).

Kordiyerit-mullit cam-seramiklerin kristalleşme davranışını, mikro yapısını ve mekanik özelliklerini anlamak için de araştırmalar yapılmış ve özelliklerinin kapsamlı bir şekilde araştırılması vurgulanmıştır (Marghussian vd. 2009). Ayrıca, güneş enerjisi termal iletim boru hatlarının yapıştırılması için kordiyerit bazlı cam-seramiklerin kullanımı araştırılmış ve yenilenebilir enerji sektöründe yenilikçi uygulamalar için potansiyele işaret edilmiştir (Wu vd. 2021).

2.2 Vermikülit Minerali ve Cam-Seramik Üretiminde Kullanımı

Vermikülit, inşaat, ziraat ve çevre uygulamaları gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Şekil 2.5'deki gibi 2:1 tipi filosilikat yapısına sahip doğal olarak oluşan bir mineraldir (Rama vd. 2019). Kimyasal olarak mika ve montmorillonite benzeyen, değişen miktarlarda demir ve alüminyum içeren bir magnezyum silikat mineralidir (Miao vd. 2013). Vermikülit mükemmel ısı yalıtımı, yüksek sıcaklık kararlılığı ve su tutma özellikleri ile bilinir (Li vd. 2017, Valášková 2016).

Vermikülit, benzersiz özellikleri nedeniyle cam-seramik üretiminde kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Araştırmalar, katkı maddeleri içeren vermikülit bazlı cam-seramiklerin olumlu işlenebilirlik özellikleri sergilediğini göstermiştir (Onen vd. 2017). Buna ek olarak, Önen ve arkadaşlarının araştırması, MgF_2 içeriğinin vermikülit bazlı cam-seramiklerin işlenebilirlik özellikleri üzerindeki olumlu etkisini vurgulayarak, bileşimsel

ayarlamalar yoluyla özelleştirilmiş özelliklerin potansiyeline işaret etmiştir (Ercenk, 2017).



Şekil 2.5 Vermikülit minerali.

2.3 Bor Bileşikleri ve Cam-Seramik Üretiminde Kullanımı

2.3.1 Kolemanit

Önemli miktarda B_2O_3 içeren bir mineral olan kolemanit, başta cam ve seramik üretimi olmak üzere çeşitli endüstrilerde geniş uygulama alanı bulmaktadır. Lotti vd. (2017), CaB_6 üretimi için kalsine kolemanitin başlangıç malzemesi olarak kullanıldığını bildirmiştir. Ayrıca, kolemanitin borosilikat camların ve ısıya dayanıklı seramiklerin üretiminde bor kaynağı olarak kullanıldığını vurgulamışlardır (Pavlyukevich vd. 2009). Ayrıca, tekstil tipi fiberglas, cam ve seramik endüstrilerinde kolemanitin endüstriyel önemini vurgulamıştır (Can vd. 2016). %5-7 aralığında kolemanit ilavesinin seramik malzemelerin sinterleme ve oluşum süreçlerini iyileştirmede etkili olduğu bulunmuştur (Kichkailo ve Levitskii 2011). Ayrıca, kolemanitin boraks, boraks hidratlar ve sodyum perboratların üretiminde kullanımı da kaydedilmiştir (Frost vd. 2013).

Bununla birlikte, kolemanitin cam ve seramiklerde doğrudan kullanımının, özellikle hızlı pişirme koşullarında sinterleme sırasında gövde deformasyonuna neden olabilecek

ayrışması nedeniyle zor olabileceğine dikkat etmek önemlidir (Özdemir vd. 2017). Buna rağmen, kolemanitin borosilikat cam yapımında bor oksit kaynağı olarak borik aside alternatif olarak kullanılabileceği ve borik asit tedariki ve maliyeti ile ilgili sorunları ele alabileceği öne sürülmüştür (Pavlyukevich vd. 2009).

Sonuç olarak, kolemanit cam ve seramik üretiminde önemli bir rol oynamakta, bir bor kaynağı olarak hizmet etmekte ve sinterleme süreçlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Uygulamaları çeşitli endüstriyel sektörlere uzanır ve bu da onu çeşitli malzemelerin üretimi için değerli bir mineral haline getirir.

2.3.2 Borik Asit

Borik asit, cam seramiklerde çeşitli amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Borosilikatlara dayalı aside dayanıklı ve ısıya dirençli vitröz fazın kaynağı ve akısı olarak işlev görür (Vitkalova vd. 2018). Cam-seramiklere borik asit eklenmesi, atık içeren ağır metaller kullanılarak çevre açısından güvenli aside dayanıklı seramiklerin geliştirilmesinde gözlemlendiği gibi asit direncini ve ısı direncini artırabilir (Vitkalova vd. 2018). Ayrıca borik asit, seramiklerin sıvı fazda sinterlenmesine katkıda bulunarak yüzeyde kendinden sırlama efektlerinin üretilmesine ve malzeme derinliğindeki kristal faz partiküllerinin sırlanmasına olanak tanır (Shakhova vd. 2018). Buna ek olarak, borik asidin yaşlandırılmış test malzemelerinde renk stabilitesi ve yarı saydamlık sağladığı tespit edilmiş ve cam seramiklerdeki önemini daha da ortaya koymuştur (Sasany vd. 2023).

Ayrıca literatür, borik asidin $GdBO_3$ seramiklerinin mikro ve makro özellikleri önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Dong vd. 2021). Borik asit ayrıca seramik malzemelerin üretiminde bir akış ajanı olarak kullanılmış ve ikili kil-borik asit karışımlarından kuru ölçeklenebilir bir işlemle tatmin edici bir işlemle sonuçlanmıştır (Hernández vd. 2019). Ayrıca borik asit, seramik malzemelerin mukavemetini artırmak ve çevreye ağır metal göçünü önlemek için ek bir bileşen olarak kullanılmıştır (Vitkalova vd. 2018).

Cam-seramiklerdeki rolüne ek olarak, borik asit diğer çeşitli uygulamalarda da

kullanılmıştır. Örneğin, baskılı devre kartları (PCB) için epoksi reçinelerin camsı geçiş sıcaklığını artırmak için bir katalizör inhibitörü ve çapraz bağlama maddesi olarak kullanılmıştır (Mullins vd. 2011). Ayrıca borik asit, cam elyaf içeren polyester kompozitlerde en iyi alev geciktirici etkiyi göstererek farklı malzeme sistemlerindeki çok yönlülüğünü vurgulamıştır (Demirel vd. 2009).

Genel olarak literatür, borik asidin cam seramiklerdeki asit direnci, ısı direnci, renk kararlılığı ve yarı saydamlığa katkılarının yanı sıra seramiklerin mikro ve makro özellikleri üzerindeki etkisini de kapsayan çok yönlü rolünü ortaya koymaktadır.

2.3.3 Susuz Boraks

Sodyum tetraborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) olarak da bilinen susuz boraks, mükemmel cam oluşturma ve akışkanlaştırma özellikleri nedeniyle cam-seramik üretiminde çok önemli bir bileşendir (Akpınar 2020). Sıvı faz oluşum sıcaklığını düşürdüğü ve böylece elde edilen malzemenin sinterleme kinetiğini, mikro yapısını ve mekanik özelliklerini etkilediği gözenekli cam seramiklerin hazırlanmasında yaygın olarak bir akı olarak kullanılır (Zeng vd. 2022). Susuz boraks, boraks dekahidrat veya pentahidratın yaklaşık 1000 °C'de füzyonu yoluyla üretilir ve bu da onu endüstriyel seramik ve cam ürünlerinin üretiminde vazgeçilmez bir bor içeren bileşik haline getirir (Akpınar 2020). Ayrıca, susuz boraks, sert porselen gövdelerin yoğunlaştırılmasını kolaylaştırmak için kullanılmış ve farklı seramik uygulamalarında çok yönlülüğünü göstermiştir (Akpınar 2019).

Cam-seramikler bağlamında, susuz boraks çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Örneğin, titanyum alt tabakalar üzerinde fonksiyonel cam-seramik kaplamaların sentezinde reaktif bir dolgu maddesi olarak dahil edilmiş ve belirli özelliklere sahip yeni malzemeler yaratma potansiyelini göstermiştir (Elsayed vd. 2022). Ayrıca, susuz boraks yüzey modifikasyon özellikleri açısından araştırılmış ve yüzeyleri muamele edilmiş susuz boraksın hidrofiliten hidrofobik hale geçebildiği bulunarak cam-seramik uygulamalarında yüzey özelliklerini uyarlama potansiyeline işaret edilmiştir (Akpınar vd. 2019). Ayrıca, susuz boraks, kompozit malzemelerin özelliklerini geliştirmedeki rolünü vurgulayarak, şişen özelliklere sahip alkali ile aktive edilmiş harçların sentezi gibi

malzemelerin alkali aktivasyonunda kullanılmıştır (Nicoara vd. 2019).

Cam-seramiklerde susuz boraks kullanımı, diş hekimliği, tıp ve nükleer atık tutma dahil olmak üzere çeşitli alanlarda cam-seramik malzemelerin daha geniş uygulama alanlarıyla uyumludur. Cam-seramikler, spesifik radyopasite değerleri, termal genleşme katsayıları ve elektriksel özellikler gibi çok çeşitli özellikler sunarak onları çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir. Susuz boraksın cam-seramiklere dahil edilmesi, özel özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunarak seramik malzemeler alanının ilerletilmesindeki önemini ortaya koymaktadır.



3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Malzemeler

Deneyisel çalışmalarda, MAS ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) sistemine % 10, %20, %30 oranlarında Eti Maden / Emet tesislerinden temin edilen öğütülmüş susuz boraks, borik asit, kolemanit katkısı yapılarak bu katkıların 1000°C’de vermikülit esaslı kordiyerit cam- seramik mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Hangi özelliklerine etkileri incelenmiştir? Hangi amaçla deneyler yapılmıştır?

Bu tez çalışmasında, MgO kaynağı olarak Sivas-Yıldızeli yöresinden çıkarılan Serakülit firmasına ait vermikülit, Alümina kaynağı olarak Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinde üretilen α - Al_2O_3 , SiO_2 kaynağı olarak Ferro Turkey Kaplama Cam ve Renk Çözümleri Sanayi ve Ticaret Limited Şirketinden temin edilen kuvars, ergitici olarak susuz boraks, borik asit ve kolemanit kullanılmıştır. Tablo kullanılan hammaddeleri göstermektedir. Kullanılan hammaddelerin kimyasal içeriği XRF yöntemi ile analiz edilmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Kullanılan hammaddelerin kimyasal içeriği.

