

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KROM OKSİT (Cr_2O_3) KATKILI BOROSİLİKAT CAMLARIN ÜRETİMİ
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Kaan DOĞRU

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2018**

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KROM OKSİT (Cr_2O_3) KATKILI BOROSİLİKAT CAMLARIN ÜRETİMİ
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Kaan DOĞRU

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2018**

Doç. Dr. Bülent AKTAŞ'ın danışmanlığında, Kaan DOĞRU'nun hazırladığı **“Krom Oksit (Cr₂O₃) Katkılı Borosilikat Camların Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”** konulu bu çalışma 16/03/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Bülent AKTAŞ

Üye : Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Üye : Dr. Öğr. Ü. Mustafa ÖZEN

Bu Tezin Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. Halil Murat ALGIN
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 17044

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	8
2.1. Camın Tanımı	8
2.2. Camın Yapısı	9
2.3. Camların Üretilmesi	12
2.4. Camın Yapısını Oluşturan Ana Maddeler	14
2.5. Camın Yapısını Oluşturan Yardımcı Maddeler	16
2.6. Cam Türleri	17
2.6.1. Soda kalsik camı	17
2.6.2. Kurşun camı	17
2.6.3. Alüminosilikat camı	18
2.6.4. Silisyum camı	18
2.6.5. Borosilikat cam	18
2.6.5.1. Borik oksit	22
2.6.5.2. Silika	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM	26
3.1. Camların Sentezi	26
3.2. Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi	33
3.3. Numunelerin XRD Analizi	34
3.4. Numunelerin Elastik Özellikleri	34
3.5. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	37
3.6. Numunelerin Köprülü Oksijen Sayılarının Belirlenmesi	39
3.7. Numunelerin Atomik Paketleme Yoğunluğunun Hesaplanması	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	43
4.1. XRD Analiz Sonuçları	43
4.2. Yoğunluk Sonuçları	45
4.3. Elastik Özellikler	47
4.4. Sertlik, Kırılma Tokluğu ve Gevreklik Sonuçları	50
4.5. Köprülü Oksijen Sayısı ve Atomik Paketleme Yoğunluğu Sonuçları	54
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	61
5.1. Sonuçlar	61
5.2. Öneriler	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KROM OKSİT (Cr_2O_3) KATKILI BOROSİLİKAT CAMLARIN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Kaan DOĞRU

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent AKTAŞ
Yıl: 2018, Sayfa:68

Bu çalışmanın amacı, bir geçiş metali olan krom oksit (Cr_2O_3) tozlarını farklı oranlarda (ağırlıkça % 0–5) borosilikat (BS) cam tozuna ilave ederek, radyasyon zırlaması amacıyla kullanılabilecek fiziksel ve mekanik özellikleri yüksek camlar üretmektir. Bu amaç için, BS cam tozu içerisine ağırlıkça % 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2 ve 5 oranlarında Cr_2O_3 ilave edildi ve presleme ile pellet şeklinde örnekler üretildi ve ardından örnekler 1330 °C’de 10 saat süreyle fırında bir grafit kalıp içerisinde ergitme ve sentezleme işlemleri yapıldı. Üretilen cam örneklerin XRD analizleri yapılmış, Arşimed prensibiyle yoğunlukları ölçülmüş, tahribatsız ultrasonik ölçüm yöntemi ile elastisite modülü, poisson oranı, kesme modülü, hacim modülü gibi elastik özellikleri belirlenmiş ve Mikro-Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak sertlik, gevreklik indeksi ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda, BS cam örneklerin yoğunluk, sertlik, elastisite modülü, kesme modülü ve hacim modülü değerlerinin Cr_2O_3 miktarının artışı ile birlikte doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Örneklerin kırılma tokluğu ağırlıkça % 0.5 Cr_2O_3 katkı oranına kadar artmış ve bu orandan daha yüksek miktarlarda ise bir miktar azalma meydana gelmiştir. Kırılma tokluğunda sadece % 5 Cr_2O_3 katkı oranında, katkısız BS camdan daha düşük değer elde edilmiştir. Bununla birlikte, % 0.25–2 aralığında Cr_2O_3 içeren örneklerde ise kırılma tokluğu, katkısız BS camından daha yüksek kırılma tokluk değerleri elde edilmiştir. % 5 Cr_2O_3 katkılı BS örnekteki bu kırılma tokluğundaki azalmanın nedeni kristalleşmeyi destekleyen Cr_2O_3 miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Poisson oranı ve katkı miktarları arasında ise net bir ilişki olmadığı bulunmuştur. Katkısız ve Cr_2O_3 katkılı BS cam örneklerin amorf camsı yapıları XRD analizi ile kontrol edilmiş, % 0–1 Cr_2O_3 katkı aralığında tamamen amorf yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, XRD analizi sonuçları % 2 ve 5 oranında Cr_2O_3 katkılı BS örneklerinde bazı kristal fazların oluştuğunu gösterdi. Elde edilen sonuçlar, Cr_2O_3 katkılı BS camların, mekanik, fiziksel ve elastik özellik bakımından çok iyi özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla bu camların radyasyon zırlamasında kullanılabilmesi için mekanik ve fiziksel yönden herhangi bir engelin bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Borosilikat cam, Krom oksit (Cr_2O_3), Sertlik, Kırılma tokluğu, Elastik özellikler

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES and MANUFACTURE OF BOROSILICATE GLASSES DOPED-CHROMIUM OXIDE (Cr₂O₃)

Kaan DOĞRU

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Year:2018, Page:68**

The aim of present study is to produce glasses with high physical and mechanical properties, which can be used for radiation shielding by adding a transition metal chromium oxide (Cr₂O₃) powders in different contents (0–5 wt%) to borosilicate (BS) glass powder. For this purpose, Cr₂O₃ was added to BS glass powder at 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, and 5 wt% amounts, and pressed to form the samples into pellets. Subsequently, the pelletized samples were melted, and synthesized in a graphite mold in a furnace at 1330 ° C for 10 h. XRD analyses of the produced glasses was carried out, densities of their was measured with Archimedes' principle. The elastic properties such as elasticity modulus, poisson ratio, shear modulus, and volume modulus were determined by non-destructive ultrasonic measurement method, and mechanical properties such as hardness, brittleness index and fracture toughness were measured using the Micro-Vickers hardness measurement method. As a result of the measurements, it was determined that the values of density, hardness, elasticity modulus, shear modulus and volume modulus of the glass samples were increased in direct proportion with increasing Cr₂O₃ amounts. The fracture toughness of the samples increased by up to wt 0.5 wt% Cr₂O₃ content, and slightly decreased in higher amounts (>0.5 %). The fracture toughness of the 5 wt% Cr₂O₃-doped BS glass was only lower than that of the pure BS glass. However, fracture toughness in samples with containing 0.25–2 wt% Cr₂O₃ had a higher fracture toughness than the pure BS glass. It is believed that the reduction in fracture toughness of 5 wt% Cr₂O₃-doped BS glass is due to the increase in the amount of Cr₂O₃ that promotes crystallization. It was found that there was no clear relationship between Poisson's ratio and dopant amounts. The amorphous structures of the produced samples were controlled by XRD analysis, and completely amorphous glassy structure was observed in the content of 0–1 wt% Cr₂O₃. However, it showed that some crystal phases formed in 2, and 5 wt% Cr₂O₃-doped BS samples. The obtained results indicate that the Cr₂O₃-doped BS glass samples have good mechanical properties. Thus, it has proved that there is no a mechanically obstacle to use these glasses as a radiation shielding material.

KEYWORDS: Borosilicate glass (BS), Chromium Oxide (Cr₂O₃), Hardness, Fracture toughness, Elastic properties

TEŞEKKÜR

Projeyi yöneten ve bu çalışmanın her aşamasında özverili yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Bülent AKTAŞ'a ve çalışmaların araştırma ve uygulama aşamalarına katkı sağlayan değerli hocam Mehmet ALBAŞKARA'ya teşekkür ederim.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Maddenin sıcaklık-hacim değişimi	10
Şekil 2.2. Silika içeren camların viskozite-sıcaklık grafiği (Shand, 1968).....	14
Şekil 2.3. SiO ₂ 'nin kristal (a) ve amorf (b) yapısı	15
Şekil 2.4. Borosilikat camdan üretilen mutfak malzemeleri.....	21
Şekil 2.5. Borik oksit yapısı	23
Şekil 2.6. Bor'un bazı kimyasal davranışları.....	23
Şekil 3.1. Öğütme işleminde kullanılan agat havan	26
Şekil 3.2. Cam tozlarının hassas terazide tartılması	27
Şekil 3.3. Toz karıştırıcı (atritör).....	28
Şekil 3.4. Tozların konulduğu metal kalıp ve manuel hidrolik pres.....	28
Şekil 3.5. Şekillendirilerek pellet haline getirilen Cr ₂ O ₃ katkılı cam tozu	29
Şekil 3.6. Ergitmede kullanılan yüksek sıcaklık kül fırınının iç görünümü	30
Şekil 3.7. Fırından çıkarılan kor halinde cam numunesi	30
Şekil 3.8. Sıcak şekillendirme aparatı	31
Şekil 3.9. Şekillendirme işlemi sonrası cam numunelerin görünümü	32
Şekil 3.10. Yüzey zımparalama ve parlatma cihazı.....	33
Şekil 3.11. Ultrasonik ses hızı testinin şematik diyagramı.....	35
Şekil 3.12. Ultrasonik ses hızı test cihazı (Osiloskop)	35
Şekil 3.13. Vickers sertlik cihazından alınan sertlik izi ve iz kenarlarındaki çatlaklar	39
Şekil 3.14. İki boyutlu ağ oluşturucu ve modifikatörü bulunan tetrahedral yapı	41
Şekil 4.1. Katkısız ve Cr ₂ O ₃ katkılı BS numunelerin XRD desenleri	44
Şekil 4.2. % 2 ve 5 Cr ₂ O ₃ katkılı BS numunelerin XRD deseni	45
Şekil 4.3. Katkı oranlarına göre yoğunluk-molar hacim ilişkisi.....	46
Şekil 4.4. Katkı oranlarına göre poisson oranı değişim grafiği	49
Şekil 4.5. Katkı oranlarına göre elastisite modülündeki değişim	50
Şekil 4.6. Cam numunelerin 10 N yük altındaki Vickers çentik izleri ve oluşan çatlakların resimleri; (a) katkısız, (b) % 0.25 Cr ₂ O ₃ , (c) % 0.5 Cr ₂ O ₃ , (d) % 0.75 Cr ₂ O ₃ , (e) % 1 Cr ₂ O ₃ , (f) % 2 Cr ₂ O ₃ , (g) % 5 Cr ₂ O ₃ katkılı BS cam örnekler.....	52
Şekil 4.7. Katkısız ve Cr ₂ O ₃ katkılı BS Numunelerin sertlik ve kırılma toklukları.....	54
Şekil 4.8. Cr ₂ O ₃ katkılı BS cam numunelerin köprülü oksijen sayısına göre atomik paketleme yoğunluğunun değişimi	56
Şekil 4.9. Cr ₂ O ₃ katkılı numunelerin köprülü oksijen sayıları ile yoğunluk ve atomik paketlenme yoğunluğu arasındaki ilişki	57
Şekil 4.10. Cr ₂ O ₃ katkılı BS cam numunelerin elastisite modülünün köprülü oksijen sayısına göre değişimleri	58
Şekil 4.11. Cr ₂ O ₃ katkılı BS cam numunelerin kesme modülünün köprülü oksijen sayısına göre değişimleri	59
Şekil 4.12. Cr ₂ O ₃ katkılı BS cam numunelerin hacim modülünün köprülü oksijen sayısına göre değişimleri	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Temel cam türlerinin bileşenleri, oranları ve ergime sıcaklıkları (Anonim, 2013)	12
Çizelge 2.2. Çeşitli Cam Kompozisyonları (URL-6, 2017)	13
Çizelge 2.3. Bazı malzemelerin karakteristik fiziksel özellikleri (URL-6, 2017)	20
Çizelge 3.1. Cam örneklerin Kompozisyonu	27
Çizelge 4.1. Cr_2O_3 katkılı BS numunelerin kompozisyonları	43
Çizelge 4.2. Krom Oksit katkılı borosilikat camların yoğunluk ve molar hacimleri.....	46
Çizelge 4.3. Numunelerin katkı oranlarına göre ultrasonik ses hızları.....	47
Çizelge 4.4. Numunelerin elastik özellikleri	48
Çizelge 4.5. Numunelerin sertlik, kırılma tokluğu ve gevreklik değerleri	51
Çizelge 4.6. Katkı oranına göre köprülü oksijen sayıları (KOS) değerleri.....	55
Çizelge 4.7. Katkı oranına göre örneklerin atomik paketlenme yoğunlukları.....	55

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Å	Angstrom
M _a	Atom ağırlığı
C _g	Atomik Paketleme Yoğunluğu
V _L	Boyuna ultrasonik ses dalga hızı
T _g	Camsı geçiş sıcaklığı
DTA	Diferansiyel termal analiz
E	Elastisite Modülü
EDX	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
V _T	Enine ultrasonik ses dalga hızı
T _e	Erime sıcaklığı
FTIR	Fourier Transform Infrared
GPa	Giga Pascal
CRT	Katot ışın tüpü
K _{ic}	Kırılma Tokluğu
IR	Kızılötesi
Kg	Kilogram
Kv	Kilovolt
MPa	Mega Pascal
mA	Miliamper
Mm	Milimetre
V _m	Molar Hacim
ν	Poisson Oranı
Rpm	Rounds per minute
LCD	Sıvı kristal ekran
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskopi
UV	Ultra Violet
H _v	Vickers Sertlik
XRD	X Ray Diffraction
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar

BS	Borosilikat
KOS	Köprülü Oksijen Sayısı

1.GİRİŞ

Geçmişten bugüne birçok alanda kendisine kullanım alanı bulan camın geçmişi, ateşin meydana çıktığı zamanlara dayanır. Ateşin bulunmasından sonra meydana çıkan sanatlar camın keşfedilmesinde önemli rol oynamıştır. Camın bulunması üzerine birçok rivayet bulunmaktadır. Bu rivayetlerin ortak sonucu camların bir rastlantı sonucu bulunduğunu gösterir.

