

## Bor Atıklarının Kordiyerit Cam Seramiklerin Camsı Geçiş Sıcaklığı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Süleyman AKPINAR<sup>1</sup>, Hakan ŞAHİN<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Afyonkarahisar.

e-posta: [akpinar@aku.edu.tr](mailto:akpinar@aku.edu.tr), [hakansahin@aku.edu.tr](mailto:hakansahin@aku.edu.tr), ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-1111-2222>

Geliş Tarihi: 27.08.2019; Kabul Tarihi: 10.09.2019

### Öz

Kordiyerit ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ) ve kordiyerit esaslı cam-seramikler, düşük dielektrik sabitleri ve tek kristalli silikonun termal genişleme katsayısına eşdeğer genişleme katsayısı özellikleri nedeniyle düşük pişirim sıcaklıklı altlık malzemeler olarak ilgi çekici malzemelerdir. Kordiyerit esaslı camlar yüksek viskoziteye ve dar sinterleme sıcaklığı aralığına sahip olduklarından, kordiyerit esaslı yoğun cam-seramiklerin 1000 °C'nin altında elde edilmesi zordur. Yoğun cam seramiklerin üretimi için, camın viskozitesini azaltan uygun bir cam kompozisyonunun ve fluxlaştırıcı bir katkının seçimi oldukça önem arz etmektedir. Kordiyerit cam seramiklerin kristalizasyonu ve düşük sıcaklıkta sinterlenmesi üzerine  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  gibi katkılarla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada ise bor atıklarının Kordiyerit cam seramiklerin camsı geçiş sıcaklığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kordiyerit stokiyo-metrisine uygun oranda karıştırılan magnezya, kaolen ve kuvars hammaddelerine % 1, 2 ve 3 oranlarında ilave edilen bor atıkları ile oluşturulan toz karışımları alümina kroze içerisinde 1500 °C'de eritilerek sonrasında ani soğutma ile cam yapı elde edilmiştir. Bor atığı katkılı camlar daha sonra kırma ve öğütme işlemlerinden geçirilerek elde edilen tozlar 800-1000 °C sıcaklık aralığında termal analiz tekniği ile camsı geçiş sıcaklıkları belirlenmiştir.

### Anahtar kelimeler

Kordiyerit esaslı cam seramikler; Camsı geçiş sıcaklığı; Kristallenme Sıcaklığı; Bor atığı.

## Investigation of The Effects of Boron Wastes on The Glass Transition Temperature of Cordierite Glass Ceramics

### Abstract

Cordierite ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ) and cordierite-based glass-ceramics are attractive materials for preparing low firing temperature substrates due to their low dielectric constant and their matching thermal expansion coefficient of single crystal silicon. It is difficult to obtain dense glass-ceramics below 1000 °C because the cordierite based glasses have high viscosity and narrow sintering temperature range. In order to fabricate dense glass-ceramics, it may be a critical factor to select adequate glass composition and flux, which reduces glass viscosity. Several studies that include  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{B}_2\text{O}_3$  additions have been conducted on the crystallization and low-temperature sintering behaviour of cordierite glass-ceramics. In this study, the effects of boron wastes on the glass transition temperature of cordierite glass-ceramics were investigated. Powder mixtures formed by adding 1, 2 and 3 wt.% boron wastes to raw material mixtures (magnesia, kaolin, and quartz) which were designed in accordance with cordierite stoichiometry were melted in alumina crucibles at 1500 °C in an electric furnace and then glass structures were obtained by quenching of melts into in cold distilled water. Boron wastes-doped glasses were then passed through crushing and milling processes and the obtained glass powders were characterized by thermal analysis technique in the temperature range of 800-1000 °C.

### Keywords

Cordierite Based Glass Ceramics; Glass Transition Temperature; crystallization temperature; Boron Waste

## GİRİŞ

Cam seramikler, uygun bir bileşimdeki camın kontrollü ısı işlemiyle oluşturulan polikristalli katılardır. Isıl işlem, amorf camdan bir veya daha fazla kristal fazın çekirdeklenmesine ve büyümesine neden olur. Cam seramiklerin geleneksel polikristal seramiklere göre bazı önemli avantajları vardır. Ana malzemenin bir cam olması ve bu nedenle yoğun olması nedeniyle sıfır gözeneklilik elde edilebilir. Cam seramikler ayrıca ana camın özelliklerinden daha iyi özelliklere de sahip olabilirler ve mekanik dayanım, kimyasal dayanıklılık ve termal şok direnci gibi bazı geleneksel seramiklerin özelliklerinden bile daha iyi olabilirler (McMillan 1964).