	Vermikülit (%)	Kuvars (%)	Alümina (%)	Boraks (%)	Borik asit (%)	Kolemanit (%)
SiO₂	39,70	99,50	0,02	0,00	0,00	4,52
Al₂O₃	17,30	0,30	99,00	0,00	0,00	0,09
K₂O	6,70	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Na₂O	0,30	0,02	0,28	30,47	0,00	0,06
CaO	2,50	0,04	0,00	0,00	0,00	26,90
MgO	16,60	0,03	0,00	0,00	0,00	1,97
Fe₂O₃	13,90	0,03	0,02	0,00	0,00	0,04
TiO₂	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P₂O₅	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SrO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75
MnO	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Br₂O₃	0,00	0,00	0,00	69,23	99,07	39,50
S₀₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33
KK	0,20	0,20	0,15	0,00	0,00	24,45

KK: Kızdırma kaybı

3.2 Deneysel Çalışmalar

3.2.1 Bileşimlerin Hazırlanması

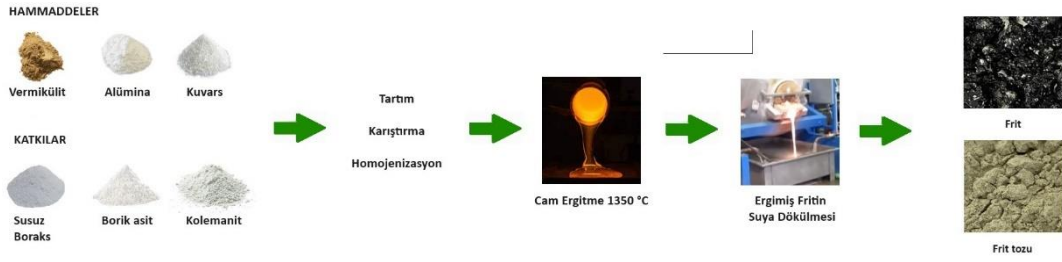
Kordiyerit fazının elde edilmesi için söz konusu hammaddelerden kordiyeritin kimyasal formülündeki ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) sitokiyometriye uygun olarak hazırlanan tüm karışımlarda $\text{MgO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ mol oranları ağırlıkça 13,7:34,9:51,4 olacak şekilde ayarlanmıştır. Öncelikle vermikülit, alümina ve kuvars içeren K0 (katkısız) bileşimi hazırlanmıştır. Daha sonra K0 bileşimindeki reçeteye %10, 20 ve 30 oranlarında susuz boraks, borik asit, kolemanit ilaveleri ile katkılı reçeteler (K1, K2, K3, K9) hazırlanmıştır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 Hazırlanan bileşimler.

Karışım	Kuvars	Alümina	Vermikülit	Susuz Boraks	Borik Asit	Kolemanit
K0	15,35	17,03	67,60	0	0	0
K1	13,82	15,32	60,84	10	0	0
K2	12,28	13,62	54,08	20	0	0
K3	10,75	11,92	47,32	30	0	0
K4	13,82	15,32	60,84	0	10	0
K5	12,28	13,62	54,08	0	20	0
K6	10,75	11,92	47,32	0	30	0
K7	13,99	15,69	60,31	0	0	10
K8	12,62	14,34	53,03	0	0	20
K9	11,25	13,00	45,73	0	0	30

3.2.2 Ergitme

Homojen bir şekilde karışımı sağlanan toz numuneler Akcoat (İleri Kimyasal Kaplama Malzemeleri San. ve Tic. A.Ş./Sakarya) firmasına ait endüstriyel tipi ergitme fırınında alümina pota içerisinde 1450°C 'de ergitme işlemi yapılmıştır. Eriyik cam, soğuk su havuzuna dökülerek ani soğutma işlemine tabi tutulmuş ve milimetre boyutlarında frit yapıları elde edilmiştir. Elde edilen fritler gezegen bilyalı değirmende (planetary ball mill) $100\ \mu\text{m}$ altına kadar öğütölüp frit tozları elde edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Fritleştirme işlemi akım şeması.

3.2.3 Şekillendirme

Bilyalı değirmende 100 mikron altı inceliğe öğütülen frit tozları Şahinler Marka DPM775-30 model presle (Resim 3.1) şekillendirilmiştir. Homojenize edilen karışımlar şekillendirilmek üzere %5–10 arası su püskürtülerek nemlendirilmiş ve sonra metalik kalıp içerisinde kuru presleme yöntemiyle 1 cm çapında ve 0,5 cm yüksekliğinde 50 bar basınçta preslenerek şekillendirilmiştir.



Resim 3.1 Pres makinası.

3.2.4 Sinterleme

Frit tozlarının şekillendirme işlemi sonrasında cam-seramik yapıya dönüşümünü sağlama amacıyla sinterleme işlemleri Protherm marka PLF 130/10 Model kül fırını (Resim 3.2) ile yapılmıştır. Şekillendirilmiş numuneler 10 °C/dk ısıtma hızında 1000 °C’de sinterleme işlemine tabi tutulmuştur.



Resim 3.2 Kül fırın.

3.3 Karakterizasyon

3.3.1 Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

Numunelerin DTA analizi, Setaram marka Labsys Evo model DTA/TG cihazı ile yapılmıştır.

Hazırlanan toz karışımların sinterleme işlemi öncesinde cam geçiş ve kristalizasyon sıcaklıklarının belirlenebilmesi amacıyla DTA/TG cihazında (Resim 3.4) 10 °C/dk ısıtma hızında 1200°C'ye kadar DTA analizleri yapılmıştır.



Resim 3.3 DTA/TG cihazı.

3.3.2 X-Işınları Difraksiyonu (XRD) Analizi

Numunelerin amorf yapıda olup olmadığının kontrolünü ve/veya yapı içerisinde oluşabilecek kristal fazların tespitini yapmak için XRD yöntemi (markası BRUKER, modeli ise D8 ADVANCE (Resim 3.4) kullanılmıştır. Numuneler, 10° - 100° (2θ) arasında tarama açısı ve 1 derece/dk. tarama hızı ile taranmıştır. Analiz, bakır X-ışını tüpü ($\text{Cu-K}\alpha=1,544 \text{ \AA}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.4 XRD analiz cihazı.

3.3.3 Yoğunluk Testi

Sinterlenen numunelerin Su emme, bulk yoğunluk ve görünür gözeneklilik, Arşimet ilkesine (ASTMC373-88) göre geleneksel sıvı yer değiştirme yöntemi kullanılarak ölçülmüştür; bu yöntem, test numunelerinin sabit ağırlığa ulaşmaya kadar kurutulmasını, damıtılmış suda 5 saat kaynatılmasını ve kaynatıldığı ortamda oda sıcaklığına soğumaya bırakıldıktan sonra 24 saat daha bekletilmesini içerir. Numune gözeneklerine su emdirme işleminden sonra, her numunenin kuru kütlesi (w_1), suda asılı haldeyken (w_2) ve suya doymuş haldeki kütlesi (w_3) hassas terazide tartılarak ölçülür. Kordiyerit faz dönüşümü için ölçülen değerlerden ilk etapta sadece bulk yoğunluk değerlerine göre değerlendirme yapılmıştır.

$$Bulk\ Yoğunluk = \frac{w_1}{w_3 - w_2} \times \rho_{su} \quad (3.1)$$

w₁: Numunenin kuru kütlesi (w₁),

w₂: Asılı haldeyken kütlesi (w₂)

w₃: Doymuş haldeki kütlesi (w₃)

Numunelerin gerçek yoğunlukları ise TSE 4400 standardında belirtilen piknometre ile gerçek yoğunluklarının tayinine göre yapılmıştır.

Sinterleme öncesi tozların, hacmi ve ağırlığı bilinen kalibre edilmiş bir piknometre ve yoğunluğu bilinen bir sıvı yardımıyla teste tabi tutularak aşağıdaki formül kullanılarak gerçek yoğunlukları belirlenmiştir.

$$\rho_t = \frac{m_1}{m_3 + m_1 - m_2} \times \rho_1 \quad (3.2)$$

ρ_t: Seramik malzemenin gerçek yoğunluğu (gr/cm³)

ρ₁: Deney sıvısının yoğunluğu (gr/cm³)

m₁: Numunenin kütlesi (gr)

m₂: Numune ve sıvıyla dolu piknometrenin kütlesi (gr)

m₃: Sıvıyla dolu piknometrenin kütlesi (gr)

3.3.4 Mikro Yapı Analizi (Taramalı Elektron Mikroskobu, SEM)

Mikroyapı analizinin gerçekleştirilebilmesi için analiz edilecek numunelerin iletken bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden cam seramik numunelerimizi Baltec Sputtering SCD/005 marka kaplama cihazı ile 100 mA akımda 60 sn boyunca nikel ile kaplanmıştır. Nikel ile kaplanarak iletken duruma getirilen numunelerin mikro yapısını incelemek için LEO 1430VP markalı taramalı elektron mikroskobu ile malzeme yüzeyinden veya ihtiyaç duyulduğunda kırık yüzeyden SEM görüntüleri alınarak mikro yapı analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz 20.00 kVda 1000X, 2500X, 5000X büyüttmelerde yapılmıştır.

3.3.5 Küçülme Davranışlarının Tespiti

Küçülme davranışlarının tespitinde her bir seri için 1,3cm x 1,3cm (uzunluk x genişlik) ebatlarında 5'er adet numuneler hazırlanmıştır. Numunelerde % olarak küçülmelerin belirlenebilmesi için uzunluk (L), genişlik (b), olarak her bir boyuttaki değişimler şekillendirme öncesi ve sinterleme işlemi sonrası kumpas yardımı ile ölçülmüştür. Numunelerdeki % küçülmeler;

$$\frac{\text{ilk uzunluk} - \text{son uzunluk}}{\text{ilk uzunluk}} \times 100 \quad (3.3)$$

formülüne göre hesaplanmıştır.

3.3.6 Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme mukavemeti testi için 7cm x 6cm x 6cm ebatlarında hazırlanan deney numuneleri kullanılmıştır. Üç nokta eğme mukavemeti testleri laboratuvarındaki çekme cihazı üzerinde 3 nokta eğme düzeneği kurularak ve cihaz basma moduna getirilerek yapılmıştır. Üç nokta eğme deney düzeneğinde (Resim 3.5) mesnetler arası mesafe 6mm olup mesnetler 3 mm çapında silindirik çubuktur. Yük uygulayan mandrel ucunun eğrilik çapı da 3 mm'dir. Numunelerde üç nokta eğme mukavemeti ölçümü için her bir seriye ait 5 adet numune kullanılmıştır. Kuvvetin ilerleme hızı 10-20 N'dur.

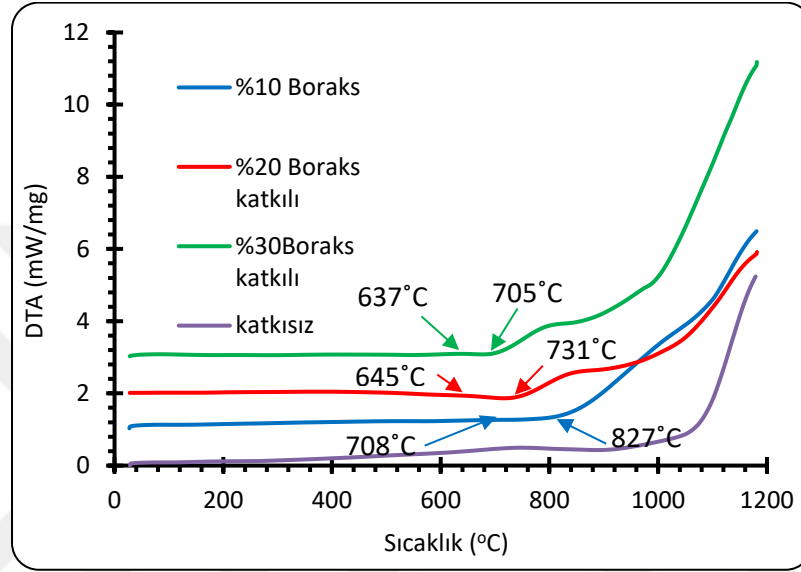


Resim 3.5 3 Nokta eğme test düzeneği.