Camın yapısında bulunan temel maddeler kum, soda külü ve kireç olarak bilinir. Buradan yola çıkarak camın tarihi gelişimine bakıldığında, ilk olarak uygun kumun bol bulunduğu aynı zamanda seramik yapımının gelişmiş olduğu bölgelerde üretildiği kabul edilebilir. Bu temel maddelerin dünyanın birçok yerinde bulunabilmesinden dolayı, camın keşfi de söz konusu ülkelerin birinde olmuş olabilir. Ortaya atılan rivayetlere göre camın keşfi Mezopotamya'dan Mısır'a, Doğu Akdeniz'den Anadolu'ya kadar pek çok yerde olmuş olabilir. Bu bölgelerde yapılan kazılarda bulunan ilk cam örnekleri, bu rivayetlerin temel kaynağıdır. Ancak günümüze ulaşabilen en sağlam kanıtlar, camın daha çok Mısır ve Mezopotamya bölgesinde gelişen bir gelenek olduğunu gösterir.

Bazı kaynaklara göre, bu keşfin onuru eski Fenikelilere verilmektedir. Rivayete göre Fenikelilere ait bir geminin mürettebatı, Suriye'deki bir nehir kıyısında karaya çıkmış. Yemek pişirmek için yaptıkları hazırlıkta kaplarını desteklemek üzere taş bulamadıkları için, geminin deposundaki, cinsi sodyum bileşimi olan güherçile kalıplarından yararlanmayı düşünmüşler. Yemek için yaptıkları ateş, güherçileyi eritmiş, eriyik sodyum bileşiği çevredeki kumla karışmış, sıvı cam olarak akmaya başlamış (URL-1, 2017).

Camların Türk tarihindeki gelişimine bakıldığında, eski beyliklerden Artuklular zamanında camilerin, medreselerin yapısında cam kullanıldığı görülmektedir. İstanbul'un fethinden sonra yani 16-17. yüzyıllarda cam alanında ciddi gelişmeler görülmektedir. Türk topraklarında ilk cam fabrikası Cumhuriyet

Dönemi'nde 1934 yılında kuruldu. Halen faaliyet halinde olan Paşabahçe fabrikası da bu dönemlerde kurulmuştur. Devam eden yıllarda fabrikaların sayısı artmış ve dışarıya ihraç başlamıştır. Bunun dışında özel şirketlerin birçoğu da cam fabrikası kurmuştur (URL-2, 2017).

Cam keşfedildikten sonra, özellikle M.Ö. 1. yüzyılda cam üflemenin keşfedilmesiyle birlikte kendine çeşitli kullanım alanları bulmuştur. O günden bugüne vazgeçilmez bir tüketim maddesin olan cam, kullanım alanlarının yanında çeşitleri de artarak günümüze kadar gelmiştir.

Cam eski zamanlardan beri beton, ev eşyaları, dekoratif yapılar ve telekomünikasyon gibi farklı uygulamalarda çok önemli bir yere sahip olmuştur. Camın tanımını yapacak olursak, genelde şeffaf veya saydam olan, sert, kırılğan ve doğal elementlere karşı geçirimsiz inorganik katı bir maddedir. Camlar, yüksek sıcaklıkta bile viskozitesi yüksek olan sıvılar oldukları için normal sıcaklığa geldiklerinde kristalleşme olmadan katılaşma özelliği gösterirler. Bu yüzden katı ve sıvının mekanik özelliklerini beraber sergilerler (URL-3, 2017).

Camlar genel olarak 2 ana gruba ayrılır. Bunlardan birincisi olan doğal camlar, aynı zamanda obsidyen olarak bilinmektedir. Diğer cam grupları ise yapay cam olarak bilinir. Yapay camın kullanımının yaygınlaşmasından sonra doğal camlar önemini yitirmiştir.

Cam malzeme seçimi yapılırken camın, kullanılacağı alana göre fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklere göre seçim yapılması gerekmektedir. Yapılan literatür çalışmalarındaki bilgilere göre bir malzemenin radyasyon absorblama özelliğinin artması için özellikle yoğunluğunun ve atom numarasının artması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı bu çalışmada; borosilikat (BS) cam içerisine katkı maddesi olarak krom oksit (Cr_2O_3) seçilmiştir. Aşağıda literatürde borosilikat (BS) ve soda-kireç camları ve krom oksitli camlarla ilgili yapılmış bazı çalışmaların özetleri verilmiştir.

Literatürde borosilikat camları ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu alanda Ebrahimi ve Rezvani (2018) yaptıkları çalışmada, sodyum borosilikat camının yapısına krom oksit ekleyerek optik ve yapısal özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Molce %0–0.8 oranlarında Cr_2O_3 ekleyip hazırladıkları numunelerin yoğunluk ölçümlerini arşimed prensibiyle tespit etmişlerdir. Numunelerin yoğunluğu Cr_2O_3 katkı miktarı arttıkça artmış, molar hacim ise Cr_2O_3 katkı miktarı arttıkça azalmıştır. Ayrıca krom oksit, camın yapısında ağ oluşturucu görevde yer alarak köprülü oksijen sayısında artış olduğunu saptamışlardır. Krom oksit katkısı arttıkça camın renginin şeffaftan koyu yeşile kademeli olarak geçtiğini gözlemlemişlerdir.

Kullberg ve arkadaşlarının (2017a) yaptığı bir çalışmada borosilikat camının yapısına molce %64-65 aralığında ZnO ilave etmiştir. Bu çalışmada değiştirilen parametreler, numunelerin molce ZnO ve bor oksit oranları ile tavlama süreleri ve tavlama sıcaklıklarıdır. Tavlama süresinin ve sıcaklığının artırılması sonucunda numunelerin kristalit boyutlarında ve yoğunluğunda artış meydana gelmiştir. Sabit ısıtma işlem şartlarında, ZnO içeriği yüksek olan numunelerde kristalit yoğunluğunun daha yüksek olduğunu saptamışlardır.

Gomaa El-Damrawi ve arkadaşları (2017) borosilikat camına molce %0-20 aralığında Fe_2O_3 ilave ederek numuneler hazırlamıştır. Üretilen numunelerin yapısal değişikliklerini XRD, TEM ve SEM ile incelemişlerdir. Nano boyutlarda Fe_2O_3 oranı düşük numunelerde polikristal yapı gözlemlemişler ve kristalitlerin büyüklüğünün Fe_2O_3 ile alakalı olduğunu tespit etmişlerdir. Fe_2O_3 oranı molce %8'in altında olan numunelerde daha düzenli atom yapısı görülmüştür. Fe_2O_3 'ün cam oluşturma karakteri, ağırlıklı olarak daha yüksek demir oksit konsantrasyonunda, daha baskın olduğunu bulmuşlardır.

Ganvir ve Gedam (2017) sodyum borosilikat camının yapısına molce %0–2 arası Lantanyum oksit ilave ederek yeni cam numuneler elde etti. Yapılan bu çalışmanın XRD sonuçları, camın amorf yapısını koruduğunu göstermiştir. Lantanyum oksitin yüksek molekül ağırlığından dolayı yoğunluk ve mol hacminde,

katkı oranı arttıkça bir artış olduğu sonucuna varılmıştır. Camsı geçiş sıcaklığının da katkı oranı ile birlikte arttığını tespit etmişlerdir.

Kullberg ve arkadaşları (2017b) çinko borosilikat camının yapısına molce %0–5 arasında çinko florür (ZnF_2) ekleyerek genel formülü $(65-x) ZnO-xZnF_2 -15B_2O_3-20SiO_2$ olan bir cam kompozisyonu hazırlamışlardır. Bu çalışmada, ergitme yöntemi kullanılmış olup FTIR, SEM, DTA ve XRD analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda, çinko florür oranı arttıkça camların yoğunluğunun arttığı, yapısal özelliklerinde ise grupsal artışlar olduğu gözlemlenmiştir. F^- iyonlarının katılmasından dolayı Si-O-Si ağ yapısının bozularak, serbest oksijenlerin meydana çıkmasına neden olmuştur. XRD sonuçlarında, katkı oranı arttıkça willemite (Zn_2SiO_4) kristallerinin oluşup artmaya başladığı saptanmıştır. ZnF_2 'nin kristalleşmeye yardımcı bir ajan olduğu sonucuna varılmıştır.

Abd El-Fattah ve arkadaşları (2017) geleneksel ergitme yöntemini kullanarak $xSiO_2 - (50-x)B_2O_3 - 30Na_2O - 19.5ZnO - 0.5CoO$ ($x= 0, 5, 10, 20\%$ mol) bileşimine sahip cam gruplarını hazırlamışlardır. Borosilikat camların yoğunluğu SiO_2 katkısının artırılmasıyla azaltılmış, bunun sonucunda camsı ağın sıkıca dolaşması sağlanmıştır.

Zhu ve arkadaşları (2016), $xCr_2O_3-(1-x)(40.7Fe_2O_3-5.0B_2O_3- 54.3P_2O_5)$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.5$ ve 2.0 , ağırlık %) kompozisyonunda hazırladıkları krom oksit katkılı demir borofosfat camlarının XRD sonuçlarında, ağırlıkça %1 Cr_2O_3 katkı oranından daha düşük oranlarda ise tamamen amorf yapı gözlemlenmiştir. Daha yüksek oranlarda kısmi kristallenmeler görülmüştür. Ayrıca üretilen camların camsı geçiş sıcaklığı ve yoğunluğu katkı oranıyla beraber artmıştır. DTA ve FTIR analizleri de yapılan krom oksitin, demir borofosfat camların yapısını güçlendirdiği sonucuna varılmıştır.

Laopaiboon ve Bootjomchai (2015) yaptıkları çalışmada, alkali borosilikat camının yapısına vanadyum oksit ilave etmiştir. Ürettikleri numunelerde molce silisyum oksit oranını azaltırken vanadyum oksit oranını %0–0.07 arasındaki

oranlarda arttırmışlardır. Çalışma sonucunda numunelerin molar hacim ve yoğunlukları katkı oranıyla paralellik göstermiş olup, katkı oranı arttıkça artmıştır. Young modülü, bulk modülü ve mikro sertlik değerleri ise katkı oranı arttıkça azalmıştır.

Bahra ve arkadaşları (2015), borat-silika camına kimyasal formülü $[(x\text{Er}_2\text{O}_3)(50-x)\%\text{ZnO}][(20\%\text{B}_2\text{O}_3)(30\%\text{SiO}_2)]$ olacak şekilde erbiyum oksit (molce %0.5–5) ekleyerek bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda pembe, şeffaf ve amorf yapılı camlar elde etmişlerdir. Katkı oranı arttıkça yoğunluğun ve molar hacimin arttığını tespit etmişlerdir. Camsı geçiş sıcaklığı ise katkı oranıyla ters orantılı olarak azalmıştır.

Pavai ve Thirumal (2013) yaptıkları çalışmada, $60\text{B}_2\text{O}_3 - (40-x)\text{BaO} - x\text{CuO}$ ($x =$ molce %0, 5, 10, 15 ve 20) kompozisyonuna sahip cam numuneler üretmiştir. IR ölçümü yapılmış, elastik modül, Poisson oranı, debye sıcaklığı, ultrasonik hızlar ve yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Bakır oksit oranı arttıkça yoğunlukta azalma, molar hacimde artış ve yapısal ağda köprülü olmayan oksijen oluştuğunu saptamışlardır.

Eremyashev ve arkadaşları (2013) yaptıkları bir çalışmada, borosilikat camının yapısına demir oksit ilave etmiştir. Hazırladıkları numunelerde bor oksit oranı azalırken, demir oksit ve silisyum oksit oranı artacak şekilde bir kompozisyon belirlemişlerdir. IR ve RS spektrumları sonucunda demir oksit oranı arttıkça, Si-O bağlarının azalarak köprüsüz oksijen sayısının arttığını tespit etmişlerdir.

Meejitpaisan ve arkadaşları (2012), soda kireç silikat camının yapısına krom oksit ekleyerek, camın fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri incelemiştir. $25\text{Na}_2\text{O} - 10\text{CaO} - (65-x)\text{SiO}_2 - x\text{Cr}_2\text{O}_3$ ($x =$ molce 0–0.05% arası) bileşimine sahip cam numunelerini 1500°C 'de ergiterek üretmişlerdir. Cam örneklerinin XRD analizi yapılarak amorf yapılarını teyit etmişlerdir. Krom oksitin sahip olduğu yüksek molekül ağırlığından dolayı numunelerin yoğunluğu krom oksit miktarı arttıkça artmıştır. Molar hacim ise azalmıştır. Bu da silisyum oksit yerine krom oksit

bulunduran numunelerde camsı ağırlık daha sıkı olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda numunelerin kırılma indisleri incelenmiştir. Kırılma indisleri de katkı oranıyla beraber bir artış göstermiştir.

Santic ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada kurşun ve demir katkılı fosfat camının yapısına krom oksit ekleyerek bir çalışma yapmışlardır. Genel bileşimi $x\text{Cr}_2\text{O}_3 - (28.3-x)\text{PbO} - 28.7\text{Fe}_2\text{O}_3 - 43.0\text{P}_2\text{O}_5$ (molce $x = \% 0-10$) olan cam numuneleri, geleneksel eritme-su verme tekniği ile hazırlamışlardır. Cr_2O_3 katkı oranı $\%4$ 'e kadar olan bileşimler tam amorf yapı sergilemiştir. $\%8$ ve 10 katkı oranlarında ise kristal yapı görülmüştür. PbO 'nun yüksek yoğunluğundan dolayı yoğunlukta düşük oranlarda bir artış olmasına rağmen yüksek oranlarda azalma meydana gelmiştir.

Kumar ve arkadaşları (2010), $40\text{SiO}_2 - 30\text{BaO} - 20\text{B}_2\text{O}_3 - 10\text{A}_2\text{O}_3$ ($\text{A} = \text{Y, La, Al, Cr}$) Kompozisyonuna sahip cam numunler üretmiştir. Yapılan çalışmalarda yüksek katkı oranından kaynaklı olarak sadece Cr_2O_3 katkılı numuneler camlaşma göstermemiştir. Aynı zamanda diğer numunelere nazaran Cr_2O_3 katkılı numunede daha yüksek yoğunluk, daha düşük molar hacim gözlemlenmiştir.