Cam-seramiklerin eldesinde öncelikle homojen bir cam harmanının hazırlanmasını gereklidir. Mikrokristal fazların gelişmesi için, yüksek sıcaklıkta kristal büyüme aşaması öncesi bir çekirdeklenme aşaması olmalıdır. Bu aşama, iyi mekanik mukavemet için istenen ince taneli kristallerin homojen bir dağılımını sağlamak için dikkatli bir kontrol gerektirir. Çekirdeklenme, ana camın, kontrollü bir oranda, gerekli sayıda çekirdek oluşana kadar tutulduğu önceden belirlenmiş bir çekirdeklenme sıcaklığına ısıtılmasıyla gerçekleştirilir (McMillan 1964 and Dimech 2009).

Yeterli çekirdeklenme bölgeleri sağlamak için katkı maddeleri gerekebilir. Bunlar çekirdekleştirici ajanlar olarak bilinir. Bu gibi ajanların örnekleri,  $TiO_2$  ve  $P_2O_5$ 'tir. Çekirdekleştirici ajanlar cam içinde çözünür, ancak soğuduktan veya tekrar ısıtıldıktan sonra kristal büyümesinin meydana gelebileceği çekirdeklenme bölgeleri olarak çöktürülebilir ve hareket edebilir (McMillan 1964). Çekirdeklenmenin ardından sıcaklık, kristal fazların optimal büyümesini sağlamak için

arttırılır ve istenen kristallik derecesine ulaşıncaya kadar o sıcaklıkta tutulur. Çekirdeklenme ve kristalleşme için ısıtma programları cam bileşimlerine göre değişir ve aşamalar çekirdek ve kristal büyümesini kontrol etmenin yanı sıra işlem zamanlarını ve maliyetlerini iyileştirmek için değiştirilebilir (Dimech 2009).

Cam-seramiklerin ısıl genleşmesi, dayanıklılığı ve diğer özellikleri, kristallerin türü ve boyutu değiştirilerek, taneler arasında bağlanma, kristal yönü ve kristallik derecesi veya yüzdesi ile kontrol edilebilir. Bu özellikler, ana cam bileşimindeki değişiklikler, çekirdekendirme maddesi seçimi ve ısıl işlem programı ile belirlenebilir (McColm 1987).

Cam seramikler bazı üstün fiziksel, mekanik, kimyasal, termal ve dielektrik özelliklerin yanı sıra, onları mükemmel mühendislik malzemeleri yapan kontrol edilebilir mikro yapılara sahiptir (Holand and Beall 2002).

Cam seramikler fırın altlıkları, sofa takımı, elektrik yalıtkanları, inşaat malzemeleri ve protez malzemeleri gibi uygulamalar için cam şekillendirme teknikleri kullanılarak seri üretilebilmektedir (Vogel 1994 and Shelby 2005). Cam seramikler aynı zamanda yüksek teknik uygulamalar için de kullanılır. Örneğin, uçak ve füzeler için olan radomlar, yoğun atmosferlerde yüksek hızlı uçuş için ısıl şok direnci ve mekanik dayanım gereksinimini karşılayabildiklerinden cam seramikten imal edilmiştir. Dielektrik özellikler, radar sinyallerinin bozulmasını önlemek için de önemlidir (McMillan 1964). Teknik seramik içeren camın nötron emici özelliklerini yüksek refrakterlik ve seramik camların cam-seramik haline dönüştürülerek seramiklerin ısıl genleşmeleri ile birleştirmek için nükleer reaktör çubuklarında cam seramikler kullanılmıştır (McMillan 1964).