4. BULGULAR

4.1 DTA Sonuçları

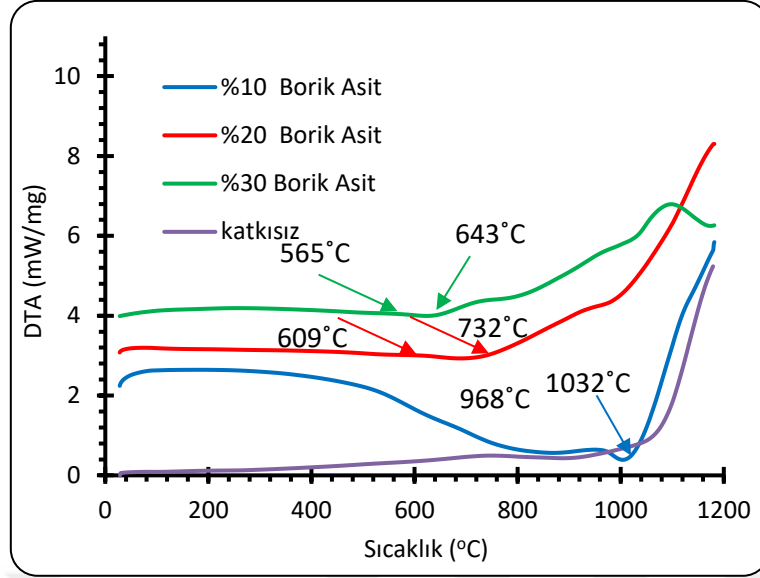
%0, 10, 20 ve 30 oranlarında boraks katkısı içeren frit tozlarının DTA/TG analiz sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Boraks katkılı numunelerin DTA grafiği.

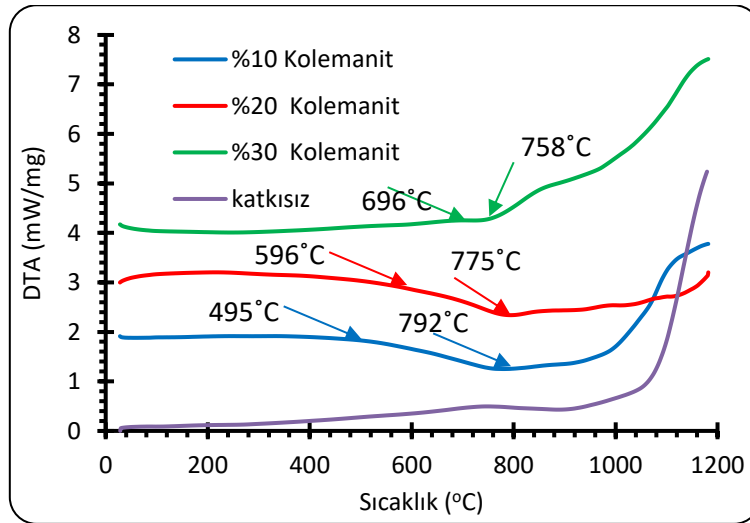
Ergitici maddeler (flux agent) düşük ergime noktasına sahip maddelerdir. Boraks da bu maddelerden birisidir. Flux kullanımı karışımın daha düşük sıcaklıklarda erimesini ve reaksiyonun gerçekleşmesini sağlar. Katkısız numunenin DTA grafiği ile kıyaslandığında flux kullanımının etkisi bariz görülmektedir. %10 boraks kullanımı ile endotermik reaksiyonun başlangıç ve bitiş sıcaklıkları 748-919°C den 708-827°C ye düşmüştür. Flux miktarının %10’dan %30’a artması endotermik reaksiyonundaki sıcaklık düşüşünü devam ettirmiştir. Literatürle karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür (Zeng 2022, Khan 2022).

%0, 10, 20 ve 30 oranlarında borik asit katkısı içeren frit tozlarının DTA/TG analiz sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Borik asit katkılı numunelerin DTA grafiği.

%10 borik asit katkılı numunenin DTA grafiğinden endotermik reaksiyonun başlangıç ve bitiş sıcaklıklarının katkısız numuneninkine kıyasla düştüğü görülmüştür. Boraksa kıyasla borik asitin ergime sıcaklığı daha düşük olduğundan dolayı (170°C) boraks katkısından daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir. %10, %20, %30 borik asit katkılı numunelerin endotermik reaksiyon başlangıç ve bitiş sıcaklıkları sırasıyla 968-1032, 609-732, 565-643°C'dir. Sonuçlar, literatürdeki benzer nitelikli çalışma sonuçları ile (Palacı 2020) uyumludur. %0, 10, 20 ve 30 oranlarında kolemanit katkısı içeren frit tozlarının DTA/TG analiz sonuçları Şekil 4.3'de verilmiştir.



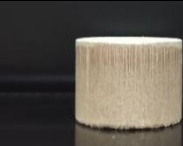
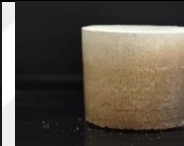
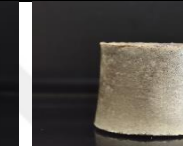
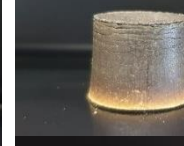
Şekil 4.3 Kolemanit katkılı numunelerin DTA grafiği.

Kolemanitin ergime sıcaklığı boraks ve borik asitten daha yüksek olduğundan (930°C) matrise kolemanit katkısı diğer katkıları kadar belirgin bir düşüş kaydedilmemiştir. %10, %20, %30 kolemanit katkılı numunelerin endotermik reaksiyon başlangıç ve bitiş sıcaklıkları sırasıyla 724-870, 698-825, 689-764 °C'dir. Kolemanit cam endüstrisinde ergime noktasını düşürücü bir katkı olarak kullanılır. Bu özellik cam seramik matrise kolemanit katkısında görülmektedir. Literatürle karşılaştırıldığında sonuçların (Akpınar 2017, Evcin 2021) uyumlu olduğu görülmüştür.

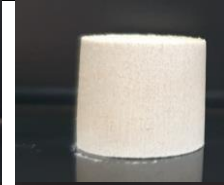
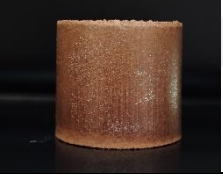
4.2 Sinterleme Sonuçları

Borik asit, Boraks ve Kolemanit katkılı numunelerin sinterleme sonrası görüntüleri sırasıyla Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

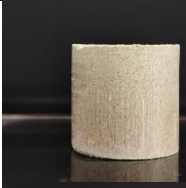
Çizelge 4.1 Borik asit katkılı numunelerin sinterleme sonrası görüntüleri.

Sıcaklık	Katkısız	%10 Borik asit	%20 Borik asit	%30 Borik asit
700				
750				
800				
900				
1000				

Çizelge 4.2 Boraks katkılı numunelerin sinterleme sonrası görüntüleri.

Sıcaklık	Katkısız	%10 Susuz Boraks	%20 Susuz Boraks	%30 Susuz Boraks
700				
750				
800				
900				
1000				

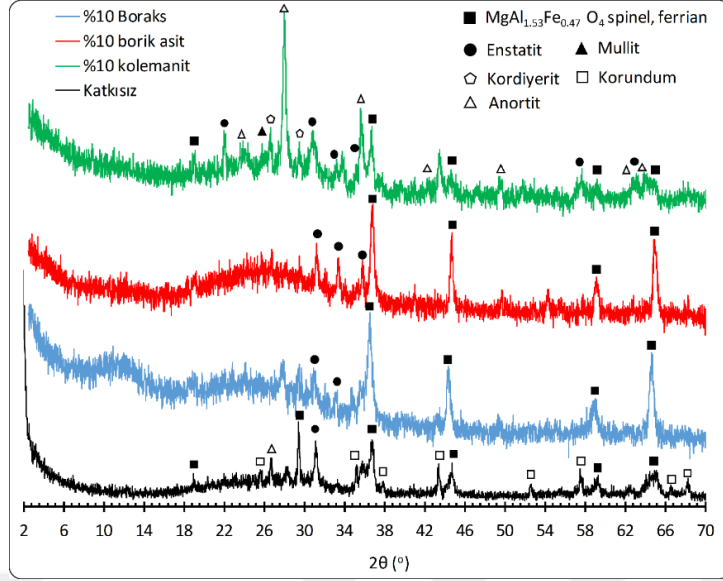
Çizelge 4.3 Kolemanit katkılı numunelerin sinterleme sonrası görüntüleri.

Sıcaklık	Katkısız	%10 Kolemanit	%20 Kolemanit	%30 Kolemanit
700				
800				
900				
1000				

Sinterleme sonrası sonuçlara bakıldığında numunelerin 700°C ve 800°C’de sinterlemenin yeterli gelmediği 900°C ile 1000°C arasında gerçekleştiği bazı numunelerde şekil değişimi gözlenmiştir. En sağlıklı sonuçların alınması için 1000°C’de sinterlenen numuneler seçilmiştir.

4.3 XRD Sonuçları

Şekil 4.4 de katkısız ve %10 susuz boraks, %10 borik asit ve %10 kolemanit katkılı karışımların 0-70° aralığındaki XRD paternleri verilmiştir. Katkısız karışımın kordiyerit (PDF card no: 01-082-1884) ve enstatitten (PDF card no: 00-019-0768) oluştuğu ve sonuçların literatürde yapılan çalışmayla (Klika 2020) uyum sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.4 Katkısız, %10 susuz boraks, %10 borik asit ve %10 kolemanit katkılı karışımların XRD analiz sonuçları.

%10 Boraks ve %10 Borik asit katkılı karışımın XRD paternleri $MgAl_{1.53}Fe_{0.47}O_4$ Spinel (PDF card no: 01-075-4400) yapısına uyduğu görülmüştür (Hossain ve Shahzad 2015, Nayebzadeh ve Hamed 2020). Boraks katkısı ergitici bileşen etkisi ile katkısız karışımda bulunan kordiyerit ve enstatit fazlarını spinel faza dönüştüğü düşünülmektedir literatürdeki çalışmalarda (Redaoui 2018)da mevcuttur.

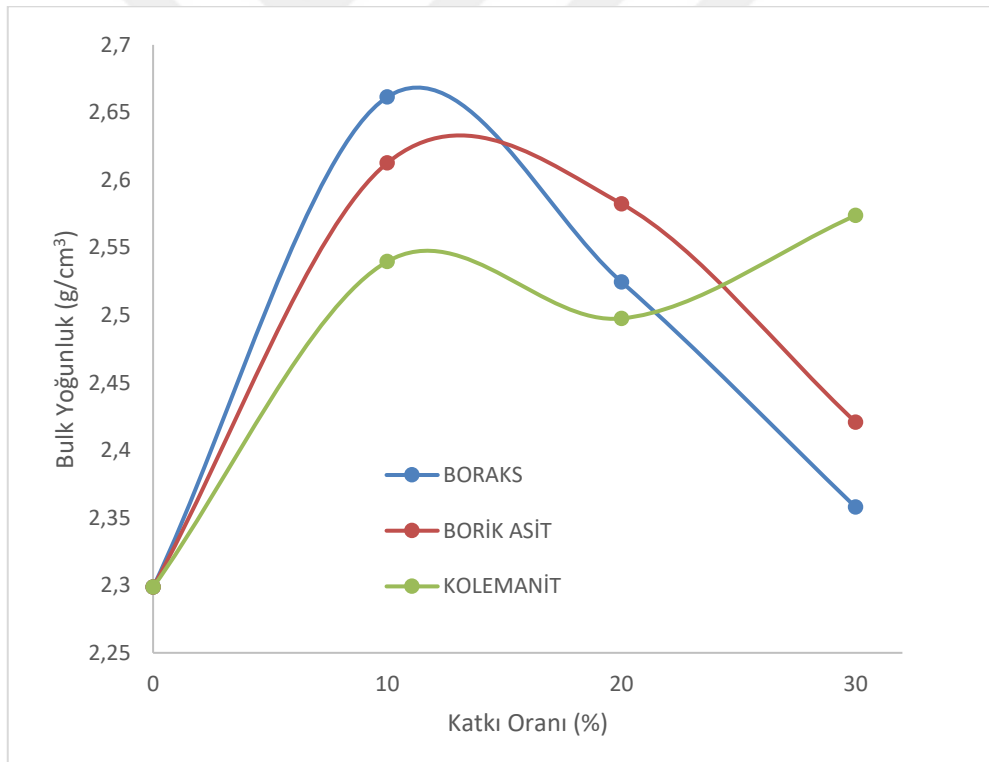
%10 Kolemanit katkılı karışımın XRD paternleri Anortit, $Al_2Ca(SiO_4)_2$ (pdf 00-002-0537) fazına karşılık geldiği görülmektedir. İlave edilen kolemanitteki kalsiyum iyonları kordiyerit fazındaki magnezyumla yer değiştirerek anortiti oluşturduğu literatürdeki çalışmalarda (Sai 1993) da mevcuttur.