Gaafar ve Marzouk (2007), sodyum borosilikat camının yapısına molce farklı oranlara sahip erbiyum oksit ekleyerek bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Arşimed prensibiyle ölçülen yoğunluklar erbiyum oksitin yüksek yoğunluğu nedeniyle, katkı oranıyla birlikte artış göstermiştir. Molar hacim ise erbiyum oksitin sahip olduğu küçük iyonik yarıçap nedeniyle azalmıştır. Erbiyum ihtiva eden numunelerin elastik modül, bulk modülü ve poisson oranları, ihtiva etmeyen numuneye göre daha düşük değerlerde bulunmuştur.

Bu çalışmanın amacı; yapay cam sınıfının bir üyesi olan borosilikat (BS) camlar içerisine geçiş metal oksiti olan Cr_2O_3 'i ağırlıkça farklı oranlarda ($\%0-5$) ilave ederek, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri yüksek olan radyasyon kalkanlama için yeni nesil camlar üretmektir. Bu çalışmada; Bölüm 1'de camın dünden bugüne geliş evresi, kullanım alanları ve daha önce bu alanda yapılan çalışmalar, Bölüm 2'de camlar, borosilikat camların fiziksel, kimyasal ve mekanik

özellikleri hakkında teorik bilgiler, Bölüm 3’de yapılan deneysel çalışmalar ile ilgili kullanılan yöntem ve malzemeler ve ardından Bölüm 4’de ise deneysel hesaplamalar ve bunların sonuçlarından bahsedilip, son olarak da Bölüm 5’de deney sonuçları irdelenmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Camın Tanımı

Cam, saydam veya yarısaydam olarak bulunan, genellikle sert, kırılğan yapılı ve yapısında sıvıların barınmasına imkân veren, inorganik amorf yapıda katı bir malzemedir. Eski zamanlardan beri gerek inşaat malzemesi, gerekse süs eşyası olarak kullanılan cam malzemeler, günümüzde ise bunların yanında basit araç gereçlerden iletişim ve uzay teknolojilerine kadar kendine çok yaygın bir kullanım alanı bulmuştur (URL-1, 2017).

Cam ani soğutulmuş alkali ve toprak alkali metal oksitleriyle, bazı diğer metal oksitlerin çözülmesinden oluşan akışkan bir malzeme olup ana maddesi silisyumdur (SiO_2). Bununla beraber, camın kullanımı daha çok optik şeffaflığı nedeniyle yaygınlaşmıştır ve şeffaflık gerektiren bölmelerde birincil kullanıma sahip olmuştur. Cam ışığı iletir, yansıtır ve kırar, bu nedenle teknolojinin gelişmesiyle, ışıkla yüksek hızlı veri iletimi için optik mercekler, prizmalar, ince cam ve optik fiberler ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda camlara metalik tuzlar eklenerek renklendirme yapılabilir ve camsı emayeler ile boyanabilir. Bu gelişmeler sayesinde camlar, sanatsal çalışmalarda, özellikle de vitray sanatının gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Camın üretimi sırasında hızlı soğuma nedeniyle kristal yapı görülmezken sıvıların sahip olduğu amorf yapı görülür. Yani eriyik haldeki cam amorf yapısını koruyarak katılaşmaktadır. Bu yapı cama sağlamlık ve saydamlık özelliğini beraber kazandırır. Bir çok kaynakta katılarda görülen kristallenme özelliklerini göstermediği için sıvı olarak adlandırılır. Bu adlandırmanın sebebi bahsedildiği gibi amorf yapısından dolayıdır (URL-4, 2017).

2.2. Camın Yapısı

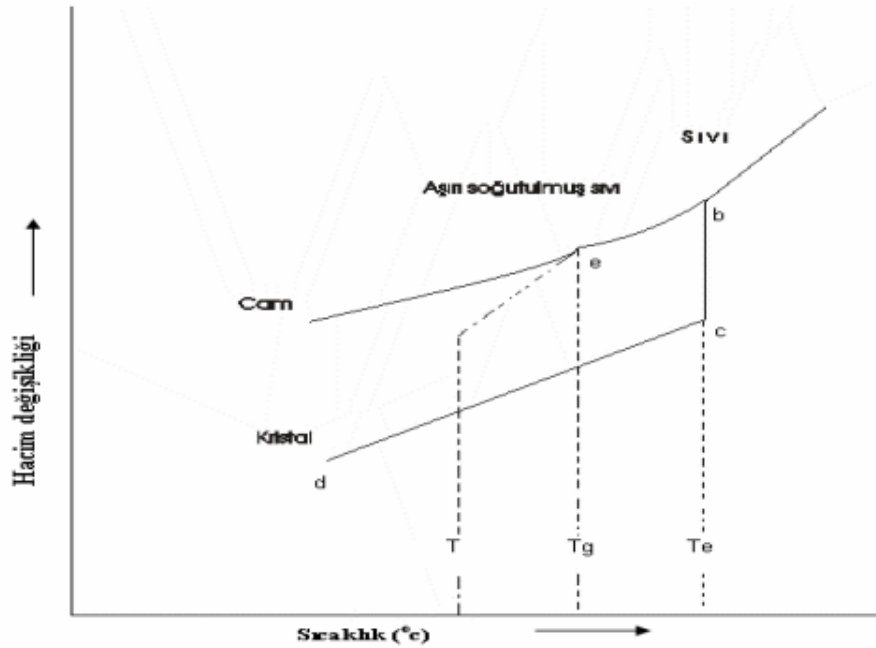
Malzemeciler camı aşırı soğutulmuş bir sıvıya benzetirler. Gerçekten de cam ısıtılmaya başlandıktan sonra sıcaklığın artmasına paralel olarak önce yumuşar ve daha sonra da akıcı hale gelir. Bu hali ile adeta sıvı gibidir. Birçok kimyasal madde (boraks, soda v.b) sıvı camın yapısına, camın sertleşmesi gibi çeşitli özelliklerin iyileştirilmesi için, katılır. Belli bir karakterdeki camın oluşumu camın soğutulma hızına bağlıdır ve atomlar arası ya da atom grupları arasındaki karışık bağ yapılarına (Kovalent ve iyonik bağlar) ihtiyaç duyar. Katılarda bireysel atomlar 'kristal kafes' diye bilinen düzenli 3 boyutlu diziler meydana getirdiğinde, kristaller oluşur. Fakat cam, sıvı haldeyken soğumaya başladığında, rastgele bir ağ oluşturur. Yani malzeme sıvı özelliğini kaybetmemiş olur. Camın oluşumunda yer alan bu parçalara, ağ oluşturucuları denir. İyonlar bu ağın bazı bölgelerine sızarak, ağ yapısını yeniden düzenler ve böylece camın iyonlara bağlı olan özelliklerini ortaya çıkarır. İyonların ağ düzenleyicileri olarak bilinmesinin sebebi budur. Camın kimyasal dayanıklılığı, diğer bilinen tüm malzemelerden çok daha fazla ve geniş bir aralıktadır; ayrıca mekanik dayanıklılığını da kurşun geçirmez camların varlığı kanıtlar. Güvenlik uygulamalarının hemen hepsinde kullanılan kurşun geçirmez camların yapısında polikarbonat vardır ve camın bir santimetre kalınlıkta olması kurşun geçirmemesi için yeterlidir (Anonim, 2008; Anonim, 2012).

Camsı halin atomik seviyedeki tanımı, kristalin materyallerde uzun mesafeli diziliş bulunmaması nedeniyle son derece karmaşıktır. Temel cam fiziği ve kimyasına ilişkin anlayışlar, camların denge dışı termodinamik durumuyla da engellenmektedir. Son zamanlardaki teorik ve deneysel ilerlemeler, alanın ampirik bir disiplinden, titiz bilimsel ilkelere dayanan bir disiplinden olgunlaşmasına olanak tanımaktadır. Bu ilerlemeler sadece dikkat çekici düzeyde bir anlayış sunmakla kalmayıp aynı zamanda yeni fonksiyonel camların atomik seviyedeki tasarımına katkıda bulunmaktadır (Mauro ve ark., 2013).

Cam, elle tutulursa sert ve durgun bir etki yapar. Kırılganlığı nedeniyle de sert bir yere vurulunca kırılır. Böyle olmakla birlikte kimyacılar, camları su kaplarına

benzeterek, içinden su içtiğimiz kabın kendisinin de bir sıvı gibi olduğunu söylerler (Anonim, 2012).

Bir maddeye, dışarıdan yeteri kadar enerji verilirse sıvı hale geçer; soğutulduğunda ise katılaşır. Atomların düzenli dizildikleri bir kristal malzemede (katılarda) ergitme sıcaklığının altında lineer katılaşma (doğrusal katılaşma) görülür. Şekil 2.1.'den de anlaşılacağı gibi soğurken hacim küçülür. Örneğin, bakır 1083°C 'de ergir ve bu sıcaklığın altında katıdır. Cam malzemelerinin ise sabit bir ergime sıcaklığı olmayıp onların sıvı, aşırı soğutulmuş sıvı ve camsı durumları gözlenir. Hacim değişimi, atomların belirli bir düzende yapılanamamaları nedeni ile geçiş sıcaklığı adı verilen T_g noktasına kadar hızlıdır. Bu noktadan sonra büzülme, hacim değişikliği gayet yavaş gerçekleşir. Sonuçta çok yoğun ve amorf yapılı, cam adı verilen malzeme elde edilir. Kristalin malzeme, sıvı hâlde B noktasına kadar soğur, C noktasından itibaren D'ye kadar katı olarak soğur ve T_e noktası katının ergime sıcaklığıdır. Camsı malzeme de B noktasına kadar sıvı olarak soğur. B-C arasında aşırı soğumuş sıvı hâldedir. T_g noktası dönüşüm sıcaklığıdır. Bundan sonra, katı görünümlü cam şeklindedir (Anonim, 2008).



Şekil 2.1. Maddenin sıcaklık-hacim değişimi

Cam gerçekte bir sıvıdır. Saydamlığı da buradan kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi bir sıvıda iç sınırlar yoktur. Camın içinden geçmekte olan bir ışın demeti, kırılma ve yansımaya uğramaz. Ama bu ışın yalnızca cam yüzeyini aşarken hafif bir kırılma görülür. Bu özellikler ancak saydam ve nitelikli bir cam için mümkündür. Camdaki farklı renklendirmeler bu özellik nedeniyle elde edilebilmektedir. Camın yapısına katılan çeşitli katkılarla camın ışık emme ya da ışık geçirme özellikleri de çok farklı boyutlara ulaştırılabilir (Anonim, 2012).

Cam bilimi, fizik, kimya, jeoloji, mühendislik ve matematik olmak üzere birçok teknik konunun keskin kenarını birleştirir. Büyük ölçekli ilerlemeyi kolaylaştırmak ve camların sunabileceği tüm eşsiz özelliklerden yararlanmak için cam mühendisliği teknolojisinin sınırları da ileri itilmelidir. Bu alandaki son gelişmeler, tüketicilerin elektronik cihazlarda, çok ciddi boyutlarda bir cam talebinde bulunmasına neden oldu (Mauro, 2014).

Bu nedenler, araştırmacılar tarafından cam alanında çalışma yapmak için çok teşvik edici bulunmuştur. Cam, bugünkü küresel enerji ve sağlık sorunlarının birçoğunu çözmede kritik bir rol oynamaktadır.

Camların yapısı ile ilgili en önemli teoriyi ünlü kristalograf Zachariasen ortaya atmıştır. Bu teoriye göre bir camın bir oksit tarafından oluşturulabilmesi için, A bir metal olmak üzere yalnızca genel formülü A_mO_n olan bileşikler cam oluşturabilir. Buradaki oksijen atomlarından her biri, iki taneden fazla A atomuna bağlanamazlar. Her bir A atomunun çevresindeki oksijen atomlarının sayısı 3-4 arasında olmalıdır. Çok yüzlü polihedral yapılarda oksijen, A atomlarıyla yalnızca köşeleri paylaşabilir. En az 3 köşe paylaşılmalıdır (URL-5, 2017). Bu teoriyi örnek vererek açıklayacak olursak eğer A_2O ve AO bu kuralları karşılamazken, A_2O_3 bu kuralları karşılar. Zachariasen teorilerinde birçok eksik bulunmasına karşın cam atomları arasındaki ilişkiyi sistematik olarak yorumlayan ilk fizikçidir.