Kordiyerit ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ) ve kordiyerit esaslı cam-seramikler, düşük termal genleşme, düşük dielektrik sabiti ve iyi bir izolasyon direncine sahiptirler. Bu tür cam-seramikler radar uygulamalardan elektronik altlığa kadar birçok alanda kullanılırlar (Orbay 2007 ve Chen 2007).

Kordiyerit esaslı camlar yüksek viskoziteye ve dar sinterleme sıcaklığı aralığına sahip olduklarından, kordiyerit esaslı yoğun cam-seramiklerin  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altında elde edilmesi zordur. Yoğun cam seramiklerin üretimi için, camın viskozitesini azaltan uygun bir cam kompozisyonunun ve fluxlaştırıcı bir katkının ve de çekirdeklenme ajanının seçimi oldukça önem arz etmektedir (Chen 2007).

$\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (MAS) sisteminde, kordiyerit esaslı cam-seramiklerde  $\text{ZrO}_2$  Dittmer (2011),  $\text{TiO}_2$  Zdaniewski (1973),  $\text{CeO}_2$  Kim and Lee (1994),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  Singh et al. (2007),  $\text{CaO}$  Chen (2007),  $\text{ZnO}$  Chen and Liu (2007),  $\text{P}_2\text{O}_5$  Katzschmann and Wange (1995) ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  gibi katkılar çekirdeklenme katalisti olarak etkileri araştırılmıştır (Winter 1997).

Opera ve arkadaşları (1999) kaolinit, kalsine alümina ve talktan hazırlanan karışımlara  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$  gibi bazı çekirdekleştirici ajanları ilave ederek kordiyerit camı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Söz konusu çekirdekleştirici ajanların kordiyerit camın ısı genleşme katsayısı ( $\alpha$ ) değerlerini düşürdüğünü tespit etmişlerdir (Opera et al.1999).

Meryem Sarıgüzel ve Esin Günay çalışmalarında  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  kaynağı olarak sırasıyla kaolin, talk, alumina ve borik asit gibi doğal malzemelerin eritilmesi ve % 3'e kadar  $\text{B}_2\text{O}_3$  ilavesi ile  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  sistemindeki kordiyerit kompozisyonlarının cam oluşturma davranışı incelemiştir. Çalışma sonuçlarında  $\text{B}_2\text{O}_3$  ilavesinin cam geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) değerlerini arttırdığı ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  miktarının artışı ile termal genleşme

katsayısının azaldığı tespit edilmiştir (Sarıgüzel ve Günay 2010).

Bor oksit saf halde doğada bulunmayan bir oksit olup doğal kaynaklardan saf halde üretilmesi için uzun süreçler gerektiren bir oksittir. Üretiminde tinkal, kolemanit, üleksit gibi hammaddeler kullanılırken, saf halde bor oksit ve bileşiklerinin üretiminde önemli miktarlarda atık ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ise literatür çalışmalarından farklı olarak bor oksit ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) kaynağı olarak bor atıklarının kordiyerit cam seramiklerin eldesinde ve camsi geçiş sıcaklığı ile kristalizasyon sıcaklıkları üzerine etkileri araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kullanılan Hammaddeler

Bu çalışmada kordiyerit esaslı cam seramik eldesi için seramik fabrikalarından temin edilen Kaolen ve Kuvars ile Konya-Krom Manyezit işletmesinden temin edilen Sinter Magnezya hammaddesi kullanılmıştır. Katkı maddesi olarak ise Eti Maden İşletmelerinden temin edilen Kırka Bor atığı kullanılmıştır.

### 2.2. Reçete Oluşturma

Kordiyerit cam seramik üretiminde kullanılan hammaddelerin karışım oranı kordiyerit stokiometrisine ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ) uygun olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sadece  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{SiO}_2$  dikkate alınmıştır. Magnezya, kaolen ve kuvars içeren üçlü karışımlar, hem teorik kordiyerit bileşimindeki oksit oranlarına ve hem de hammaddelerin kimyasal bileşimine (Çizelge 1'de görüldüğü gibi) bağlı olarak hazırlanmıştır. Teorik hesaplama ile ilgili olarak, karışımdaki  $\text{MgO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$  ağırlık oranı 13.7:34.9:51.4 olarak belirlenmiştir. Başlangıç hammaddeleri olarak, karışımların hazırlanmasında ağırlıkça % 82.71 Kaolen, % 12.42 Magnezya ve % 4.87 Kuvars hammaddeleri kullanılmıştır.