4.4 Yoğunluk Testi Sonuçları

Numunelerin bulk yoğunluk ve su emme test sonuçları Çizelge 4.1’de sonuç grafiği ise Şekil 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Numunelerin bulk yoğunluk ve su emme test sonuçları.

Katkı Türü	Katkı Miktarı (%)	Bulk Yoğunluk (g/cm ³)	Su Emme (%)
Katkısız	0	2,29	6,39
Susuz Boraks	10	2,66	0,20
	20	2,52	0,22
	30	2,35	0,21
Borik Asit	10	2,61	0,40
	20	2,58	0,00
	30	2,42	0,20
Kolemanit	10	2,53	2,14
	20	2,49	0,20
	30	2,57	0,20



Şekil 4.5 Numunelerin bulk yoğunluk sonuç grafiği.

Yoğunluk sonuçlarını incelediğimizde, numunelerin gerçek yoğunluklarının 2,298–2,61 g/cm³ aralığında değiştiği görülmüştür. Literatürde saf kordiyeritin teorik yoğunluğu 2,51 g/cm³ dolaylarında belirtilmiştir (Richerson, 1992). Test sonucunda literatürdeki

değerden yüksek yoğunluk değerinin elde edilmesi XRD analizi sonuçlarında da görüleceği üzere katkısız kordiyerit malzeme yapısındaki diğer fazların (Spinel (3,58 g/cm³) ve forsterit (3,58 g/cm³) kordiyerite göre nispeten yüksek yoğunluğa sahip safsızlıkların varlığı ile açıklanabilir.

Su emme sonuçlarına göre en çok su emmenin katkısız numunede olduğu görülmüştür. %10 boraks katkılı numunelerde su emme sonuçları hemen hemen aynıken, borik asit katkısı %10 dan %20'ye arttığında su emme oranı azalırken %30 borik asite çıktığında su emme oranında artış görülmüştür. Kolemanit katkısı %10'dan %30'a çıkarken su emme oranı azalmıştır. Sonuçlara göre yoğunluğun artmasıyla beraber su emme oranının azaldığı ve su emme miktarı azaldıkça gözenek miktarının azaldığı görülmüştür.

Yapılan DTA analizi, XRD analizi ve yoğunluk test sonuçlarına göre %10 katkılı numunelerin kordiyerit fazına daha yakın sonuçlar verdiğiinden karakterizasyon ve mekanik testler için 4 reçeteye (katkısız, %10 boraks, %10 borik asit, %10 kolemanit) devam edilmiştir.

4.5 Küçülme Davranışları Testi Sonuçları

Numunelerin % küçülme oranları Çizelge 4.2 verilmiştir.

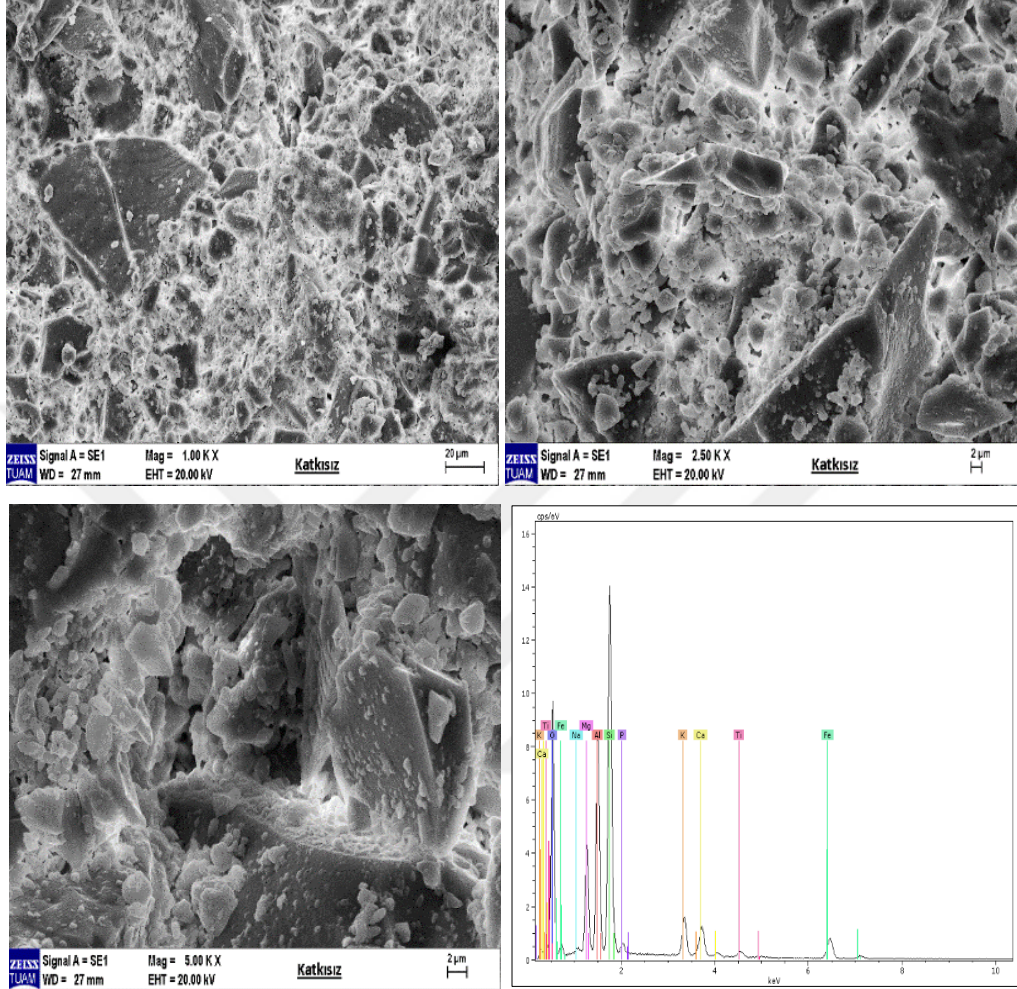
Çizelge 4.5 Numunelerin küçülme oranları.

Numune	% Küçülme
Katkısız	7,14
%10 Boraks katkılı	12,85
%10 Borik asit katkılı	14,28
%10 Kolemanit katkılı	10,00

Katkısız numunede küçülme oranı %7,14 tespit edilirken numunelerin katkılarla birlikte küçülme oranının %14,28 seviyesine çıktığı görülmüştür. Katkılı olan numunelerde küçülme oranının artmasının nedeni gözenek miktarının azalmasından dolayı numunelerde şekil değişimi ve pişme küçülmeleri görülmektedir.

4.6 SEM Sonuçları

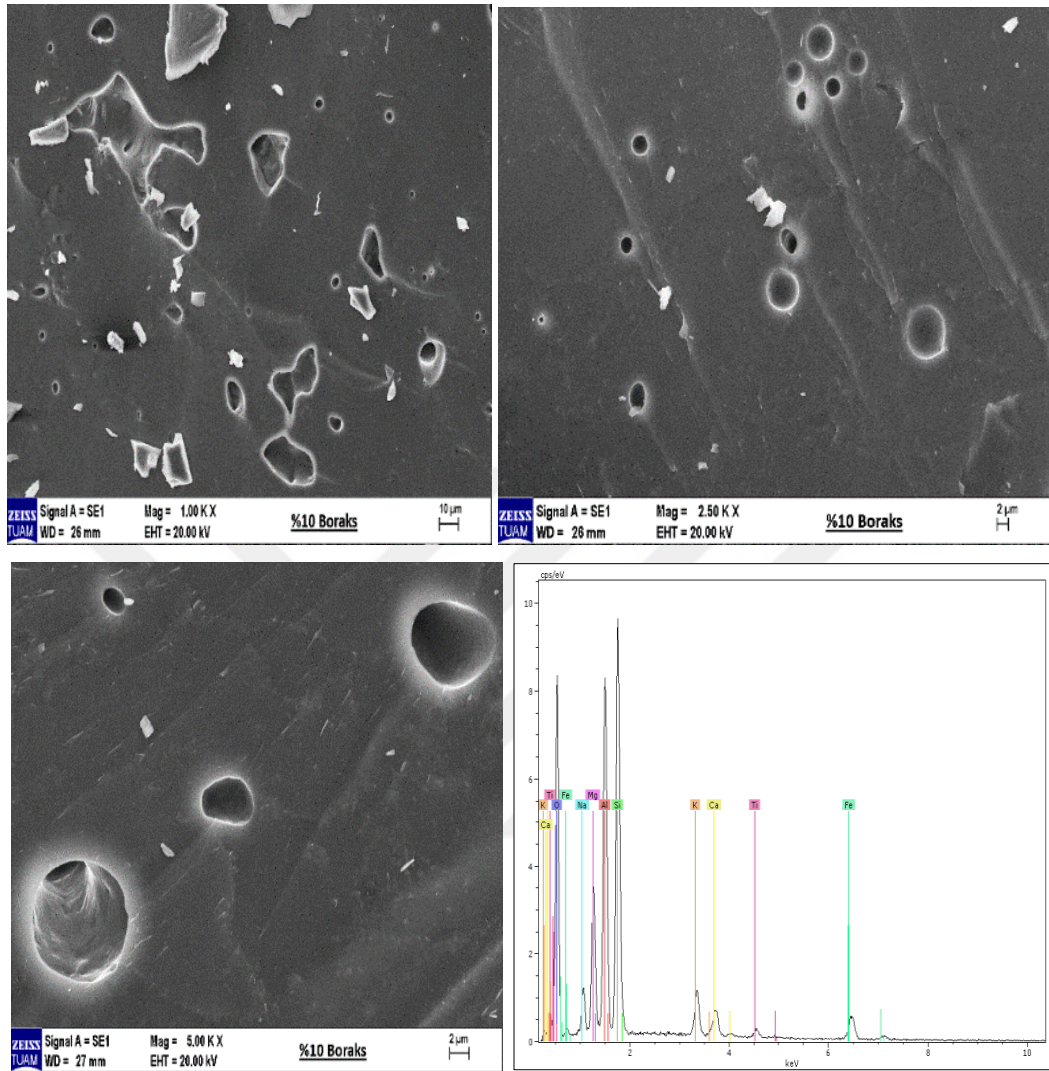
Katkısız numunelerin SEM ve EDX sonuçları Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 1000°C’de Sinterlenmiş katkısız numunelerin SEM ve EDX görüntüleri.