2.3. Camların Üretilmesi

Bütün cam türleri ısı enerjisi kullanılarak üretilir ve bu aşamaya ergitme adı verilir. Ergitme cam üretiminin en önemli aşamalarından biridir. Bu yüzden ergitme safhasında maksimum verim elde etmek önemlidir. Doğru hammaddelerin, doğru oranda ve istenilen tane büyüklüğünde olması başlıca kurallardandır. Çizelge 2.1.'de temel cam türlerinin bileşenleri, oranları ve ergitme sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Temel cam türlerinin bileşenleri, oranları ve ergitme sıcaklıkları (Anonim, 2013)

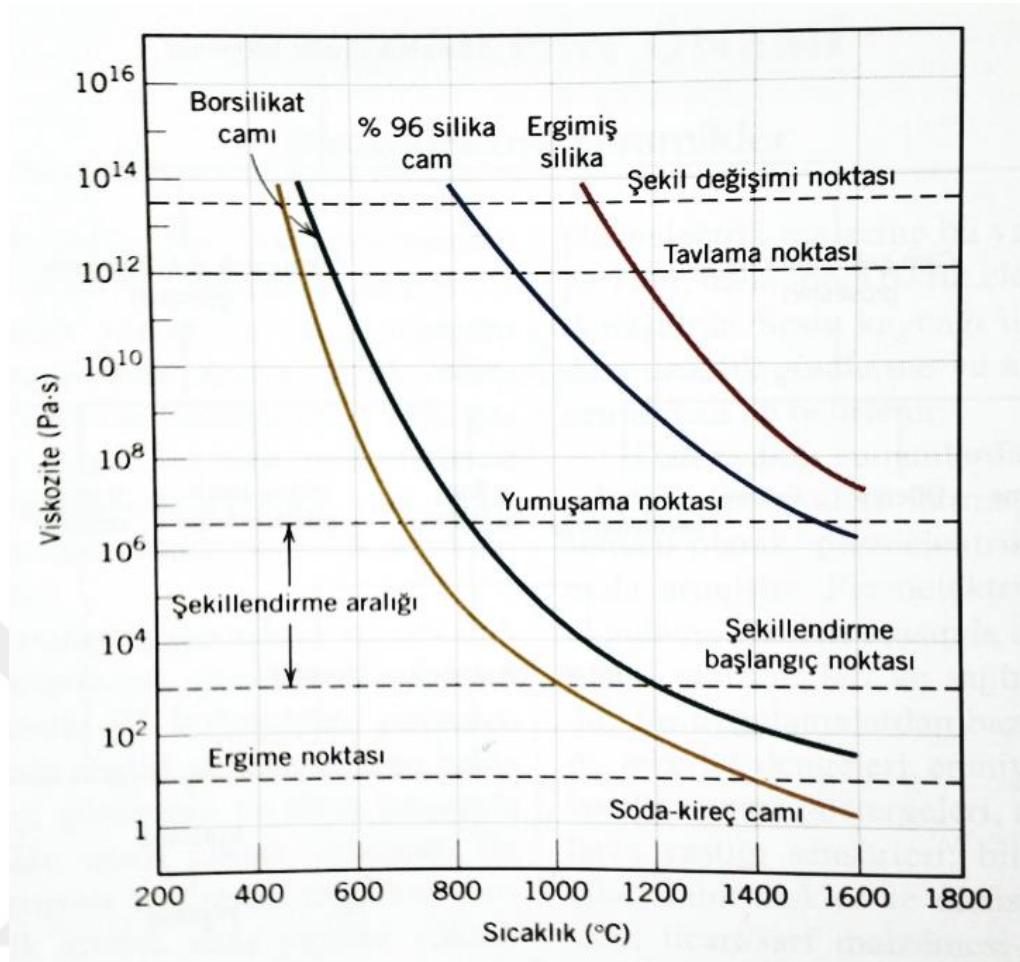
Cam Türü	Oksit	%	Ham madde	Kimyasal Formül	Ergitme Sıcaklığı (°C)
Soda-kireç-silis	Sodyum	15	Soda	Na_2CO_3	851
	Kalsiyum	10	Kalker	CaCO_3	2500 ⁽¹⁾
	Silisyum	75	Kum	SiO_2	1725
Borosilikat	Sodyum	4	Soda	Na_2CO_3	851
	Bor oksit	12	Anhidrit borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	742
	Silisyum	84	Kum	SiO_2	1725
Kurşun camı	Kurşun	30	Kırmızı kurşun	Pb_3O_4	500 ⁽²⁾
	Potasyum	10	Potas	K_2CO_3	891
	Silisyum	60	Kum	SiO_2	1725
(1) 2500 °C'de ergiyen CaO, vermek üzere 880 °C'de bozunur.					
(2) Dekompoze olur (bozunur).					

Aşağıdaki Çizelge 2.2.'de ise çeşitli cam örneklerinin kimyasal kompozisyonları verilmektedir.

Çizelge 2.2. Çeşitli Cam Kompozisyonları (URL-6, 2017)

Cam Türü	BİLEŞİM (%)												
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	PbO	SO ₃	Diğer
Düz Cam	72.5		1.0	0.07	3.9	8.1		13.7	0.3			0.25	
Renksiz Şişe	72.4		1.7	0.05	1.7	9.6		13.8	0.6			0.13	
Amber Şişe	73.4		2.0	0.22	3.0	8.0		13.0	0.4				0.16 FeO
Yeşil Şişe	72.0		1.9	0.15	1.4	9.2	0.2	14.4	0.6			0.2	0.1 Cr ₂ O ₃
Nötr Cam	70.2	7.0	7.5			1.8	3.0	9.5	1.0				
Teknik Cam (Borosilikat Cam)	80.8	12.0	2.2		0.3	0.3		4.2	0.6				
Düşük dielektrik kayıplı cam	71.0	24.8	0.9			0.3		1.5	1.2	0.2			
Yüksek aluminah cam (su premax)	53.0	10.0	21.0		10	5							
Kurşunlu kristal	59.0							2.0	12.0		25		1.5 ZnO
Sodyum- potasyum kristallenme	75.0	0.4				6.7		6.1	11.4				
Cam elyaf (E-camı)	52.9	9.2	14.5	0.3	4.4	17.4		1					
TV tüpü	67.0		5.0	0.08			11.7	7.0	8.3	0.6			
Baryum optik camı	50.0	5.1					20.6	1.2	7.5		2.4		12.5 Zn
Lazer için cam	30.9	18.1	1.3				49.5						2.0 Nd ₂ O ₃

Camların viskoziteleri çok yüksektir, bu nedenle kristallerin oluşması için gerekli atom hareketleri zorlaşır. Camı cam yapan en önemli özelliği budur. Cam gerekli sıcaklığa çıkarıldığında zaman viskozitesi düşer yani cam halinden çıkar. Şekil 2.2.'de silika camlarının sıcaklık-viskozite grafiği verilmektedir.



Şekil 2.2. Silika içeren camların viskozite-sıcaklık grafiği (Shand, 1968)

2.4. Camın Yapısını Oluşturan Ana Maddeler

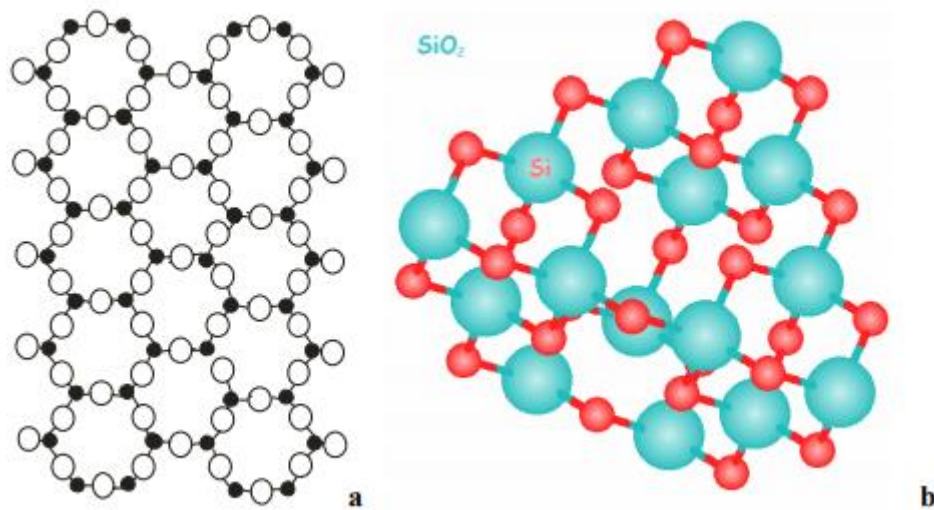
Camı oluşturan ana maddeler denildiği zaman, camın bileşimine giren maddeler üç grup halinde akla gelir; Cam haline gelebilen oksitler, eriticiler ve stabilizatörler. Camın bileşimine giren bu maddeler genel olarak kum-soda-kireç üçlüsü olarak da bilinir. Adi camın bileşimindeki bu maddelerin dışında cama önemli özellikler kazandıran aynı zamanda üretimde bazı yararlar sağlayan yardımcı bileşenler de ayrı bir grup olarak ele alınabilir.

Cam haline gelebilen oksitler (Camlaştırıcılar): Camlaşma özelliği olan bu ana maddeler genelde ağ (iskelet) oluşturan bazı oksitlerdir. Doğal cam olarak bilinen

kuvars kumu ağ oluşturan oksitlerin başında gelmektedir. Camsı ağ oluşturan oksitlerin en önemlileri SiO_2 , B_2O_3 ve P_2O_5 'dir (Anonim, 2012).

Silisyum Dioksit (SiO_2): Camın ana yapısını silis kumu oluşturur. Silisyum dioksit veya silika olarak bilinir, 2 oksijen ve 1 silisyum içeren atomdan oluşan bir kimyasal bileşiğe sahiptir. Kimyasal sembolü SiO_2 'dir. 16. yüzyıldan beri bilinmektedir. Cam, beton, fayans, porselen gibi birçok malzemenin yapısında kullanılmaktadır.

SiO_2 , kristalin formda (polimorf) bulunmaktadır. Kuvars, topaz ve ametist gibi toplamda 17 farklı kristal formu vardır. Cam yapan silisyum dioksit (SiO_2) ait atomların dizilimi Şekil 2.3.'de görülmektedir (Anonim, 2008; URL-7, 2017).



Şekil 2.3. SiO_2 'nin kristal (a) ve amorf (b) yapısı

Bor Oksit (B_2O_3): Borosilikat camların hammaddesi olarak kullanılan bor oksitin kaynağı borik asittir. Cam laboratuvar eşyası veya ısıya dayanıklı ev eşyası yapımında kullanılan borosilikat camlar için, bor oksit ve sodyum oksiti doğru oranlarda elde etmek için borik asit (B_2O_3) ve boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) karışımı kullanılır.

Feldspatlar: Feldspatlar, içeriğinde alümina bulunan doğal maddelerdir. Feldspat, $R_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ genel formülüne sahiptir ve formüldeki R_2O , Na_2O veya K_2O veya bu ikisinin karışımını gösterir. Bir Al_2O_3 kaynağı olan feldspat, saf, eriyebilen ve camı oluşturan tüm oksitlerden meydana geldiği için diğer tüm maddelerden daha önemlidir. Eğer fiyat ikinci planda olursa saf alumina kullanılır. Alümina miktarı, camın erime noktasını düşürür ve camsı durumun bozulmasını geciktirir.

Fosfor Penta Oksit (P_2O_5): Soda-kireç camlarında saydamlaştırıcı rol oynar.

Eriticiler: Ağ oluşturabilme yeteneğine sahip ve cam formuna gelebilen oksitlerin erimelerini kolaylaştırmak amacı ile cam kompozisyonuna katılan maddelere eritici adı verilir. Eriticiler denilen bu gruptaki maddeler, camlaştırıcıların erime sıcaklık derecesini düşürüp erime işlemini kolaylaştırırlar. Özellikle $1700^\circ C$ gibi yüksek bir erime derecesi olan silisin erime sıcaklığı $1500^\circ C$ seviyesine indirilebilir. Eriticiler ağ yapısına katılarak onu değiştirdiği için eriticilere modifikatör de denmektedir. Na_2O , K_2O ve Li_2O Eritici olarak adlandırılan bu maddelerin başlıcalarıdır.

Stabilizatörler: Camın kimyasal dayanıklılığı, kırma indisi, dielektrik özellikleri üzerinde etkisi olan, düzenleme yapabilen maddelerdir. Örneğin formülünde stabilizatör bulunmayan bir cam, su karşısında kararlı değildir. Bu tür camlar su camı olarak bilinir. Stabilizatör olarak kullanılan maddelerin başlıcaları CaO , BaO , PbO , MgO ve ZnO 'dur (Anonim, 2012).

2.5. Camın Yapısını Oluşturan Yardımcı Maddeler

Sodyum Sülfat (Na_2SO_4): İstenilen ergime hızının oluşmasında yardımcı olur.

Seryum Konsantre: Renksizleştirme işleminin kimyasal aşamasında kullanılır. Demir iyonlarının dengesini sağlar. Mavi/mor renk verir.

Çinko Selenit (ZnSe) ve Kobalt Oksit (Co₃O₄): Renksizleştirmede maskeleye amacıyla kullanılır. Fiziksel aşama için gerekir. Selen, pembe renk verir.

Sodyum sülfat, seryum konsantre, çinko selemit ve kobalt oksit aynı zamanda renksizleştirme işleminde kullanılır.

Cam Kırığı: Cam üretiminde kullanılan en önemli ham maddelerden biridir. Teknolojik olarak cam kırığı kullanılması, ergimeye yardım eder.

Cam üretiminde genellikle hammadde olarak silis kumu (SiO₂), dolomit (CaCO₃, MgCO₃), kireçtaşı (CaCO₃), feldspat (Na₂O, Al₂O₃, 6SiO₂), soda (Na₂O₃) ve cam kırığı kullanılır (Anonim, 2008).

2.6. Cam Türleri

2.6.1. Soda kalsik camı

Dünyada üretilen camların yaklaşık %90'ı soda kalsik camıdır. Kolay eritilip, ucuz olmasının yanında, ısıl şoklar, mukavemet ve kimyasal kararlılık gibi hallerinin haricinde her yerde kullanılabilir. Elektrik ampulü, flüoresan ampulleri, pencere camları v.b. malzemelerin üretiminde kullanılırlar. Yapısında yaklaşık %5 oranında CaO vardır (Anonim, 2012).

2.6.2. Kurşun camı

Soda kalsik camında kireç yerine PbO kullanılarak kurşun camı elde edilir. Yapısında minimum %80 oranında kurşun oksit bulundurulur. Kurşun oksit, camın erime noktasını düşürür. Bu yüzden yumuşama noktası CaO'li camlarınkinden daha düşüktür. Ayrıca bu camlar kolay işlenir, ışığı iyi yansıtır ve yayma özelliği kazandırır.

Özellikle kurşun oksit miktarının %80'i geçtiği kurşun camları, gamma ve X ışınlarından korunmak amacıyla kullanılır. Oldukça pahalı bir cam olduklarından dolayı bu ışınlardan korunmak için genellikle baryum oksitli camlar kullanılır (Anonim, 2012).

2.6.3. Alüminosilikat camı

%20 den fazla alümin, az miktarda bor, bir miktar kireç ile çok az alkali içerirler. Buradaki alkali, camın eritilmesini ve şekillendirilmesini kolaylaştırmak için kullanılır. Alkalinin bulunmadığı durumda eritilmesi ve şekillendirilmesi daha zor olur. Bu camların yumuşama noktasının yüksek ve dilatasyon katsayısının küçük olması termometre, yanma tüpleri, alevle doğrudan temas edecek her türlü parçanın yapımında kullanılır (Anonim, 2012).