### 2.3. Cam Seramik Eldesi

Bor atıklarının kordiyerit cam seramiklerin camsı geçiş sıcaklığı üzerindeki etkilerini araştırmak için kordiyerit stokiometrisine uygun oranda karıştırılan magnezya, kaolen ve kuvars hammaddelerine % 1, 2 ve 3 oranlarında ilave edilen bor atıkları ile oluşturulan toz karışımları alümina kroze içerisinde 1550 °C'de ergitilerek sonrasında ani soğutma ile cam yapı elde edilmiştir. Şekil 1' de elde edilen cam yapı görülmektedir.



Şekil 1. Hazırlanan toz karışımlarının alümina kroze içerisinde 1550 °C'de ergitilerek sonrasında ani soğutma ile elde edilen cam yapının görüntüsü.

### 2.4. Karakterizasyon

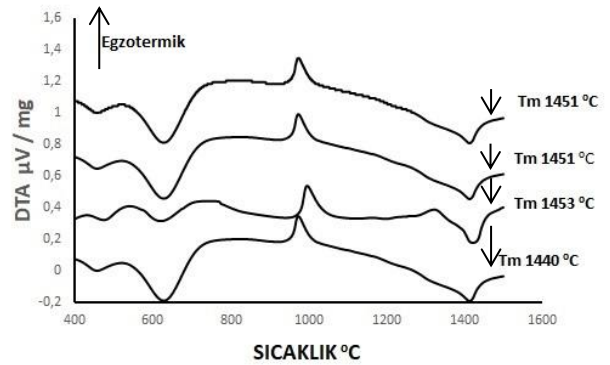
Bor atığı katkılı hammadde karışımlarının Netzsch marka Simultane Termal Analiz cihazı ile dakikada 30 °C ısıtma hızı ile normal atmosfer koşullarında DTA/TG analizleri yapılmıştır. Ergitilerek oda sıcaklığına soğutulmuş bor atığı katkılı camlar kırma ve öğütme işlemlerinden geçirilerek elde edilen tozlar Netzsch marka Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı ile 20 °C ısıtma hızı ile normal atmosfer koşullarında 1350 °C'ye kadar ısıtma ile camsı geçiş sıcaklıkları belirlenmiştir.

Camsı geçiş sıcaklıkları ve kristalizasyon sıcaklıkları belirlenen numunelere kristallenme sonrasında kordiyerit yapısına sahip olup olmadıklarını belirleyebilmek için X-ışınları kırınımı analizleri yapılmıştır. Analizler Bruker marka D8 Advance model cihazda 2θ tarama açısı 5-70° arasında, Cu Kα=1,54Å° dalga boyuna sahip X-ışını kullanarak ve 0,02 derece/dakika tarama hızı şartlarında yapılmıştır.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Diferansiyel Termal Analizi Sonuçları (DTA)

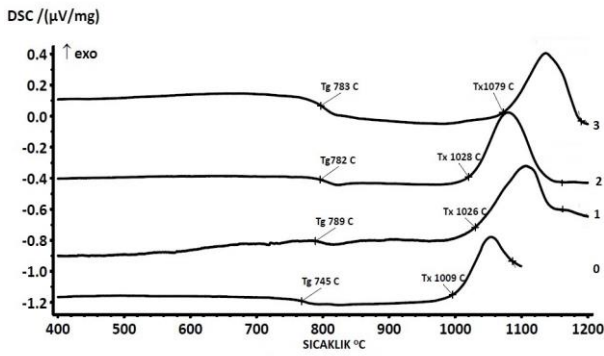
Şekil 2'de kordiyerit stokiometrisine uygun olarak oluşturulan ve bor atığı katkıları ile katkılanarak hazırlanan karışımların DTA grafikleri verilmiştir. Şekil 2'de görüleceği üzere kordiyerit stokiometrisine göre hazırlanan karışıma bor atığı ilavesi yapıldığında, karışımın ergime sıcaklığı yaklaşık 1440 °C'den 1453 °C'ye yükselmiştir. Ergime işleminden hemen sonra da yapılan hızlı soğutma ile Şekil 1'de görülen cam yapıda farklı oranlarda bor atığı katkılı kordiyerit numuneleri elde edilmiştir.