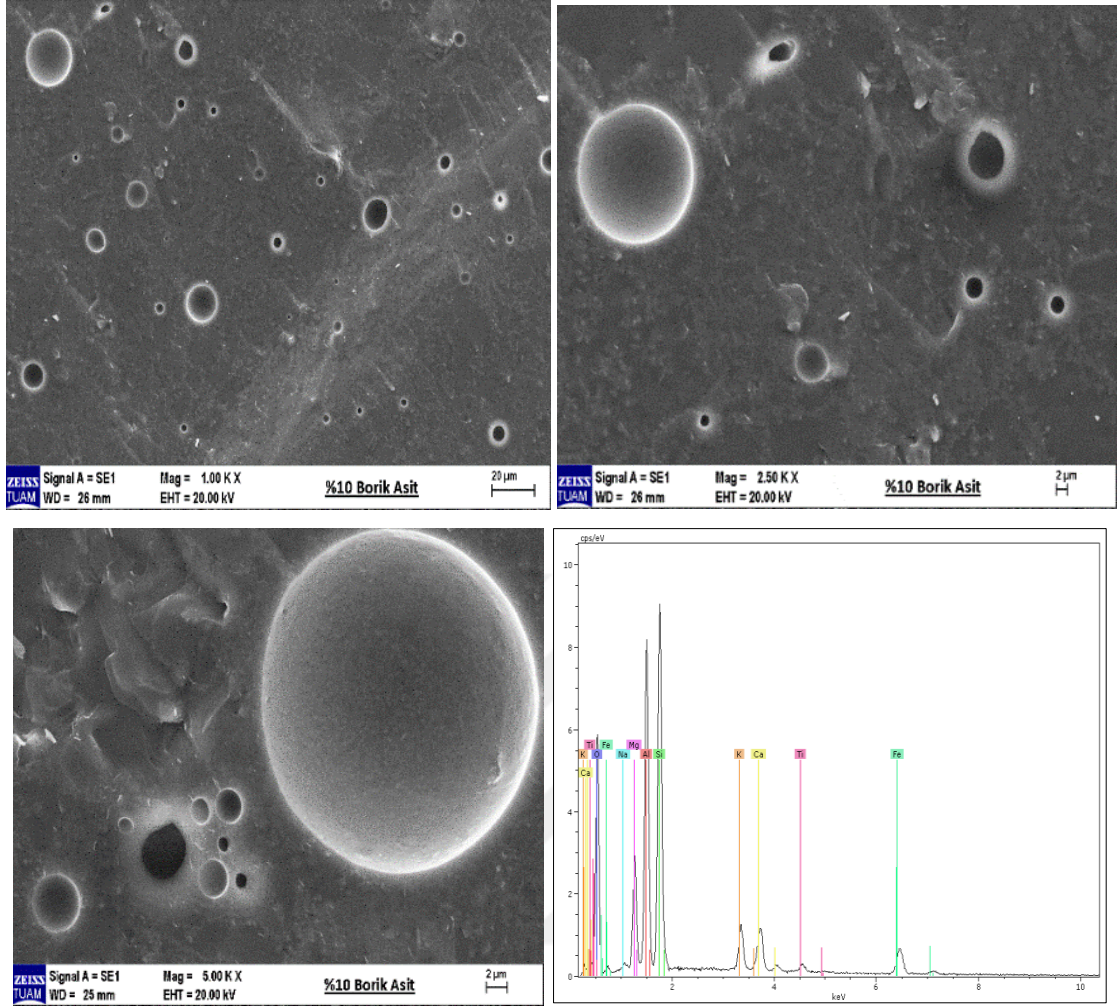
Kristal fazların morfolojisini (bor katkılı cam seramik örneklerinde mikro yapı gelişimlerini incelemek için yapılan sem analiz sonuçları) belirlemek amacıyla sinterlenmiş numuneleri üzerinde SEM-EDX incelemeleri yapıldı. Şekil 4.6’da 1000 °C’de sinterlenmiş katkısız numunenin kesit yüzeyinden alınan SEM mikrografları görülmektedir. Burada matrisde gömülü bulunan camsı faz ve gözenek yapısı görülmektedir. Tane boyutu 2-60 µm olarak belirlenmiştir. EDX ve XRD analizinden de görülebileceği gibi yapı Magnezyum alüminat spineli, kordierit ve korundumdan meydana gelmektedir. Şekil 4.6’da kayda değer miktarda gözenekliliğe sahip katkısız sinterlenmiş numunenin yüzey morfolojisi ölçülen yoğunlukla uyumludur. Sonuçlar

literatürdeki çalışmalarla(Kumar vd. 2015) uyumludur.



Şekil 4.7 1000°C’de Sinterlenmiş %10 boraks içeren numunelerin SEM ve EDX görüntüleri.

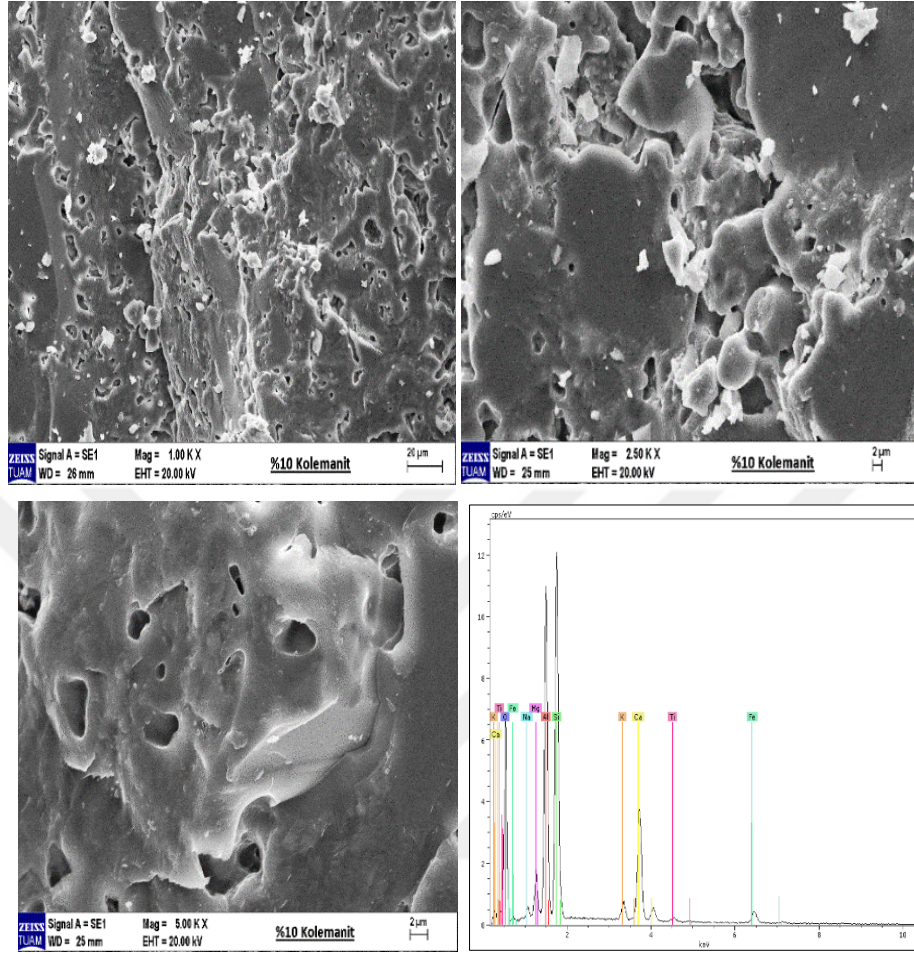
Şekil 4.7’de ergitici bileşen (fluxing agent) olarak katılan %10 boraks içeren numunelerde camsı faz meydana gelmiştir. Camsı matris içerisinde 1,5-10 µm aralığında küresel gözenekler bulunmaktadır. Şekilde homojen olarak dağılmış gözenekli yapı görülmektedir. Katkısız numunedeki gözenekler %10 boraks katkısıyla kısmen dolarak gözeneklilik oranını düşürmüştür. Bu elde edilen yoğunluk ve gözenek sonuçlarıyla desteklenmektedir. Literatürde boraks ilavesinin bulk yoğunluğu arttırdığı, poroziteyi düşürdüğü çalışmalar mevcuttur. Bu sonuçlar su emme ve % gözeneklilik ile de doğrulanmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda da mevcuttur (Özdemir 2016).



Şekil 4.8 1000°C’de Sinterlenmiş %10 borik asit içeren numunelerin SEM ve EDX görüntüleri.

Şekil 4.8’de ergitici bileşen (fluxing agent) olarak katılan %10 H_3BO_3 (Borik asit) içeren numunelerde camsı fazların gelişimi görülmektedir. Camsı matris içerisinde 4-27 μm aralığında küresel gözenekler mevcuttur. Şekilde camsı matristeki gömülü bulunan kristal faz taneleri mevcuttur. Borik asit 150°C’de metaborik aside (HBO_2) dönüşür. 150° C üzerinde ise tüm suyunu kaybederek bor oksite dönüşür (B_2O_3). Kristalin bor oksit 450°C’de ergime noktasına sahiptir. Amorf bor oksit ise 325°C’te yumuşamaya başlar ve 500°C’de ergimeye başlar (Sevim vd. 2006). %10 Borik asit katkısıyla oluşan bor oksitler 1000°C’de ergiyerek camsı fazı meydana getirir. Katkısız kordiyerit numunesinin SEM fotoğrafıyla kıyaslandığında tane sınırlarının kaybolduğu ve camsı fazın oluştuğu görülür. Bu durum mekanik özelliklerdeki artışla desteklenmektedir. Katkısız numuneyle kıyaslandığında borik asitin dekompozisyonu nedeniyle sıvı faz oluşumu sonucu daha yoğun ve kompakt yapı elde edilmiştir. İki numune arasındaki yoğunluk farkıda bunu

desteklemektedir.



Şekil 4.9 1000°C’de Sinterlenmiş %10 kolemanit içeren numunelerin SEM ve EDX görüntüleri.

Şekil 4.9’da ergitici bileşen (fluxing agent) olarak katılan %10 Kolemanit içeren numunelerde de camsı faz oluşumu belirgindir. Camsı matris içerisinde ortalama 4 µm çapında gözenekler mevcuttur. Şekilde camsı matristeki homojen olarak dağılmış gözenekler görülmektedir. Kolemanitin ergime sıcaklığı daha yüksek olduğundan (930° C) Şekil 4.9’daki %10 borik asit katkılı numune kadar yoğun bir yapı elde edilmemiştir. Ancak yine de homojen gözenek dağılımlı bir camsı yapı mevcuttur. Şekil 4.9’daki fotoğrafta daha gözenekli yapı yoğunluk sonuçlarında da kendisini göstermiştir.

4.7 Mukavemet Sonuçları

Çizelge 4.3’te numunelerin mukavemet sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.6 Numunelerin mukavemet sonuçları.

Numune	Eğme Mukavemeti (MPa)
Katkısız	35,78
%10 Boraks katkılı	292,81
%10 Borik asit katkılı	163,63
%10 Kolemanit katkılı	130,40

Her seriden 5'er adet numuneye mukavemet testi yapıp ortalama değerler alınmıştır. Mukavemet sonuçları incelendiğinde, Katkısız numunelerde 35.779 MPa iken katkılarla beraber bu değer arttığı görülmüştür. %10 boraks katkılı numunelerde maksimum değer 292,814 MPa Çıkarken %10 borik asit ve kolemanitte azaldığı görülmüştür. Bu sonuçların yoğunluk sonuçlarıyla orantılı olduğu saptanmıştır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

DTA analiz sonuçları değerlendirildiğinde tüm katkıların endotermik reaksiyonda sıcaklık düşüşünü sağlamıştır. Borik asit, boraks ve kolemanitin yanı sıra ergime noktası daha düşük olduğunda reaksiyon boyunca tüm fazı ergittiği ve endotermik reaksiyonda ergime noktasının en düşük sıcaklık olduğu gözlemlenmiştir.

XRD analizleri değerlendirildiğinde İstenilen kordiyerit fazının çok az miktarda %10 kolemanit katkılı numunede görülmüştür. Katkısız, %10 boraks ve %10 borik asit ve %10 kolemanit katkılı numunelerde spinel, enstatit, müllit, anortit, korundum fazlarının tespit edildiği faz dönüşümünün gerçekleşmediğini göstermiştir.

Yoğunluk testi sonuçlarının kordiyerit literatürdeki yoğunluğundan düşük olması XRD analiz sonuçlarından destek alınarak yapısındaki enstatit anortit spinel korundum fazları olduğu düşünülmüştür.