2.6.4. Silisyum camı

%96 oranında Silisyum içerir. Presleme ve üfleme yöntemleri ile şekillendirme özellikle bu camlara uygulanır. Dilatasyon katsayısı küçüktür. Bu cam türünün saydamlığının çok iyi olması nedeniyle UV ışınlarını çok iyi geçirirler. Bu nedenle UV lambaları ile mikrop öldürücü özel lambaların yapımında bu camlar kullanılır (Anonim, 2012).

2.6.5. Borosilikat cam

Bor minerallerinin en fazla tüketildiği sektör cam sektörüdür. Bor, ergimiş cam harmanına katıldığında onun akışkanlığını artırıp, camın yüzey sertliğini ve dayanıklılığını yükseltmektedir. Bor oksit özellikle; borosilikat cam, tekstil ve izolasyon tipi cam elyaflarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Bor; borosilikat cam, tekstil ve izolasyon tipi cam elyafların yanı sıra, sıvı kristal göstergelerinde, özel fırın kaplarında, laboratuvar malzemelerinde, arabaların far ve sinyal camlarında, cam yününde, LCD (Liquid Crystal Display) ekranlar ve

CRT cam ürünlerinde kullanılmakta ve aynı zamanda borlu bazı özel camlar uzay sanayinde, elektronik endüstrisinde ve nükleer reaktörlerde kullanılarak, bor araştırma fırsatlarını oluşturmaktadır (URL-8, 2017).

Borosilikat cam yaklaşık 79-80% silika, 13% borik oksit, 4-5% sodyum oksit ve 2-3% alüminyum oksitten kompozisyonundan meydana gelir. Borosilikat cam, en önemli özelliği olan çok düşük termal genleşme katsayısı nedeniyle termal şoklara karşı çok dayanıklı bir malzemedir. Bu nedenle yüksek sıcaklık gerektiren sektörlerde sıklıkla kullanılırlar.

Ayrıca kimyasal direnci de yüksektir. Bu nedenle beher gibi laboratuvar kapları borosilikat camlardan üretilir. Yüksek dayanıklılığının yanı sıra kimyasal ve ısı kararlılığı da sahiptir (URL-9, 2017).

Borosilikat cam sıradan soda-kireç camlarının yaklaşık üçte biri kadar bir termal genleşme katsayısına sahiptir. Çizelge 2.3.'te bazı malzemelerin karakteristik fiziksel özellikleri verilmiştir. Bu genleşme katsayısı farkı malzemenin imalatı sırasında düşen sıcaklıktan dolayı oluşacak termal gerilmeleri azaltır. Bu yüzden yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılması uygundur.

Çizelge 2.3. Bazı malzemelerin karakteristik fiziksel özellikleri (URL-6, 2017)

Cam Türü	Yoğunluk g/cm ³	gerilim noktası °C	tavlama noktası °C	yumuşama noktası °C	yansıma indeksi	ısı iletkenliği W/m°C	ısı genleşmesi x10 ⁻⁶ /°C (linear)	özellik ısı J/g°C	Young modül (GPa)
ergimiş silika camı	2.2	987	1082	1594	1.46-1.48	1.38	0.54	0.77- 0.8	73
borosilikat camı	2.23-2.42	515	565	820	1.47-1.49	1.13	2.8-3.3	0.7- 0.8	63- 71
alüminyum silikat camı	2.52-2.64				1.53-1.55		4.2-4.6		86
flüorasan tüp camı	2.49	495	524	705	1.51	1.04	8.5	0.83	
konteynir camı	2.46	490	540	720		1.02	8.7	0.82	
kurşun cam	3.03-6.22		437	631	1.56-1.97	0.84	8.4-10.4	0.84	51- 59
soda kireç camı	2.47	520	545	735	1.52	1.42	7.9	0.67- 0.8	69- 74
su	1.0				1.333	0.56	doğrusal olmayan	4.2	
Alüminyum	2.7					236	23.1	0.8- 0.88	70
yumuşak çelik	7.8					71 (demir)	11.8 (demir)	0.49	212
Ahşap	0.7-0.8					0.14-0.17	3-6/36-60	11-16	
plastikler (saydam)	1.1-1.2				1.49	0.17-0.25	30-901.1-15	2.4- 4.0	
elmas	3.5				2.42	1000-2600 3.1	0.42		
Zerodur/ceramic							<0.1		

Çizelge 2.3.'de görüldüğü üzere Borosilikat camların, camlaşma sıcaklığı (T_g) (yumuşama sıcaklığı) yaklaşık 820-840 °C arasında değişmektedir.

Borosilikat cam, boronun düşük atom numarasından dolayı soda-kireç camlarına göre daha düşük yoğunluğa sahip olmasına neden olmaktadır. Düz cam ise 2.4-2.8 aralığında yoğunluğa sahiptir (URL-9, 2017).

Evlerde kullandığımız yüksek sıcaklığa dayanıklı, borcam olarak adlandırdığımız camlarda aslında bir borosilikat camdır.

Cam endüstrisinde, borosilikat kullanımı artarak devam etmektedir. Özel amaçlı camlar, laboratuvar malzemeleri üretimi, elektronik ürünlerin cam kısımları borosilikat cam sayesinde daha kaliteli hale gelmektedir.

Bor aynı zamanda camı aside ve çizilmeye karşı korur. Ayrıca yansıtma özelliğini artırır ve parlaklık kazandırır. Bu özel amaçlı camlar, otomobillerde, çamaşır makinelerinde, fırınlarda, fırına sürülen cam kase ve tabaklarda görülmektedir (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Borosilikat camdan üretilen mutfak malzemeleri

Bor mineralini ayrıca optik sanayinde de kullanıldığı bilinmektedir. Özel amaçlı ürünler için optik sanayinde bor minerali sıklıkla kullanılmaktadır.

Borosilikat camların bileşiminde kullanılan bor oksitin ana kaynağı yani hammadesi borik asittir (H_3BO_3). Yüksek miktarlarda sodyum oksitin kullanımı tolere edilebilirse, bu durumda bor oksit kaynağı aslında borakstur. Cam laboratuvar eşyası ve ısıya dayanıklı ev eşyası yapımında kullanılan borosilikat camların ideal bir şekilde üretilmesi için bor oksit ve sodyum oksidi doğru oranlarda elde etmek üzere borik asit ve boraks karışımı kullanılmalıdır. Kolemanit'te bir diğer bor oksit kaynağıdır.

Boraks'ın asıl adı sodyum tetraborattır. Anhidrit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) veya hidrate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) formlarında bulunur. Dünyadaki en önemli ve en büyük boraks rezervleri A.B.D. ve ülkemizde bulunmaktadır. Bunlar sodyum ve kalsiyum boratlar ile magnezyum kloro borat içerirler ve su ile ekstrakte edilirler yani su ile ayrıştırılırlar. Kristallenmede birincil ürün borakstır.

Kolemanit minerali ise kalsiyum borattır ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Bor oksidin yanı sıra yüksek oranda kalsiyum içermesi gereken uygulamalarında (cam elyaf gibi) kullanılır.

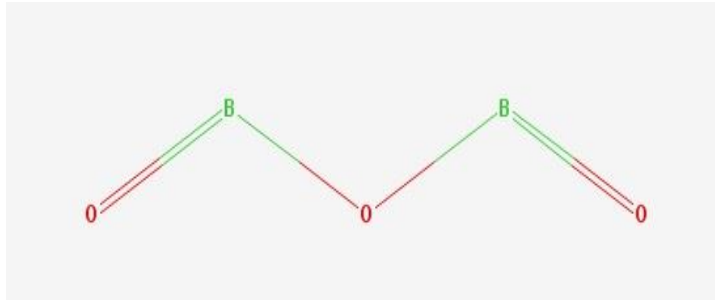
Borik asit, H_3BO_3 formülüne sahip olup, aslında hidrate edilmiş bor oksittir ($\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Kolemanit ve boraks, sülfürik asit ile borik asit vermek üzere reaksiyona sokulur. Elde edilen borik asit daha sonra kristallendirilerek, santrifüjlenir, yıkanır ve saf ürün olarak kurutulur (URL-10, 2017).

Mekanik bütünlüğü ve termal kararlılığı olan borosilikat camları, atık yüklemeleri için uygundur ve atık elementlerin çoğunu yapısına alma kabiliyetine sahiptir. Borosilikat camlarına atık ekleme işlemi, atık camlaştırma olarak bilinir (Alharbi ve ark., 2017).

Borosilikat camlarının ana malzemesi silika ve borik oksittir. Bu malzemelere aşağıda geniş yer verilecektir.

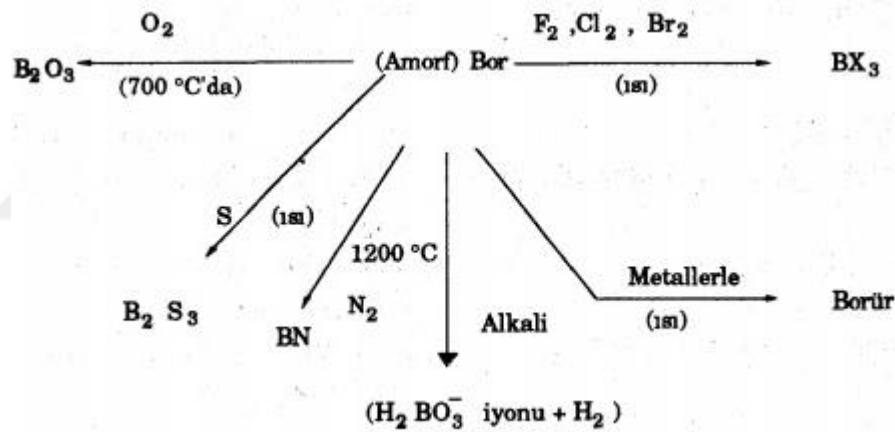
2.6.5.1. Borik oksit

Borosilikat camlarının yapısında bulunan ana malzemelerden biri olan borik oksit (B_2O_3), beyaz renkli camsı bir katıdır. Genellikle amorf yapıda bulunur. Ama uzun süreli tavlama ile kristalleştirilebilir. B_2O_3 , Şekil 2.5.'te gösterildiği gibi 3 oksijen 2 bordan oluşan 6 elemanlı boroksol halkalardan oluşmaktadır.



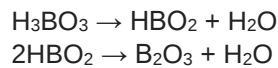
Şekil 2.5. Borik oksit yapısı

Bor trioksit boraksın bir füzyon fırınında davranışı Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi sülfürik asit ile işlenmesiyle üretilir. 750° C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, eriyik bor oksit tabakası sodyum sülfattan ayrılır. Daha sonra boşaltılır, soğutulur ve % 96-97 saflıkta elde edilir (URL-10, 2017).



Şekil 2.6. Bor'un bazı kimyasal davranışları

Başka bir yöntem borik asidi ~ 300° C'nin üzerinde ısıtmaktır. Borik asit başlangıçta 170° C civarında su buharı ve metaborik aside (HBO₂) dönüşecek ve 300° C'nin üzerinde ısıtma işlemi daha fazla buhar ve bor trioksit üretecektir. Bu reaksiyonlar:



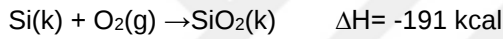
Borik oksit, uygulamalarda cam ve emayelerde akışkanlığı sağlar, bor bileşiklerini sentezlemek için başlangıç malzemesi olarak, optik fiberlerde katkı

maddesi olarak, borosilikat cam üretiminde ve organik sentezlerde bir asit katalizörü olarak kullanılır (URL-10, 2017).

2.6.5.2. Silika

Silisyum dioksit (SiO_2), silika ve silis olarak da bilinir. Yer kabuğunun yaklaşık %28'ini oluşturan Silisyum, doğada oksijenden sonra en fazla bulunan elementtir. Serbest olarak bulunamaz; ancak SiO_2 ve pek çok çeşitli silikat ve aluminosilikat mineralleri şeklindedir. Serbest SiO_2 , doğada kum, kuvars, dağ kristali vs. olarak bulunmaktadır.

Silisyum, Oksijen ile 400°C ' da ısı salan bir reaksiyonla Silisyum dioksit (SiO_2) verir.



Silisyumun bilinen tek oksidi Silisyum dioksittir. Saf silis, doğada ve oda sıcaklığında “kuvars” şeklinde kristal yapıdadır. Kuvars kristalleri birçok kayacın yapı taşını oluşturur. Örneğin, granit kayası, kuvars, ortoklas ve mika kristallerini büyük oranda içermektedir.

SiO_2 formül yazılışı bakımından CO_2 'i andırmaktadır. Ancak Silisyum Oksijen ile, Karbonun yaptığı gibi çift bağlar ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) oluşturamaz (Taşcıoğlu, 1992).

Cam yapımında silisyum dioksit (SiO_2) kullanılmasının nedenlerini özetleyecek olursak;

- Camın ana ham maddesidir.
- Ergitilmiş hâldeki camın akışkanlığını azaltır.
- Camın termik şoka, yani ani ısı farklılıklarına karşı dayanıklılığını artırır.
- Asitlerin etkisine karşı camın direncini artırır.

- Viskozitesini artırır.
- Camın sıcaktan dolayı genişmesini azaltır.
- Camın çalışma sıcaklığını artırır.
- Camın mekanik mukavemetini artırır.
- Soğumuş cama camsı özelliğini verir.