Şekil 2. Bor atığı katkılı toz karışımların Diferansiyel Termal Analiz (DTA) grafikleri. 0; katkısız, 1; %1 bor atığı katkılı, 2; %2 bor atığı katkılı, 3; %3 bor atığı katkılı numuneler.

### 3.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi Sonuçları (DSC)

Ergitme ve hızlı soğutma işlemi sonucunda cam olarak elde edilen kordiyerit numunelerinin cam geçiş sıcaklıklarını belirleyebilmek için yapılan DSC analizi sonuçları Şekil 3'de verilmiştir. Şekilde görüleceği gibi bor atığı katkısı ile numunelerin cam geçiş sıcaklıklarının arttığı belirlenmiştir. Katkısız kordiyerit numunesinin cam geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>) 745 °C olarak ölçülmüş iken bor atığı katkılı numunelerin T<sub>g</sub> sıcaklıkları sırası ile 789 °C (%1 katkılı), 782 °C (% 2 katkılı) ve 783 °C (% 3 katkılı) olarak belirlenmiştir. Çizelge 1'de numunelerin ölçülen cam geçiş sıcaklıkları (T<sub>g</sub>) ve kristalizasyon sıcaklıkları (T<sub>x</sub>) ayrıntılı olarak verilmiştir.



**Şekil 3.** Bor atığı katkılı cam örneklerinin DSC grafikleri. 0;katkısız, 1; %1 bor atığı katkılı, 2; %2 bor atığı katkılı, 3; %3 bor atığı katkılı numuneler.

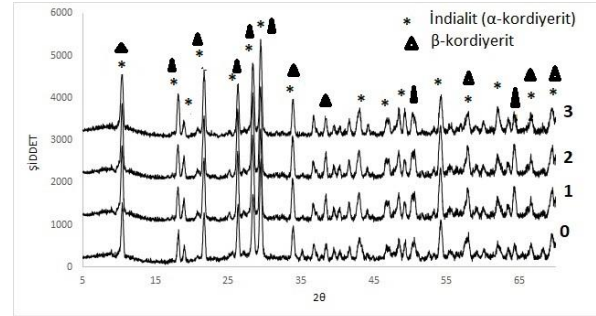
**Çizelge 1.** Bor atığı katkılı cam örneklerinin T<sub>g</sub> ve T<sub>x</sub> sıcaklıkları.

Numune Adı	Cam geçiş sıcaklığı (T <sub>g</sub> )	Kristalizasyon sıcaklığı (T <sub>x</sub> )
KATKISIZ	745 °C	1009 °C
%1 KATKILI	789 °C	1026 °C
%2 KATKILI	782 °C	1028 °C
%3 KATKILI	783 °C	1079 °C

Hazırlanan numunelerin kristalizasyon sıcaklıklarına bakıldığında bor atığı katkısı arttıkça kristalizasyon sıcaklıklarının da arttığı belirlenmiştir. Çizelge 1' de görüleceği gibi katkısız olan numunenin kristalizasyon sıcaklığı 1009 °C den 1079 °C sıcaklığa çıkmıştır.

### 3.3. X-ışınları Kırınımı (XRD) Analizi Sonuçları

Cam seramik yapısında elde edilen numunelerin DSC analizleri ile cam geçiş sıcaklıkları ve kristalizasyon sıcaklıkları belirlendikten sonra numunelerin faz yapısının belirlenmesi için X-ışınları kırınımı analizleri yapılmıştır.



**Şekil 4.** Bor atığı katkılı cam seramiklerin X-ışınları kırınımı (XRD) analiz sonuçları. 0;katkısız, 1; %1 bor atığı katkılı, 2; %2 bor atığı katkılı, 3; %3 bor atığı katkılı numuneler.