Mukavemet sonuçları irdelendiğinde literatürde camların eğme gerilmesi 55-70 MPa arasında olup cam seramiklerde 70-350 MPa aralığında olduğu görülmektedir (Varshneya ve Mauro 2010). Yapılan çalışmada mukavemet değerlerinin katkısız numuneye göre boraks, borik asit ve kolemanit gibi katkılarla arttığı görülmektedir. En iyi etkinin %10 boraks katkılı numunelerde olduğu saptanmıştır. Literatürdeki çalışmalarla (Dixit vd. 2002) desteklenmektedir. %10 Boraks katkılı numunede mukavemet 292,814N'dur Mukavemetin yüksek olmasının nedeni %10 Boraks katkılı numunede yoğunluğun yüksek ve su emme miktarının düşük olmasından dolayı daha gözeneksiz bir malzeme olduğu düşünülmüştür.

6. KAYNAKLAR

- Akpınar, S., Evcin, A., Özdemir, Y. (2017). Effect of calcined colemanite additions on properties of hard porcelain body. *Ceramics International*, 43(11), 8364-8371.
- Andreola, F., D'Arrigo, M., Leonelli, C., Siligardi, C., & Pellacani, G. (2003). Comparison of various solvent media efficiency in the grinding of a frit containing zirconium oxide. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(5), 864-866. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03388.x>
- Angjusheva, B. and Fidancevska, E. (2021). Glass-ceramics produced by vitrification of coal fly ash. *Quality of Life (Banja Luka) - Apeiron*, 21(3). <https://doi.org/10.7251/qol2103085a>
- Barros, V., Liporaci, J., Rosa, A., Junqueira, M., Oliveira, P., Ag, J., ... & Noort, R. (2007). Bone response to three different chemical compositions of fluorcanasite glass-ceramic. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 83A(2), 480-483. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.31219>
- Bernardo, E. and Scarinci, G. (2008). Fast sinter crystallisation of waste glasses. *Advances in Applied Ceramics*, 107(6), 344-349. <https://doi.org/10.1179/174367508x289451>
- Bernardo, E., Andreola, F., Barbieri, L., & Lancellotti, I. (2005). Sintered glass–ceramics and glass–ceramic matrix composites from crt panel glass. *Journal of the American Ceramic Society*, 88(7), 1886-1891. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00380.x>
- Bernardo, E., Castellan, R., Hreglich, S., & Lancellotti, I. (2006). Sintered sanidine glass-ceramics from industrial wastes. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(15), 3335-3341. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.09.110>
- Bernardo, E., Esposito, L., Rambaldi, E., Tucci, A., & Hreglich, S. (2008). Recycle of waste glass into “glass–ceramic stoneware”. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(7), 2156-2162. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02460.x>
- Bernardo, E., Scarinci, G., Edme, E., Michon, U., & Planty, N. (2009). Fast-sintered gehlenite glass–ceramics from plasma-vitrified municipal solid waste incinerator fly ashes. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(2), 528-530. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02892.x>

- Bernardo, E., Varrasso, M., Cadamuro, F., & Hreglich, S. (2006). Vitrification of wastes and preparation of chemically stable sintered glass-ceramic products. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(38-39), 4017-4023. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.07.001>
- Can, M., Helvacı, A., Yazıcı, Z., Akpınar, S., & Özdemir, Y. (2016). Microwave assisted calcination of colemanite powders. *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*, 2(2). <https://doi.org/10.15344/2455-2372/2016/129>
- Catauro, M. and Bollino, F. (2017). Advanced glass-ceramic materials for biomedical applications. *Journal of Bone Reports & Recommendations*, 03(01). <https://doi.org/10.4172/2469-6684.100035>
- Catauro, M., Bollino, F., Renella, R., & Papale, F. (2015). Sol-gel synthesis of SiO_2 - CaO - P_2O_5 glasses: influence of the heat treatment on their bioactivity and biocompatibility. *Ceramics International*, 41(10), 12578-12588. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.06.075>
- Catauro, M., Nunziante, S., Papale, F., & Bollino, F. (2015). Preparation of $0.7\text{SiO}_2 \cdot 0.3\text{CaO}/\text{PCL}$ hybrid layers via sol-gel dip coating for the surface modification of titanium implants: characterization, bioactivity and biocompatibility evaluation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 76(2), 241-250. <https://doi.org/10.1007/s10971-015-3771-8>
- Chen, J., Zhang, Y., Deng, C., Dai, X., & Li, L. (2009). Effect of the Ba/Ti ratio on the microstructures and dielectric properties of barium titanate-based glass-ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(6), 1350-1353. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03028.x>
- Chen, P., Liu, M., Cai, J., Ding, M., & Wu, J. (2017). Cordierite glass-ceramic used for transparent tile glazes. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(10), 4402-4406. <https://doi.org/10.1111/jace.15031>
- Cheng, C., Lanagan, M., Lin, J., Jones, B., & Pan, M. (2005). Crystallization kinetics and dielectric properties of nanocrystalline lead strontium barium niobates. *Journal of Materials Research*, 20(2), 438-446. <https://doi.org/10.1557/jmr.2005.0054>
- Cheng, J., Xiong, D., Li, H., & Wang, H. (2010). Crystallization behaviors of $\text{r}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass-ceramics for use as anodic bonding materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 507(2), 531-534. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.08.011>

- Cormier, L., Delbes, L., & Montouillout, V. (2021). Vitrification, crystallization behavior and structure of zinc aluminosilicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 555, 120609. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120609>
- Cunha, T., Wu, J., Peitl, O., Fokin, V., Zanotto, E., Iannucci, L., ... & Boccaccini, A. (2007). Mechanical properties and impact resistance of a new transparent glass-ceramic. *Advanced Engineering Materials*, 9(3), 191-196. <https://doi.org/10.1002/adem.200600237>
- Dang, W. and He, H. (2019). High strength glass-ceramics sintered with coal gangue as a raw material. *Science of Sintering*, 51(3), 285-294. <https://doi.org/10.2298/sos1903285w>
- Demirel, B. and Taygun, M. (2023). Antibacterial borosilicate glass and glass ceramic materials doped with zno for usage in the pharmaceutical industry. *Acs Omega*, 8(21), 18735-18742. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00720>
- Demirel, M., Pamuk, V., & Dilsiz, N. (2009). Investigation of flame retardancy and physical–mechanical properties of zinc borate/boric acid polyester composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 115(5), 2550-2555. <https://doi.org/10.1002/app.31210>
- Deubener, J. and Höland, W. (2017). Editorial: nucleation and crystallization of glasses and glass-ceramics. *Frontiers in Materials*, 4. <https://doi.org/10.3389/fmats.2017.00014>
- Dittmer, M. and Rüssel, C. (2011). Colorless and high strength mgo/al₂o₃/sio₂ glass–ceramic dental material using zirconia as nucleating agent. *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*, 100B(2), 463-470. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31972>
- Doherty, P., Lee, D., & Davis, R. (1967). Direct observation of the crystallization of li₂o-al₂o₃-sio₂ glasses containing tio₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 50(2), 77-81. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1967.tb15043.x>
- Dong, C., Li, Y., Li, S., Jia, W., Chen, R., Lao, D., ... & Xia, X. (2021). Thermally insulating gdbo₃ ceramics with neutron shielding performance. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 19(3), 1428-1438. <https://doi.org/10.1111/ijac.13984>
- Elsayed, H., Bertolini, R., Biasetto, L., Ožóg, P., Kraxner, J., Galusek, D., ... & Bernardo,

- E. (2022). Novel functional glass–ceramic coatings on titanium substrates from glass powders and reactive silicone binders. *Polymers*, 14(19), 4016. <https://doi.org/10.3390/polym14194016>
- Ercenk, E., Bazalt Esaslı SiC Takviyeli Cam ve Cam-Seramik Kaplamaların Özellikleri, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi 2011.
- Ercenk, E. (2017). MgF₂ katkısının vermikülit esaslı cam-seramiklerin işlenebilirlik özellikleri üzerine etkisi. *Sakarya University Journal of Science*, 21(2), 215-215. <https://doi.org/10.16984/sofenbilder.297008>
- Evcin, A., & Akpınar, S. (2021). Kolemanit katkısının kordiyerit cam-seramiklerin kristalizasyon davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması. *Journal of Boron*, 6(1), 243-251.
- Fayad, A., Marzouk, M., & ElBatal, F. (2019). Bioactivity behavior of ag₂o or cuo doped in glass systems of na₂o–caF₂–p₂o₅ and na₂o–cao–p₂o₅ and their glass–ceramic derivatives assessed by ftir, x-ray diffraction and sem measurements. *Sn Applied Sciences*, 1(3). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0215-z>
- Frost, R., Xi, Y., Scholz, R., Belotti, F., & Filho, M. (2013). Infrared and raman spectroscopic characterization of the borate mineral colemanite – cab₃o₄(oh)₃·h₂o – implications for the molecular structure. *Journal of Molecular Structure*, 1037, 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2012.11.047>
- Fu, L., Engqvist, H., & Xia, W. (2020). Glass–ceramics in dentistry: a review. *Materials*, 13(5), 1049. <https://doi.org/10.3390/ma13051049>
- Fu, Q., Beall, G., Smith, C., Kohli, J., Youngman, R., Wheaton, B., ... & Gulbitten, O. (2016). Strong, tough glass-ceramics for emerging markets. *International Journal of Applied Glass Science*, 7(4), 486-491. <https://doi.org/10.1111/ijag.12247>
- García, A., Villora, J., Moreno, D., Ranninger, C., Callejas, P., & Barba, M. (2003). Heavy metals bioremediation from polluted water by glass-ceramic materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(12), 2200-2202. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03631.x>
- George, S. and Sebastian, M. (2010). Low-temperature sintering and microwave dielectric properties of li₂ati₃o₈ (a=mg, zn) ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8(6), 1400-1407. <https://doi.org/10.1111/j.1744->

7402.2010.02590.x

- Ghosh, S. and Datta, S. (2014). Surface degradation behaviour of mgo-al₂o₃-tio₂-sio₂based glass-ceramics. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 73(3), 216-220. <https://doi.org/10.1080/0371750x.2014.893205>
- Glymond, D., Roberts, A., Russell, M., & Cheeseman, C. (2018). Production of ceramics from coal furnace bottom ash. *Ceramics International*, 44(3), 3009-3014. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.057>
- Gorni, G., Velázquez, J., Mosa, J., Balda, R., Fernández, J., Durán, A., ... & Castro, Y. (2018). Transparent glass-ceramics produced by sol-gel: a suitable alternative for photonic materials. *Materials*, 11(2), 212. <https://doi.org/10.3390/ma11020212>
- Han, L., Li, C., Lin, C., Liu, J., Wu, J., Gui, H., ... & Lu, A. (2019). A novel nd³⁺-doped mgo-al₂o₃-sio₂-based transparent glass-ceramics: toward excellent fluorescence properties. *Journal of the American Ceramic Society*, 102(7), 4213-4225. <https://doi.org/10.1111/jace.16306>
- Hench, L. (1998). Bioceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(7), 1705-1728. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02540.x>
- Hernández, M., Violini, M., Serra, M., Conconi, M., Suárez, G., & Rendtorff, N. (2019). Boric acid (h₃bo₃) as flux agent of clay-based ceramics, b₂o₃ effect in clay thermal behavior and resultant ceramics properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(3), 1717-1729. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08563-4>
- Higo, T., Sukenaga, S., Kanehashi, K., Shibata, H., Osugi, T., Saito, N., ... & Nakashima, K. (2014). Effect of potassium oxide addition on viscosity of calcium aluminosilicate melts at 1673–1873 k. *Isij International*, 54(9), 2039-2044. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2039>
- Hijiya, H., Kishi, T., & Yasumori, A. (2009). Effect of phase separation on crystallization of glasses in the bao-tio₂-sio₂ system. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 117(1361), 120-126. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.117.120>
- Honma, T., Maeda, K., Nakane, S., & Shinozaki, K. (2022). Unique properties and potential of glass-ceramics. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 130(8), 545-551. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.22037>
- Hossain, Shahzad; Hasan, Mohammad Kamrul; Yunus, S.K. Md.; Zakaria, A.K.M.;