3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Camların Sentezi

Bu çalışmada; Trakya Şişecam A.Ş. firmasından temin edilen borosilikat (BS) cam parçaları Şekil 3.1’de gösterilen agat havan içerisinde kırılarak ve öğütülerek borosilikat cam tozları elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan BS camın kimyasal kompozisyonu ise ağırlıkça %79.50 SiO₂, % 2.5 Al₂O₃, % 5 Na₂O ve % 13 B₂O₃’den oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Öğütme işleminde kullanılan agat havan

Bir geçiş metali olan ve önemli bir renklendirici madde (Volf, 1984) olarak bilinen krom oksit (Cr₂O₃), BS camın yapısına belirli oranlarda katkı maddesi olarak eklenmiştir. Camlar oluşturulurken 7 farklı kompozisyonda, BS ve Cr₂O₃ toz karışımları hazırlanmıştır. Bu hazırlanan toz karışımlarının kompozisyonları ise aşağıda Çizelge 3.1.’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Cam örneklerin Kompozisyonu

Katkı Oranı	$x\text{Cr}_2\text{O}_3$	$(100-x)(79.5\text{SiO}_2-13\text{B}_2\text{O}_3-5\text{NaO}_2-2.5\text{Al}_2\text{O}_3)$
Katkısız BS	0	100
%0.25 Cr_2O_3	0.25	99.75
%0.5 Cr_2O_3	0.5	99.5
%0.75 Cr_2O_3	0.75	99.25
%1 Cr_2O_3	1	99
%2 Cr_2O_3	2	98
%5 Cr_2O_3	5	95

Çizelge 3.1.'de verilen bileşimlerde, tozların hazırlanması için Şekil 3.2.'deki hassas terazi kullanılarak tartım işlemi yapıldı. Farklı kompozisyonlarda hazırlanan BS- Cr_2O_3 tozları, hem tozların inceltilmesi hem de homojen bir toz karışımını elde edebilmek için Şekil 3.3'de gösterilen atritör içerisinde alümina (Al_2O_3) bilyeler kullanılarak 200 rpm'de 30 dakika süreyle mekanik karıştırma (harmanlama) yapılmıştır. Ayrıca ergitme esnasında BS cam içerisinde oluşabilecek hava kabarcıklarının giderilebilmesi için toz karışımının içerisine ağırlıkça %1 oranında sodyum sülfat ve tozların sıkıştırılabilirliğini kolaylaştırmak için de %10 oranında çinko stearat ilave edilmiştir.



Şekil 3.2. Cam tozlarının hassas terazide tartılması



Şekil 3.3. Toz karıştırıcı (atritör)

Karışım tozların preslenerek pellet haline getirilmesi için Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü malzeme laboratuvarındaki Şekil 3.4.'de gösterilen 25 tonluk manuel hidrolik pres kullanılmıştır. Hazırlanan karışım tozlarından 6 gr olarak tartılan BS-Cr₂O₃ cam karışım tozları, Şekil 3.4.'te gösterilen 32 mm'lik çaptaki silindirik bir kalıp içerisinde manuel hidrolik presle, fırınlama sürecine geçene kadar tozların birbirine daha sıkı tutunması için, 250 MPa basınçta şekillendirme yapılarak 32 mm çapında ve 8 mm yüksekliğinde pellet örnekler elde edildi (Şekil 3.5.).



Şekil 3.4. Tozların konulduğu metal kalıp ve manuel hidrolik pres

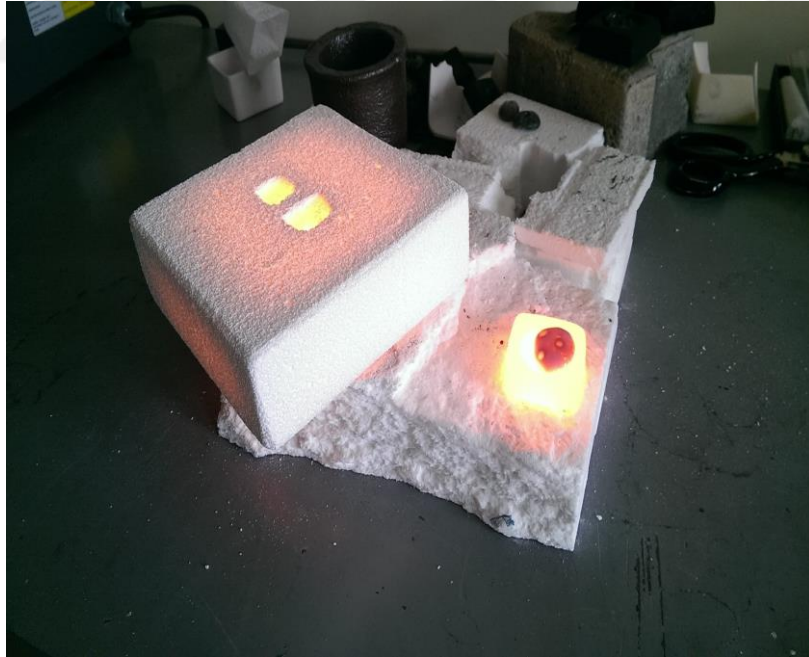


Şekil 3.5. Şekillendirilerek pellet haline getirilen Cr₂O₃ katkılı cam tozu

Hazırlanan örneklerin sentezlenmesi ve ergitme işlemleri ise Şekil 3.6'da gösterilen Harran üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü malzeme laboratuvarındaki yüksek sıcaklık kül fırını kullanıldı. Pellet halindeki numunelerin ergitme işlemi, grafit kalıp içerisinde gerçekleştirildi. Yapılan literatür araştırmaları ve denemeler sonucunda, pellet halinde hazırlanan örneklerin ergitme işlemi için 1330 °C sıcaklığın yeterli olduğu tespit edildi. Numunelerin konulduğu fırının Şekil 3.6.'da iç görünüşü verilmiştir. Fırın içerisine konulan numuneler ergitme işlemi için 270 dakikada 1330 °C'ye çıkarıldı ve 330 dakika 1330° C'de bekletildi. Toplam 10 saat süren ergitme işleminin sonunda numuneler, fırın içerisinden çıkartılıp ani soğumaya maruz bırakılarak camlaşmanın oluşması sağlandı. Şekil 3.7.'de henüz fırından yeni çıkarılmış kor halinde olan cam numune gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Ergitmede kullanılan yüksek sıcaklık kül fırınının iç görünümü



Şekil 3.7. Fırından çıkarılan kor halinde cam numunesi

Ergitildikten sonra soğumaya bırakılan cam numuneleri 25 mm'lik kare grafit kalıplarda şekillendirme işlemi için tekrardan fırına koyuldu. Şekillendirme için fırın

1300° C'ye çıkartılıp, 30 dakika bu sıcaklıkta cam örnekler bekletildi ve ardından fırından maşa yardımıyla çıkartılan numuneler Şekil 3.8.'de gösterilen sıcak şekillendirme aparatıyla şekillendirildi.



Şekil 3.8. Sıcak şekillendirme aparatı

Şekillendirilmesi yapılan cam örneklerin içyapısında ani soğuma nedeniyle iç gerilmeler oluşmaktadır. Bu iç gerilmelerin mekanik özellikler bakımından olumsuz etkilerini gidermek amacıyla cam numuneler 5 °C'lik bir ısıtma hızında 550 °C'ye çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 3 saat bekletildikten sonra, 2 °C'lik bir soğutma hızında oda sıcaklığına fırında soğutuldu. Bu tavlama işlemi sayesinde camlarda oluşan iç gerilmeler ortadan kaldırıldı. Aşağıda Şekil 3.9.'da şekillendirmesi ve tavlaması yapılmış cam numuneler gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Şekillendirme işlemi sonrası cam numunelerin görünümü

Numunelerin mekanik özelliklerinin daha doğru tespit edilebilmesi için üretilen cam örneklerle, yüzey zımparalama ve parlatma işlemleri yapıldı. Zımparalama işleminde kaba zımpara kağıdından ince zımpara kağıdına doğru farklı mesh boyutlarındaki (200, 300, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500 ve 2000) silisyum karbür zımpara kağıtları kullanılarak cam örneklerin yüzeyleri zımparalandı. Parlatma işlemi ise 3 ve 1 μm 'luk elmas solüsyonlar kullanılarak numunelerin yüzeyi parlatıldı. Zımparalama ve parlatma işlemleri, Şekil 3.10.'da gösterilen metalografik yüzey zımparalama ve parlatma cihazında yapıldı.



Şekil 3.10. Yüzey zımparalama ve parlatma cihazı

3.2. Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

Tavlama yapılan numunelerin yoğunlukları, Harran üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü malzeme laboratuvarındaki Radwag marka hassas terazi ve yoğunluk ölçme kiti kullanılarak, Arşimed prensibi ile belirlendi. Hazırlanmış cam örneklerin ağırlıkları, hassas mikro terazi ile saf su içerisinde ve havada ölçülerek Denklem 3.1.'de yerine yazılarak hesaplandı.

$$\rho = \frac{w_a}{w_a - w_b} \times \rho_{dw} \quad (3.1)$$

Burada;

ρ : Numunenin yoğunluğu (g/cm^3)

ρ_{dw} : Saf suyun yoğunluğu (1.0000 g/cm^3)

w_a : Numunenin havadaki ağırlığı (g)

w_b : Numunenin sıvı içerisindeki ağırlığı (g)

Cam numunelerinin molar hacimleri (V_M) ise aşağıdaki Denklem 3.2. kullanılarak hesaplandı. Molar hacim, maddenin 1 molünün kapladığı hacim olarak tanımlanır. Genellikle yoğunluk ile ters orantılıdır.

$$V_M = \frac{M_T}{\rho} \quad (3.2)$$

Burada;

V_M : Molar hacim (cm^3/mol)

M_T : Çok komponentli cam sisteminin toplam moleküler ağırlığı (g/mol)

ρ : Numunenin yoğunluğu (g/cm^3)

3.3. Numunelerin XRD Analizi

BS cam içerisine değişik oranlarda (ağ.% 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2 ve 5) ilave edilen Cr_2O_3 'ün, camın yapısında herhangi bir kristalleşmeye neden olup olmadığını saptamak için Harran Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda (HÜMEL) bulunan Rigaku-Dmax 2000 model X ışını kırınım (XRD) cihazı kullanıldı. XRD cihazında $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$) kullanılarak 40 kV'lık bir voltaj 30 mA'lık bir anot akımı uygulanarak $2^\circ/\text{dakika}$ tarama hızında ve $2-100^\circ$ açısı aralığında kırınım desenleri belirlendi.

3.4. Numunelerin Elastik Özellikleri

Katkısız ve Cr_2O_3 katkılı BS cam numunelerin elastik özelliklerin belirlenmesinde, Ankara ODTÜ Tahribatsız Muayene Birimi'nde bulunan OLYMPUS Epoch 650 marka ultrasonik ses hızı test cihazı ve osiloskop kullanıldı (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12.). Üretilen cam örneklerin elastik özellikleri için osiloskop yardımıyla ultrasonik ses hızının malzeme içinde gidiş ve geliş süreleri belirlendi. Denklem 3.3. kullanılarak numunelerin boyuna ve enine ultrasonik ses hızları ölçüldü.

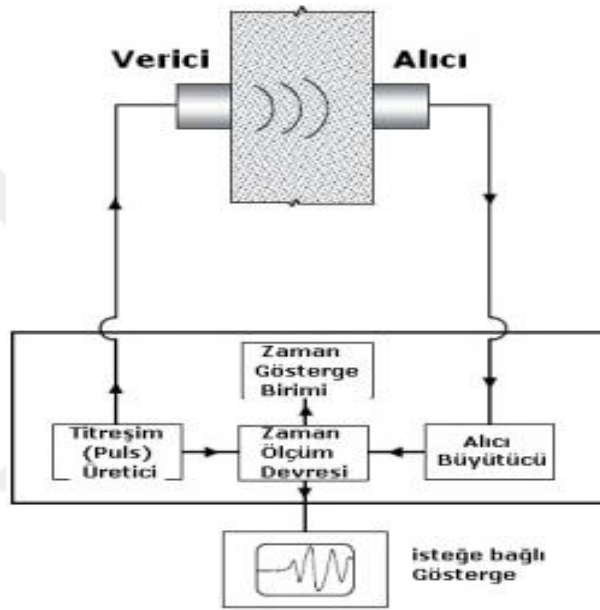
$$U = 2X/\Delta t \quad (3.3)$$

Burada;

U: Ultrasonik ses hızı (m/s)

X: Numunenin alt çeperine olan uzaklık (m)

Δt : Zaman farkı (s)



Şekil 3.11. Ultrasonik ses hızı testinin şematik diyagramı



Şekil 3.12. Ultrasonik ses hızı test cihazı (Osiloskop)

Belirlenen enine ve boyuna ultrasonik ses hızları yardımıyla numunelerin elastik özelliklerinden olan boyuna elastisite modülü Denklem 3.4. kullanılarak belirlendi.

$$L = \rho V_L^2 \quad (3.4)$$

Burada;

L: Boyuna elastisite modülü (Pa)

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

V_L : Boyuna ultrasonik ses dalga hızı (m/s)

Aşağıdaki Denklem 3.5. kullanılarak cam örneklerin kesme modülleri hesaplanmıştır.

$$G = \rho V_T^2 \quad (3.5)$$

G: Kesme modülü (Pa)

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

V_T : Enine ultrasonik ses hızı (m/s)

Cam deney numunelerin elastisite modülü (E) ise aşağıdaki Denklem 3.6. kullanılarak hesaplandı (Telford ve ark., 1993). Elastisite modülü, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değişiminin bir ölçüsüdür.

$$E = \rho V_T^2 \frac{(3V_L^2 - 4V_T^2)}{(V_L^2 - V_T^2)} \quad (3.6)$$

Burada;

E: Elastisite modülü (Pa)

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

V_T : Enine ultrasonik ses hızı (m/s)

V_L : Boyuna ultrasonik ses hızı (m/s)

Poisson oranı (ν) numunelerin enine kısılmanın yük yönündeki boyuna kısılmasına oranı demektir. Numunelerin poisson oranı, Denklem 3.7.'de verilen eşitlik ile bulunmuştur.

$$\nu = \frac{L - 2G}{2(L - G)} \quad (3.7)$$

Burada;

ν : Poisson oranı

L: Boyuna elastisite modülü (GPa)

G: Kesme modülü (GPa)

Hacim modülü ise bir maddenin çevresinde oluşturulan basınca karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Basılabilirlik modülü olarak da bilinir. Örneklerin, hacim modülü ise Denklem 3.8.'de verilen formül ile hesaplandı.

$$K = L - \frac{4G}{3} \quad (3.8)$$

Burada;

K: Hacim modülü (GPa)

L: Boyuna elastisite modülü (GPa)

G: Kesme modülü (GPa)