X-ışınları kırınımı analizlerine göre faz analizi değerlendirmesi yapıldığında DSC analizi sonucunda kristallenen numunelerin tamamının indialit (α-kordiyerit) ve β-kordiyerit yapılarında olduğu tespit edilmiştir. Analizler sonucunda anlaşılmıştır ki üretimi hedeflenen kordiyerit cam seramik numuneleri elde edilebilmiş ve DSC analizi sonucunda görülen kristalizasyon pikinin X-ışınları kırınım analizi sonuçlarına göre cam yapıdan çökelen kordiyerit fazları olduğu belirlenmiştir.

## SONUÇLAR

Bu çalışma sonucunda bor atığı katkılarının kordiyerit cam seramiğin camsı geçiş sıcaklığı üzerinde yaklaşık 40 °C'lik ve kristalizasyon sıcaklığı üzerinde de yaklaşık 20-70 °C'lik bir artışa neden olduğu ancak faz yapısı üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak bor atıklarının kordiyerit cam seramik üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

## KAYNAKLAR

Chen G., 2007. Effect of ZnO addition on properties of cordierite-based glass-ceramics. *Journal of Materials Science: Mater Electron*, **18**, 1253–1257.

Dimech, C.J., 2009. The Production of Novel Glass-Ceramics From Problematic UK Wastes Using Borates. PhD Thesis, Imperial College London Department of Materials, London, 198.

Dittmer M., Yamamoto C.F., Bocker C., Russel C. 2011. Crystallization and mechanical properties of MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> glass-ceramics with and without the addition of yttria. *Solid State Sciences*, **13**, 2146–2153.

Gawronski A., Patzig C., Höche T., Rüssel C., 2015. Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CeO<sub>2</sub> on the crystallisation behaviour and mechanical properties of glass–ceramics in the system MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>, *Journal of Materials Science*, **50**, 1986–1995.

Guo-Hua, C., 2007. Effect of replacement of MgO by CaO on sintering, crystallization and properties of MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system glass-ceramics. *Journal of Materials Science*, **42**, 7239–7244.

Guo-Hua, C. and Xin-Yu L., 2007. Sintering, crystallization and properties of MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system glass-ceramics containing ZnO. *Journal of Alloys and Compounds*, **431**, 282–286.

Holand, W. and Beall, G.H., 2002. Glass-Ceramic Technology, The American Ceramic Society, USA, 57-72.

Katzschmann A. and Wange P., 1995. Processability, crystallization and mechanical strength of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-modified glasses and glass-ceramics in the system MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>. *Glastech BerGlass*, **68**, 111–116.

Kim B.H. and Lee K.H., 1994. Crystallization and sinterability of cordierite-based glass powders containing CeO<sub>2</sub>. *Journal of Materials Science* **29**, 6592–6598.

McMillan, P.W., 1964. Glass-Ceramics, London and New York: Academic Press Inc.

McColm, I.J., 1987. Ceramic Science for Materials Technologists, Thomson Science and Professional, 204-234

Orbay, B., 2007. Potasyum Mikası ve Kordiyerit İçeren İşlenebilir Cam Seramiklere Çekirdeklenme Katalisti (TiO<sub>2</sub>) İlavesinin Kristalizasyon Davranışı ve Elektriksel Özellikler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 66.

Opera, C., Stan, C., Rotiu E. and Propescu, C., 1999. Non-isothermal crystallization of cordierite glasses. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **56**, 611-615.

- Sarıgüzel, M. ve Günay, E., 2010. Glass formation and properties of cordierite compositions from talc-based natural raw materials with boron oxide addition, *Anadolu University Journal Of Science And Technology –A Applied Sciences And Engineering*, **11**, 115-124.
- Shelby, J.E., 2005. Introduction to Glass Science and Technology, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 249-260.
- Singh K., Gupta N. and Pandey O.P. 2007. Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the crystallization behavior of SiO<sub>2</sub>-MgO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses. *Journal of Materials Science*, **42**, 6426–6432.
- Vogel, V., 1994. Glass Chemistry, Springer-Verlag, 102-127.
- Winter, W., 1997. Sintering and crystallization of volume- and surface-modified cordierite glass powders. *Journal of Materials Science*, **32**, 1649–1655.
- Zdaniewski, W., 1973. Crystallization and structure of a MgOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> glass-ceramic. *Journal of Materials Science*, **8**, 192–202.