- Datta, Tapash Kumar; Azad, Abul Kalam (2015). Synthesis and Investigation of the Structural Properties of Al^{3+} Doped Mg Ferrites. *Applied Mechanics and Materials*, 789-790(), 48–52. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.48
- Höland, W., Rheinberger, V., & Schweiger, M. (2001). Nucleation and crystallization phenomena in glass-ceramics. *Advanced Engineering Materials*, 3(10), 768. [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200110\)3:103.0.co;2-t](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200110)3:103.0.co;2-t)
- Höland, W., Rheinberger, V., Apel, E., & Hoen, C. (2017). Principles and phenomena of bioengineering with glass-ceramics for dental restoration. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3), 1521-1526. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.101>
- Hu, Y. and Mackenzie, J. (1992). Structure-related mechanical properties of ormosils by sol-gel process. *Mrs Proceedings*, 271. <https://doi.org/10.1557/proc-271-681>
- Il, D. (1996). Recent advances in ceramics for dentistry. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 7(2), 134-143. <https://doi.org/10.1177/10454411960070020201>
- Inage, K., Akatsuka, K., Iwasaki, K., Nakanishi, T., Maeda, K., & Yasumori, A. (2020). Effect of crystallinity and microstructure on mechanical properties of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass toughened by precipitation of hexagonal $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ crystals. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 534, 119948. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119948>
- Javed, H., Sabato, A., Dlouhy, I., Halasová, M., Bernardo, E., Salvo, M., ... & Smeacetto, F. (2019). Shear performance at room and high temperatures of glass–ceramic sealants for solid oxide electrolysis cell technology. *Materials*, 12(2), 298. <https://doi.org/10.3390/ma12020298>
- Khalf, A. (2021). Ferroelectric glass-ceramic systems for energy storage applications.. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93855>
- Khedim, H., Nonnet, H., & Méar, F. (2012). Development and characterization of glass-ceramic sealants in the $(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3)$ system for solid oxide electrolyzer cells. *Journal of Power Sources*, 216, 227-236. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.041>
- Kichkailo, O. and Levitskii, I. (2011). Effect of colemanite additions on sintering, properties, and microstructure of spodumene heatproof ceramic. *Glass and*

- Ceramics, 68(1-2), 56-60. <https://doi.org/10.1007/s10717-011-9321-0>
- Klika, Z., Valášková, M., Bartoňová, L., & Maierová, P. (2020). Quantitative evaluation of crystalline and amorphous phases in clay-based cordierite ceramic. *Minerals*, 10(12), 1122.
- Kuban, B. (1991). *Hammadde Atıklarından Cam-Seramik Yapımı*, 7. Cam Problemleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, pp.67-76, İstanbul.
- Kumar, D. and Rajgopalan, R. (1986). Microstructural and dielectric behaviour of glass ceramics in the system pbo-bao-tio₂-b₂o₃-sio₂. *Bulletin of Materials Science*, 8(1), 13-21. <https://doi.org/10.1007/bf02744092>
- Kumar, M.S., Perumal, A.E., Vijayaram, T.R. et al. (2015). Processing and characterization of pure cordierite and zirconia-doped cordierite ceramic composite by precipitation technique. *Bull Mater Sci* 38, 679–688. <https://doi.org/10.1007/s12034-015-0902-3>.
- Kumari, P., Gangwar, R., Sarun, P., & Kumar, D. (2022). Effect of batio₃ addition on the microwave dielectric properties of mgo–al₂o₃–sio₂–tio₂ glass-ceramic. *Materials Chemistry and Physics*, 275, 125276. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125276>
- Lewis, M. H. (1989). *Glasses and Glass-Ceramics*, Chapman and Hall, London.
- Li, C., Zhang, X., Lu, Y., Shan, Y., & Zhou, H. (2023). Effects of nd₂o₃ doping levels on the sintering, microstructures, and dielectric properties of mgo–al₂o₃–sio₂ glass-ceramics. *Physica Status Solidi (A)*, 220(9). <https://doi.org/10.1002/pssa.202300027>
- Li, L., Zhou, X., Liu, Y., Gong, C., Lu, L., Fu, X., ... & Tao, W. (2017). Water absorption and water/fertilizer retention performance of vermiculite modified sulphoaluminate cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 137, 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.061>
- Li, Y., Fu, L., Chen, Y., Tian, H., & Rajulu, A. (2017). Improved thermal stability and flame resistance of flexible polyimide foams by vermiculite reinforcement. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(20). <https://doi.org/10.1002/app.44828>
- Liu, W., Ping, W., & Li, S. (2017). Enhanced energy storage using ba(zr_{0.2}ti_{0.8})o₃–0.15(ba_{0.7}ca_{0.3})tio₃ ceramics with bao–sro–tio₂–al₂o₃–sio₂–baf₂ glass addition. *Energy Technology*, 5(8), 1423-1428.

<https://doi.org/10.1002/ente.201600713>

- Lotti, P., Gatta, G., Comboni, D., Guastella, G., Merlini, M., Guastoni, A., ... & Liermann, H. (2017). High-pressure behavior and p-induced phase transition of $\text{CaB}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (colemanite). *Journal of the American Ceramic Society*, 100(5), 2209-2220. <https://doi.org/10.1111/jace.14730>
- Lu, P., Zheng, Y., Cheng, J., & Guo, D. (2013). Effect of La_2O_3 addition on crystallization and properties of $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass-ceramics. *Ceramics International*, 39(7), 8207-8212. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.04.004>
- Lutpi, H., Mohamad, H., & Abdullah, T. (2020). Investigation of isothermal treatment on the structural, microstructure and physical properties of $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass-ceramic.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-62892/v1>
- Maeda, K. (2023). Indentation-induced ductile behavior of glass–ceramics involving layered aluminosilicates. *Journal of the American Ceramic Society*, 106(12), 7440-7448. <https://doi.org/10.1111/jace.19335>
- Maeda, K. and Yasumori, A. (2016). Toughening of $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass by dmisteinbergite precipitation. *Materials Letters*, 180, 231-234. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.05.123>
- Maeda, K., Hirose, M., & Kobayashi, T. (2015). High performance transparent glass-ceramics for optical components. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 123(1442), 949-954. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.123.949>
- Maleki, M., Majidian, H., Banijamali, S., & Zakeri, M. (2022). Development of cordierite-based glass-ceramics by slip casting through selecting the appropriate sintering conditions. *Synthesis and Sintering*, 2(2), 84-91. <https://doi.org/10.53063/synsint.2022.22116>
- Marghussian, V., Balazadegan, O., & Eftekhari-yekta, B. (2009). Crystallization behaviour, microstructure and mechanical properties of cordierite–mullite glass ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 484(1-2), 902-906. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.080>
- Masai, H., Toda, T., Ueno, T., Takahashi, Y., & Fujiwara, T. (2009). ZnO glass-ceramics: an alternative way to produce semiconductor materials. *Applied Physics Letters*, 94(15). <https://doi.org/10.1063/1.3120282>
- Mehdikhani, B. and Borhani, G. (2013). Crystallization behavior and microstructure of

- bio glass-ceramic system. *International Letters of Chemistry Physics and Astronomy*, 19, 58-68. <https://doi.org/10.56431/p-7o0g70>
- Miao, C., Tang, Y., Hong, Z., Wu, Z., & Wang, X. (2013). Harmful algae blooms removal from fresh water with modified vermiculite. *Environmental Technology*, 35(3), 340-346. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.828091>
- Midha, S., Kim, T., Bergh, W., Lee, P., Jones, J., & Mitchell, C. (2013). Preconditioned 70s30c bioactive glass foams promote osteogenesis in vivo. *Acta Biomaterialia*, 9(11), 9169-9182. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.07.014>
- Miranda, B. (2019). Unmixing of phosphorus-bearing melts on earth and mars.. <https://doi.org/10.53846/goediss-7401>
- Mishra, R., Goswami, M., Dixit, A., & Krishnan, M. (2016). Study on thermophysical properties and phase evolution in nd doped li₂o-al₂o₃-sio₂ glass nucleated by multiple nucleating agents. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 447, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.05.035>
- Morris, A. (2023). Evidence for low-pressure crustal anatexis during the northeast atlantic break-up.. <https://doi.org/10.22541/essoar.170365241.10187842/v1>
- Mullins, M., Luttrull, D., & Schumacher, H. (2011). Boric acid in pcbs: compliance with eu reach regulations. *Circuit World*, 37(4), 16-19. <https://doi.org/10.1108/03056121111180857>
- Nakanishi, T., Watanabe, K., Ueda, J., Fushimi, K., Tanabe, S., & Hasegawa, Y. (2014). Enhanced light storage of sr₂al₂o₄ glass-ceramics controlled by selective europium reduction. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(2), 423-429. <https://doi.org/10.1111/jace.13312>
- Nayebzadeh, Hamed; Naderi, Fereshteh; Rahmanivahid, Behgam (2020). Effect of Doping Al Cations into MgFe₂O₄ Magnetic Structure for Efficient Removals of Methyl Orange Dye from Water. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, (), -. doi:10.1007/s10904-020-01816-y
- Ohsato, H., Kim, J., Kim, A., Cheon, C., & Chae, K. (2011). Millimeter-wave dielectric properties of cordierite/indialite glass ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 50(9S2), 09NF01. <https://doi.org/10.1143/jjap.50.09nf01>
- Omar, A.A., El-Shennawi, A.W.A., and El-Ghannam, A.R. (1991). Thermal Expansion of Glasses and Corresponding Glass-Ceramics, *Journal of Materials Science*, 26,

6049-6056.

- Onen, U., Ercenk, E., & Yilmaz, S. (2017). Development of machinable glass-ceramics produced from vermiculite. *Acta Physica Polonica A*, 131(1), 168-170. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.131.168>
- Othman, F., Banjuraizah, J., Khor, S., Rejab, N., & Alias, S. (2021). Physical and mechanical properties of non-stoichiometric cordierite with treated fgd sludge addition sintered at 1250°C. *Journal of Physics Conference Series*, 2129(1), 012091. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2129/1/012091>
- Özdemir, M. and Kıpçak, İ. (2016) Use of Borax Sludge as an Additive in Wall Tile. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4, 39-45. doi: 10.4236/msce.2016.412005.
- Özdemir, Y., Akpınar, S., Abbak, S., Evcin, A. (2017). Effect of calcined colemanite addition on the rheological behaviour of porcelain suspension. *Acta Physica Polonica A*, 132(3-II), 825-829. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.132.825>
- Öztürk, M., Günay, U., Ercenk, E., & Yilmaz, S. (2017). The effect of impact angle of the particle on solid particle wear properties of basalt base glass-ceramics. *Acta Physica Polonica A*, 131(1), 171-173. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.131.171>
- Paknahad, E. and Grosvenor, A. (2017). Investigation of CeTi_2O_6 - and $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$ -containing glass-ceramic composite materials. *Canadian Journal of Chemistry*, 95(11), 1110-1121. <https://doi.org/10.1139/cjc-2016-0633>
- Palaci, Y. (2020). Effects of boric acid addition and sintering temperature on the thermal conductivity of perlitebased insulation materials. *Materials Testing*, 62(4), 408-412.
- Pan, D., Li, L., Yang, J., Bu, J., Bin, G., Liu, B., ... & Volinsky, A. (2015). Production of glass-ceramics from heavy metal gypsum and pickling sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 3047-3052. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0758-5>
- Patzig, C., Höche, T., Dittmer, M., & Rüssel, C. (2012). Temporal evolution of crystallization in $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$ glass ceramics. *Crystal Growth & Design*, 12(4), 2059-2067. <https://doi.org/10.1021/cg3000334>
- Pavlyukevich, Y., Levitskii, I., & Mazura, N. (2009). Use of colemanite in glass fiber