3.5. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malzeme Laboratuvarındaki AOB Lab. Marka Mikro-Vickers sertlik cihazı kullanılarak, Cr_2O_3 katkı elemanı ve miktarının BS camın oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerine olan etkisi araştırıldı. Malzemelerin mekanik özelliklerinden biri olan sertlik, plastik deformasyona karşı gösterilen direnç olarak bilinir. Katkısız ve Cr_2O_3 katkılı BS cam numunelerin oda sıcaklığındaki mikro sertlikleri Vickers sertlik test yöntemi ile her numune üzerine 5 sn süre ile 1000 gram yük uygulanarak

belirlendi. Her numune üzerinde 5 adet sertlik ölçümü yapıldı ve sertlikler; her bir ölçümde numune yüzeyinde oluşturulan iz üzerindeki diyagonaller yani köşegenler ölçülüp aritmetik ortalaması alınarak aşağıdaki Denklem 3.9. ile hesap edildi.

$$H_V = \frac{1.854P}{d^2} \quad (3.9)$$

Burada;

H_V : Vickers sertliği (kg/mm²)

P: Uygulanan yük (kg)

d: İzin diyagonal uzunluğu (mm)

Kırılma tokluğu çatlaklı bir yapının kırılmaya karşı direncinin bir ölçüsüdür. Gevrek malzemeler relatif olarak düşük kırılma tokluğuna sahiptir yani kolay kırılır. Gevrek malzeme sınıfında olan cam deney numunelerin kırılma toklukları ise Half-Peny-Crack yöntemi ile Vickers sertlik yöntemini kullanarak aşağıdaki Denklem 3.10.'daki formül kullanılarak hesaplanmıştır (Anstis ve ark., 1981). Formülde bulunan çatlak uzunluğu, vickers sertlik cihazından alınan görüntüdeki çatlak boylarının aritmetik ortalamasıdır (Şekil 3.13.).

$$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{H_V} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{C^{3/2}} \right) \quad (3.10)$$

Burada;

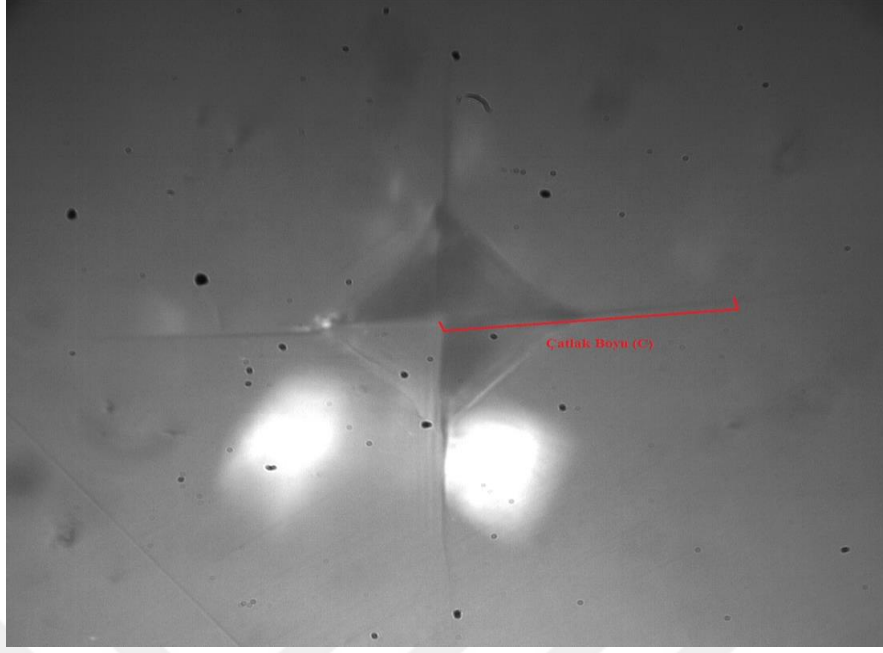
K_{IC} : Kırılma tokluğu (MPa.m^{0.5})

E: Malzemenin elastisite modülü (GPa)

H_V : Malzemenin Vickers sertliği (kg/mm²)

P: Uygulanan yük (kg)

c: Çatlak uzunluğu (m)



Şekil 3.13. Vickers sertlik cihazından alınan sertlik izi ve iz kenarlarındaki çatlaklar

Mekanik özelliklerde son olarak numunelerin gevreklik (kırılganlık) değerleri Denklem 3.11. kullanılarak hesaplanmıştır. Gevreklik, kuvvet karşısında şekil değiştirmemenin bir ölçüsüdür. Camlar gevreklik özelliği yüksek olan malzemelerdir. Gevreklik, sertliğin kırılma tokluğuna oranlanmasıyla bulunur.

$$B = H_V / K_{IC} \quad (3.11)$$

Burada;

B : Gevreklik ($\mu\text{m}^{-1/2}$)

H_V : Vickers sertliği (kg/mm^2)

K_{IC} : Kırılma tokluğu ($\text{MPa.m}^{0.5}$)

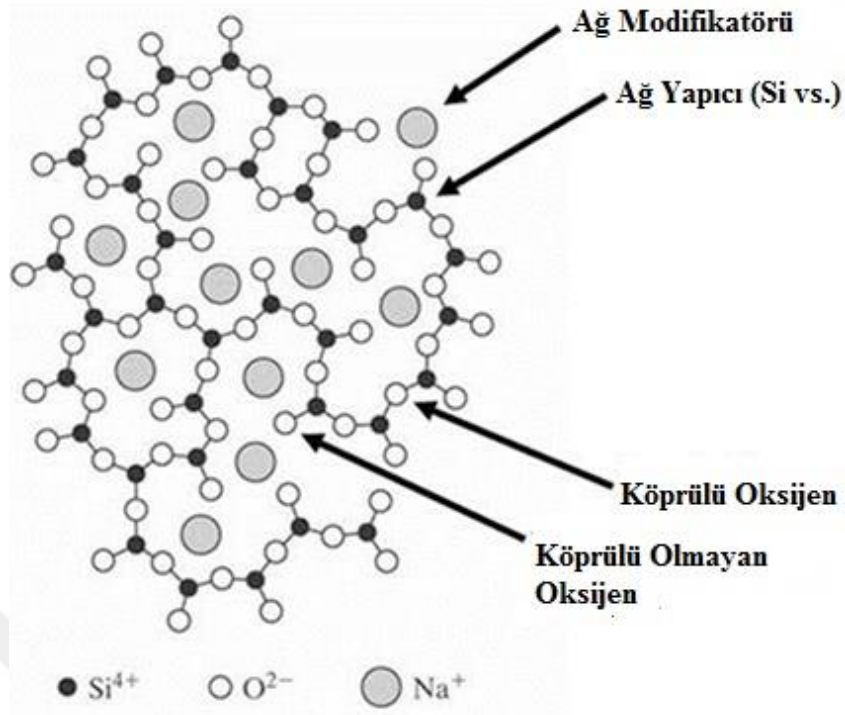
3.6. Numunelerin Köprülü Oksijen Sayılarının Belirlenmesi

Hazırlanan Cr_2O_3 katkılı BS cam numunelerin köprülü oksijen sayıları (KOS) Denklem 3.12. kullanılarak hesaplanmıştır. Camın yapısında ki Silisyum (Si), Bor (B), Alüminyum (Al), Krom (Cr) oksijenle tetrahedral yapı oluşturarak bağ kurar ve camsı yapıyı oluştururlar. Fakat cam kompozisyonunda, ağ modifikatör katyonları

olarak bilinen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} veya Mg^{2+} gibi katyonların varlığı, özellikle Si-O bağlarının bazı kısımlarını kırarak köprü oluşturmayan oksijenler meydana getirir ve tetrahedral camsı silikat ağını bozar. Köprü oluşturmayan oksijenler, Si gibi iki tetrahedral katyon veya ağ oluşturunca atomu birbirine bağlamayan oksijen atomlarıdır. Köprü oluşturmayan oksijen, ağ oluşturunca atomlar ve ağ değiştirici katyonlar arasında nispeten zayıf bağlantılar sağlar (Benoit ve ark., 2001). Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan cam numunelerde Sodyum (Na) ağ bozucu, değiştirici rolündedir. Böylece yukarıdaki durumlar dikkate alındığında, hazırlanan kimyasal kompozisyona göre KOS sayısının hesaplanmasında kullanılan denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$KOS = \frac{4(Si + Al + B) - (2Na - Al - Cr)}{Si + B + Al} \quad (3.12)$$

Denklem 3.12.'de verilen KOS köprülü oksijen sayısına, element simgeleri ise numunelerin kimyasal formülündeki aynı elementin molar fraksiyonuna karşılık gelmektedir. Şekil 3.14.'te ise 2 boyutlu olarak ağ oluşturunca ve ağ modifikatörleri gösterilmektedir.



Şekil 3.14. İki boyutlu ağ oluşturu ve modifikatörü bulunan tetrahedral yapı

Şekil 3.14’de görüldüğü üzere ağ modifikatörleri (Na gibi), Ağ yapıcı (Si gibi) atomlara bağlanan oksijen atomlarının arasına girerek, aralarındaki bağı koparır. Tek bir ağ yapıcıya bağlanan oksijen atomuna köprülü olmayan oksijen atomu denir.

3.7. Numunelerin Atomik Paketleme Yoğunluğunun Hesaplanması

Birim hücrede atomların işgal ettiği alan anlamına gelen atomik paketleme yoğunluğu (C_g) ise Denklem 3.13. ile hesaplanmıştır.

$$C_g = \frac{\sum f_i V_i}{\frac{\sum f_i M_i}{\rho}} \quad (3.13)$$

Burada;

C_g : Atomik paketlenme yoğunluğu

f_i : Molar fraksiyon

M_i : Molar kütle

ρ : Yoğunluk

V_i : İyonun işgal ettiği hacim

Denklem 3.13.'te bulunun V_i , A_xB_y formülüne sahip bileşikler için aşağıdaki Denklem 3.14. ile bulunur.

$$V_i = \frac{4}{3} \pi N \left(x r_A^3 + y r_B^3 \right) \quad (3.14)$$

Burada;

V_i : İyonun işgal ettiği hacim

N : Avogadro sayısı

r_A, r_B : İyonik yarıçaplar

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

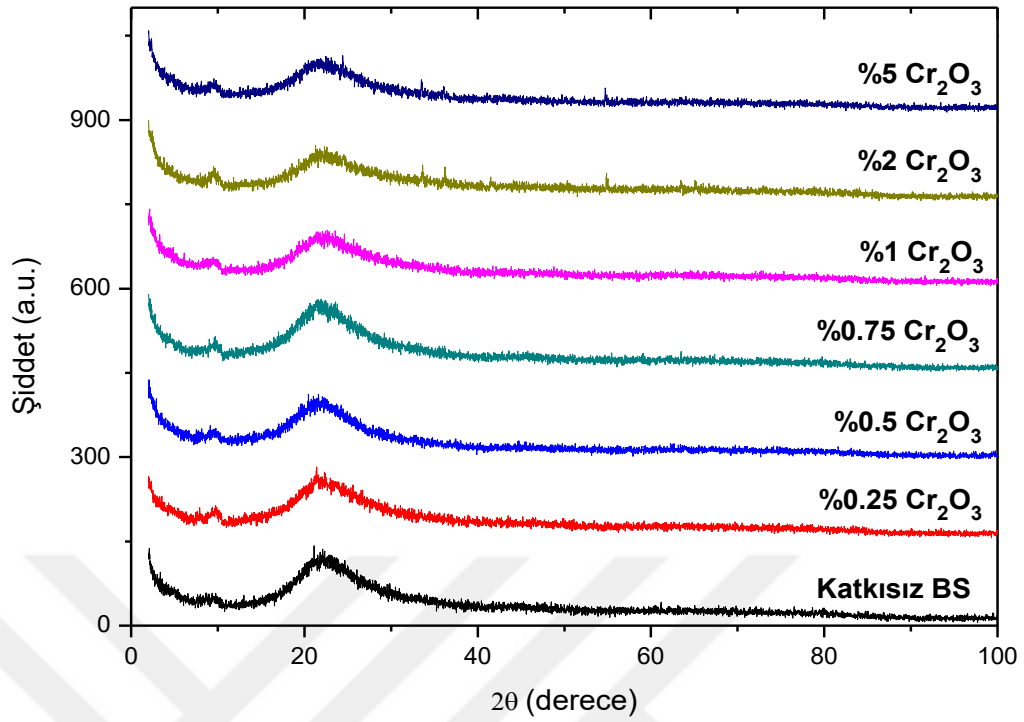
Bu çalışmada; BS camlara değişik oranlarda Cr_2O_3 ilavesinin elastik, fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Farklı Cr_2O_3 katkı oranlarında hazırlanan BS cam numunelerin kompozisyonu aşağıda Çizelge 4.1.'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Cr_2O_3 katkılı BS numunelerin kompozisyonları

Katkı Oranı (ağ.%)	SiO_2	B_2O_3	Na_2O	Al_2O_3	Cr_2O_3
Katkısız BS	0.795	0.13	0.05	0.025	0
%0.25 Cr_2O_3	0.793	0.1297	0.0499	0.025	0.0025
%0.5 Cr_2O_3	0.791	0.1294	0.0498	0.0249	0.005
%0.75 Cr_2O_3	0.7891	0.129	0.0496	0.0248	0.0074
%1 Cr_2O_3	0.7871	0.1287	0.0495	0.0248	0.0099
%2 Cr_2O_3	0.7794	0.1275	0.049	0.0245	0.0196
%5 Cr_2O_3	0.7571	0.1238	0.0476	0.0238	0.0476