- production. *Glass and Ceramics*, 66(9-10), 345-349.
<https://doi.org/10.1007/s10717-010-9194-7>
- Pawlik, N., Szpikowska-Sroka, B., Pisarska, J., Goryczka, T., & Pisarski, W. (2019). Reddish-orange luminescence from $\text{BaF}_2:\text{Eu}^{3+}$ fluoride nanocrystals dispersed in sol-gel materials. *Materials*, 12(22), 3735. <https://doi.org/10.3390/ma12223735>
- Rama, M., Eklund, O., Fröjdö, S., Smått, J., Lastusaari, M., & Laiho, T. (2019). Characterization of altered mica from sokli, northern finland. *Clays and Clay Minerals*, 67(5), 428-438. <https://doi.org/10.1007/s42860-019-00041-0>
- Rampf, M., Dittmer, M., Ritzberger, C., & Höland, W. (2016). Controlled parallel crystallization of lithium disilicate and diopside using a combination of internal and surface nucleation. *Frontiers in Materials*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmats.2016.00047>
- Rawlings, R., Wu, J., & Boccaccini, A. (2006). Glass-ceramics: their production from wastes—a review. *Journal of Materials Science*, 41(3), 733-761. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-6554-3>
- Rebouças, L., Souza, M., Raupp-Pereira, F., & Oliveira, A. (2019). Characterization of $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass-ceramics produced from a brazilian spodumene concentrate. *Cerâmica*, 65(375), 366-377. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752699>
- Redaoui, D., Sahnoune, F., & Heraiz, M. (2018). Effect of B_2O_3 on Phase Transformation of Cordierite Synthesized from Algerian Kaolin and MgO . *Acta Physica Polonica, A*, 134(1).
- Riello, P., Canton, P., Comelato, N., Polizzi, S., Verità, M., Fagherazzi, G., ... & Hopfe, S. (2001). Nucleation and crystallization behavior of glass-ceramic materials in the $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system of interest for their transparency properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 288(1-3), 127-139. [https://doi.org/10.1016/s0022-3093\(01\)00518-x](https://doi.org/10.1016/s0022-3093(01)00518-x)
- Ritzberger, C., Apel, E., Höland, W., Peschke, A., & Rheinberger, V. (2010). Properties and clinical application of three types of dental glass-ceramics and ceramics for cad-cam technologies. *Materials*, 3(6), 3700-3713. <https://doi.org/10.3390/ma3063700>
- Ryu, S., Kim, H., & Kim, S. (2009). Characterization of mechanical properties of BaTiO_3 ceramic with different types of sintering aid by nanoindentation. *Journal of the*

- Ceramic Society of Japan, 117(1367), 811-814.
<https://doi.org/10.2109/jcersj2.117.811>
- Sai, Sundar V. S. S. Vepa; Arun M. Umarji (1993). Effect of Substitution of Ca on Thermal Expansion of Cordierite ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$). , 76(7), 1873–1876.
[doi:10.1111/j.1151-2916.1993.tb06664.x](https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb06664.x)
- Sakamoto, A. and Yamamoto, S. (2010). Glass–ceramics: engineering principles and applications. International Journal of Applied Glass Science, 1(3), 237-247.
<https://doi.org/10.1111/j.2041-1294.2010.00027.x>
- Sasany, R., Eyüboğlu, T., & Özcan, M. (2023). Long-term effect of nanosized boric acid powder on optical properties of polymer infiltrated ceramic cad-cam material. Coatings, 13(3), 483. <https://doi.org/10.3390/coatings13030483>
- Schilm, J., Anton, R., Wagner, D., Huettl, J., Kusnezoff, M., Herrmann, M., ... & Lee, C. (2022). Influence of r=y, gd, sm on crystallization and sodium ion conductivity of $\text{Na}_5\text{Si}_4\text{O}_{12}$ phase. Materials, 15(3), 1104. <https://doi.org/10.3390/ma15031104>
- Sevim, F., Demir, F., Bilen, M. et al. (2006). Kinetic analysis of thermal decomposition of boric acid from thermogravimetric data. Korean J. Chem. Eng. 23, 736–740.
<https://doi.org/10.1007/BF02705920>
- Shakhova, V., Vitkalova, I., Torlova, A., Pikalov, E., & Selivanov, O. (2018). Development of composite ceramic material using cullet. Matec Web of Conferences, 193, 03032. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303032>
- Shao, H., Liang, K., Zhou, F., Wang, G., & Fei, P. (2004). Characterization of cordierite-based glass-ceramics produced from fly ash. Journal of Non-Crystalline Solids, 337(2), 157-160. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.04.003>
- Shen, J., Zhou, J., Cui, X., & Li, L. (2007). Synthesis and dielectric properties of $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ glass-ceramics from the sol–gel process. Journal of Electroceramics, 21(1-4), 565-568. <https://doi.org/10.1007/s10832-007-9243-y>
- Singh, S. and Sontakke, A. (2021). Transparent glass ceramics. Crystals, 11(2), 156.
<https://doi.org/10.3390/cryst11020156>
- Souag, R., Kamel, N., Moudir, D., Mouheb, Y., & Aouchiche, F. (2021). Study of the effect of TiO_2 addition on the crystalline phases, structure and chemical durability of a nuclear glass ceramic.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-861278/v1>
- Spitznagel, F., Boldt, J., & Gierthmuehlen, P. (2018). Cad/cam ceramic restorative

- materials for natural teeth. *Journal of Dental Research*, 97(10), 1082-1091.
<https://doi.org/10.1177/0022034518779759>
- Sukenaga, S., Haruki, S., Nomoto, Y., Saito, N., & Nakashima, K. (2011). Density and surface tension of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ (R=Li, Na, K) melts. *Isij International*, 51(8), 1285-1289. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1285>
- Sun, S., Wang, X., Zhou, J., Zhang, S., Ge, K., Yang, H., ... & Xia, L. (2021). Thermal conductive networks constructed by sialon fibers in-situ synthesized in barium aluminosilicate glass-ceramic.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-612370/v1>
- Sun, Y., Yang, Z., Cai, D., ZHANG, Z., Qi, L., Fang, S., ... & JIA, D. (2022). Crystallization kinetics, properties of α -cordierite based glass-ceramics prepared by glass powder sintering. *Journal of Inorganic Materials*, 37(12), 1351. <https://doi.org/10.15541/jim20220179>
- Taurines, T. and Boizot, B. (2012). Microstructure of powellite-rich glass-ceramics: a model system for high level waste immobilization. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(3), 1105-1111. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.05015.x>
- Tihomirovs, P. and Korjajkins, A. (2023). Recycled waste glass usage for construction materials. *Journal of Physics Conference Series*, 2423(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2423/1/012002>
- Valášková, M. (2016). Structural characteristics of cordierites based on commercial vermiculites in relation to the natural and synthetic cordierites. *Ceramics - Silikaty*, 308-316. <https://doi.org/10.13168/cs.2016.0046>
- Varshneya, A.K., Mauro, J.C. (2010) Comment on misconceived ASTM definition of "Glass" by AC wright, *Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A*, 51(1): 28-30.
- Vitkalova, I., Torlova, A., Pikalov, E., & Selivanov, O. (2018). Development of environmentally safe acid-resistant ceramics using heavy metals containing waste. *Matec Web of Conferences*, 193, 03035. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819303035>
- Wang, S. (2010). Effects of Fe on crystallization and properties of a new high infrared radiance glass-ceramics. *Environmental Science & Technology*, 44(12), 4816-4820. <https://doi.org/10.1021/es1003268>

- Wang, S. and Liang, K. (2008). Crystallization behavior and infrared radiation property of nickel–magnesium cordierite based glass–ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(14), 1522-1525. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.08.031>
- Wang, S., Kuang, F., Yan, Q., Chen, G., & Liu, Q. (2011). Crystallization and infrared radiation properties of iron ion doped cordierite glass-ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(6), 2819-2823. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.11.126>
- Wu, J., Ding, C., Xu, X., & Xu, X. (2021). Preparation and characterization of cordierite glass–ceramics for bonding solar thermal transmission pipelines. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 18(5), 1764-1772. <https://doi.org/10.1111/ijac.13732>
- Wu, T., Pu, Y., Zong, T., & Gao, P. (2014). Microstructures and dielectric properties of ba_{0.4}sr_{0.6}tio₃ ceramics with bao–tio₂–sio₂ glass–ceramics addition. *Journal of Alloys and Compounds*, 584, 461-465. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.072>
- Xiong, D., Cheng, J., & Li, H. (2010). Composition and crystallization kinetics of r₂o–al₂o₃–sio₂ glass–ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 498(2), 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.143>
- Xue, B., Wang, W., Guo, L., Zhang, Z., Meng, J., Tao, X., ... & Ye, Q. (2019). Sol-gel preparation of anti-bacterial and bioactive glass-ceramics. *Journal of Biomaterials Applications*, 34(1), 86-93. <https://doi.org/10.1177/0885328219843901>
- Yan, S., Miao, X., Chen, X., & Xing, W. (2021). Effect of cad-cam ceramic materials on the color match of veneer restorations. *Journal of Prosthetic Dentistry*. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.04.029>
- Ye, F., Yang, J., Zhang, L., Zhou, W., Zhou, Y., & Lei, T. (2001). Fracture behavior of sic-whisker-reinforced barium aluminosilicate glass-ceramic matrix composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 84(4), 881-883. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00759.x>
- Yu, J., Li, S., Lv, Y., Zhao, Y., & Pei, Y. (2015). Preparation of silicon nitride–barium aluminum silicate composites by freeze gelation. *Materials Letters*, 147, 128-130. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.124>
- Zaichuk, O., Amelina, A., Kalishenko, Y., & Hordieiev, Y. (2022). Determining patterns

- in the formation of cordierite phase during the synthesis of density-sintered low-temperature ceramics based on glasses of the mgo–al₂o₃–sio₂ system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6 (120)), 51-59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268140>
- Zaidan, S. and Abed, H. (2017). Improvement the chemical resistance of furnaces bricks for petroleum refineries by zro₂-nano- glass-ceramic coated. *Engineering and Technology Journal*, 35(10), 999-1002. <https://doi.org/10.30684/etj.35.10a.6>
- Zeng, L., Sun, H., & Peng, T. (2022). Effect of Borax On Sintering Kinetics, Microstructure and Mechanical Properties of Porous Glass-Ceramics From Coal Fly Ash by Direct Overfiring. *Frontiers in Chemistry*, 10, 839680.
- Zhang, H., He, Z., Zhang, Y., Jing, W., Wang, B., & Yang, J. (2015). Lithium disilicate glass-ceramics by heat treatment of lithium metasilicate glass-ceramics obtained by hot pressing. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(12), 3659-3662. <https://doi.org/10.1111/jace.13950>
- Zhang, P., Chen, Z., & Li, B. (2022). Effect of bao on crystallization, sintering, and properties of mgo-al₂o₃-sio₂ glass–ceramics. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 33(5), 2846-2854. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07487-w>
- Zhang, W. and Gao, H. (2008). Preparation of machinable fluoramphibole glass–ceramics from soda-lime glass and fluormica. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5(4), 412-418. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02214.x>
- Zheng, X., Du, Y., Xiao, J., Zhang, W., & Liang, C. (2008). Effect of sintering temperature on bao–al₂o₃–sio₂glass ceramic coating for carbon fibre reinforced silicon carbide matrix composites. *Materials Science and Technology*, 24(11), 1399-1402. <https://doi.org/10.1179/174328408x323122>