4.1. XRD Analiz Sonuçları

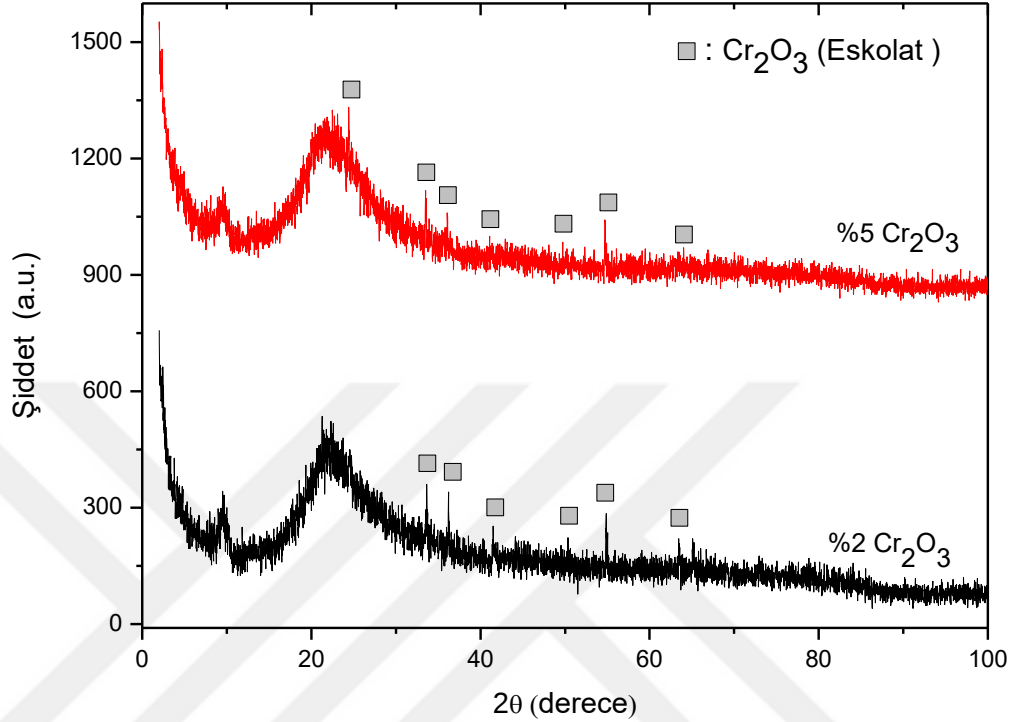
Bu çalışmada, ilk olarak farklı oranlarda hazırlanan Cr_2O_3 numunelerinin XRD sonuçları incelenmiştir. Şekil 4.1.'de katkısız ve Cr_2O_3 katkılı BS cam örneklerin XRD desenlerinin birbirleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.1.'den anlaşılacağı üzere % 0–1 Cr_2O_3 katkı aralığında silikanın camsı amorf yapısı gözlemlenmiştir. Bu oranlarda atom ve moleküllerin belirli bir örgü düzenine sahip olmadığı görülmüştür. Bu düzensiz, formsuz yapı camların en önemli belirgin özelliğidir (Ruland, 1969). BS cam içerisine ağırlıkça % 2 ile 5 Cr_2O_3 ilave edildiğinde ise camsı yapının içerisinde bazı kristal piklerinin oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Katkısız ve Cr_2O_3 katkılı BS numunelerin XRD desenleri

Aşağıda Şekil 4.2.'de %2 ve 5 Cr_2O_3 katkılı BS örneklerinin XRD desenleri verilmektedir. Şekil 4.2.'de, XRD desenlerinde bazı kristal fazların olduğu pikler görülmektedir. Ağırlıkça %2 ve 5 Cr_2O_3 katkılı BS numunelerde görülen bu piklerin, Pdf No 00-038-1479'a karşılık gelen Eskolat (Cr_2O_3) kristal fazına ait olduğu tespit edilmiştir. Cr_2O_3 'in genel olarak cam içerisinde çekirdekleşmeyi destekleyen maddelerden olduğu bilinmektedir (Yaowakulpattana ve ark., 2015). Yine, Karamanov ve arkadaşları (1999), Cr_2O_3 'in demir içerikli camlarda çok etkili bir çekirdek oluşturucu olduğunu fark etmişlerdir. Özellikle kütlece 0–1% katkı oranlarında, katkı oranı arttıkça çekirdeklenmeden dolayı kristal yapının arttığını gözlemlemişlerdir. Li ve arkadaşları (2017), Lityum oksit katkılı camın yapısına Cr_2O_3 ilave ederek kristalleşme ve mikroyapıya etkilerini incelemişler. Cr_2O_3 katkısının lityum oksit katkılı camların kristalleşmesine neden olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca içeriğinde ağırlıkça %3 Cr_2O_3 bulunan camların, çok iyi cam-seramik özellikleri sergilediği sonucuna varılmıştır. Omar ve arkadaşları (1991) ise kuvars, kum-dolomit-magnezit karışımlarında Cr_2O_3 'ün piroksen kristalleşmesini

desteklediğini ileri sürmüşlerdir. Araştırmacıların birçoğu Cr_2O_3 'ün camları, kristalleştirilmesinde etkin ve verimli bir geçiş metali olduğunu savunmaktadırlar.



Şekil 4.2. % 2 ve 5 Cr_2O_3 katkılı BS numunelerin XRD deseni

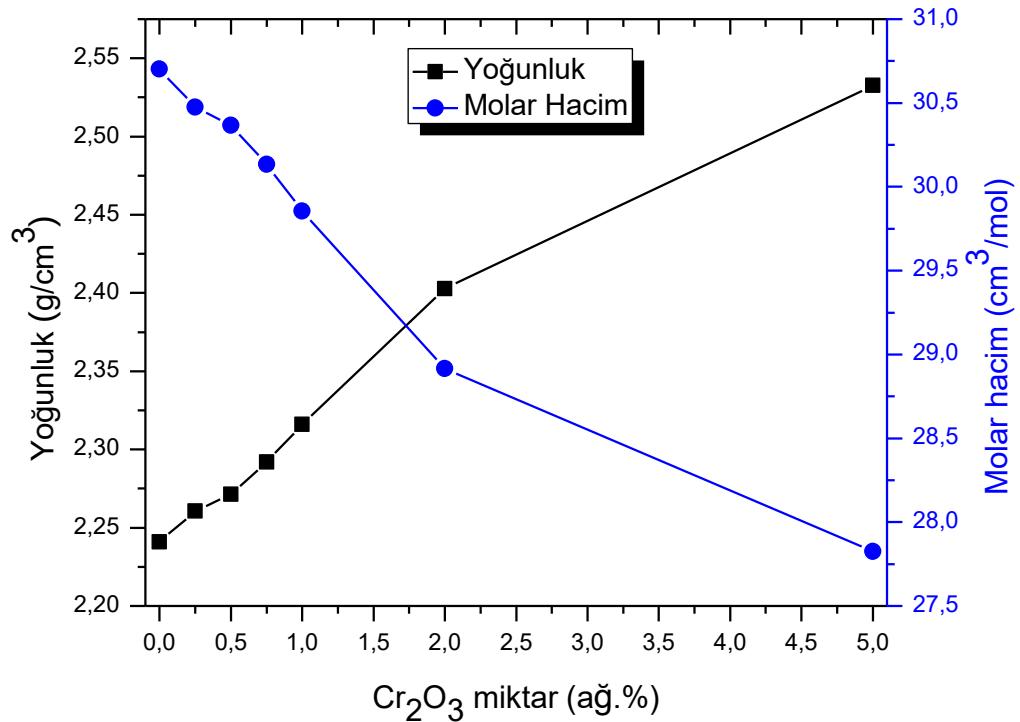
4.2. Yoğunluk Sonuçları

Numunelerin yoğunluğu Arşimed prensibi ile belirlenmiş olup, formülü Denklem 3.1.'de verilmiştir. Molar hacim ise Denklem 3.2.'de verilen formülle belirlenmiş olup, formülde M_T olarak verilen çok komponentli cam sisteminin toplam moleküler ağırlığı, Çizelge 3.1.'de verilen BS cam ($79.5\text{SiO}_2-13\text{B}_2\text{O}_3-5\text{Na}_2\text{O}-2.5\text{Al}_2\text{O}_3$) ve Cr_2O_3 'ün molekül ağırlıklarına göre hesaplanmıştır. Elde edilen yoğunluk ve molar hacim değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Krom Oksit katkılı borosilikat camların yoğunluk ve molar hacimleri

Katkı oranı (ağ.%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Molar hacim (cm ³ /mol)
Katkısız BS	2.24	30.70
%0.25 Cr ₂ O ₃	2.26	30.47
%0.5 Cr ₂ O ₃	2.27	30.37
%0.75 Cr ₂ O ₃	2.29	30.13
%1 Cr ₂ O ₃	2.32	29.85
%2 Cr ₂ O ₃	2.40	28.92
%5 Cr ₂ O ₃	2.53	27.82

Cr₂O₃ katkılı BS cam örneklerin katkı miktarı ile yoğunluk ve molar hacimleri arasındaki ilişki Şekil 4.3.'de verilmiştir. Çizelge 4.2. ve Şekil 4.3'den anlaşılabacağı gibi cam kompozisyonunda Cr₂O₃ miktarı arttıkça, BS camın yoğunluğunda orantılı bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, Cr₂O₃ yoğunluğunun (5.22 g/cm³) (Santic ve ark., 2007) BS camının yoğunluğundan (2.24 g/cm³) fazla olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, köprülü oksijen sayısının artması da yoğunluğun artmasına neden olan bir başka faktör olarak düşünülmektedir (Thirumaran ve Prakash, 2015). Çizelge 4.2.'den görüldüğü üzere katkısız BS camının yoğunluğu 2.24 g/cm³ iken, %5 Cr₂O₃ katkılı BS camının yoğunluğu ise 2.53 g/cm³ değerine çıkmıştır.



Şekil 4.3. Katkı oranlarına göre yoğunluk-molar hacim ilişkisi

Molar hacim ise, Cr_2O_3 katkı oranının artmasıyla birlikte aynı zamanda yoğunluk ile ters orantılı olarak azalmıştır. Molar hacim, katkısız BS camda $30.70 \text{ cm}^3/\text{mol}$ iken %5 Cr_2O_3 katkılı BS camda ise $27.82 \text{ cm}^3/\text{mol}$ değerine düşmüştür. Molar hacmin yoğunlukla ilişkisi incelendiğinde, yoğunluğu artan numunelerin atomlar arası mesafesi kısalır. BS cam yapısına giren Cr_2O_3 'ün atomlar arası bağ mesafesinin kısılmasına neden olmuştur. Molar hacim, 1 mol maddenin kapladığı hacim olarak tanımlandığından, atomların azalan mesafesinden dolayı, molar hacim de azalmış olur. Molar hacim, iyonik yarıçapla da ilişkilidir (Shelby, 1997). Genellikle molar hacim iyonik yarıçap ile doğru orantılıdır. Bu nedenle kromun sahip olduğu iyonik yarıçapın (0.52 Å), silisyum (0.4 Å) ve borun (0.23 Å) sahip olduğu iyonik yarıçaptan daha büyük olmasından dolayı molar hacmin artması beklensede, yoğunluk değerlerinde meydana gelen büyük artıştan dolayı molar hacim katkı oranıyla birlikte azalmıştır. Cr-O ve Si-O mesafesi sırasıyla 1.61 ve 1.62 Å 'dır (Meejitpaisan ve ark., 2012). Cr_2O_3 'ün camsı BS ağ yapısına girerek daha kısa bağlar oluşturması nedeniyle molar hacimde bir miktar azalmaya neden olmuştur.

4.3. Elastik Özellikler

Numunelerin elastik özelliklerini tespit etmek için osiloskop cihazı ile enine ve boyuna ultrasonik ses hızları ölçüldü. Denklem 3.3.'den hesaplanarak elde edilen ultrasonik ses hızları Çizelge 4.3.'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. Numunelerin katkı oranlarına göre ultrasonik ses hızları

Katkı oranı (ağ. %)	Boyuna ultrasonik ses hızı (m/s)	Enine ultrasonik ses hızı (m/s)
Katkısız BS	5520.32	3239.52
%0.25 Cr_2O_3	5536.03	3241.98
%0.5 Cr_2O_3	5745.69	3484.18
%0.75 Cr_2O_3	5857.14	3527.83
%1 Cr_2O_3	5974.55	3542.86
%2 Cr_2O_3	6331.34	3694.30
%5 Cr_2O_3	6337.85	3740.42

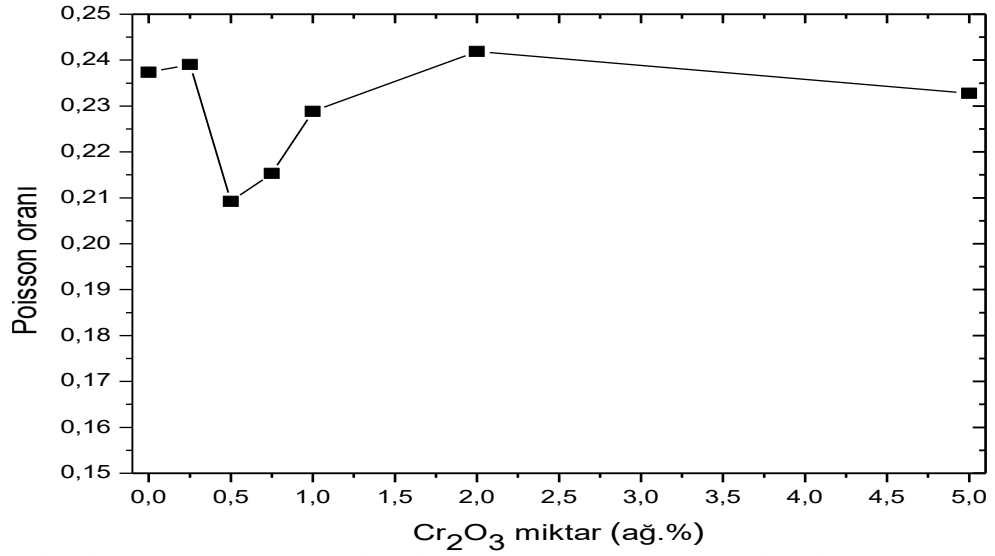
Cr_2O_3 katkısı ile BS camın boyuna ve enine ultrasonik ses hızlarında bir artış meydana gelmiştir. Genellikle ultrasonik ses hızının artması, köprülü oksijen sayısının artmasıyla ilgilidir (Thirumaran ve Prakash, 2015; Gaafar ve Marzouk,

2007). Çizelge 4.3.'de verilen ultrasonik ses hızları, Denklem 3.4. ve Denklem 3.5.'de verilen formüllerde yerine konularak boyuna ve kesme elastisite modülleri bulundu. Bulunan boyuna elastisite ve kesme modülleri ise Denklem 3.6–3.8.'de verilen formüllerde yerlerine konularak, poisson oranı (ν), elastisite modülü (E) ve hacim modülü (K) tespit edildi. Aşağıda Çizelge 4.4.'de katkısız ve Cr_2O_3 katkılı BS örneklerin elastik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 4.4. Numunelerin elastik özellikleri

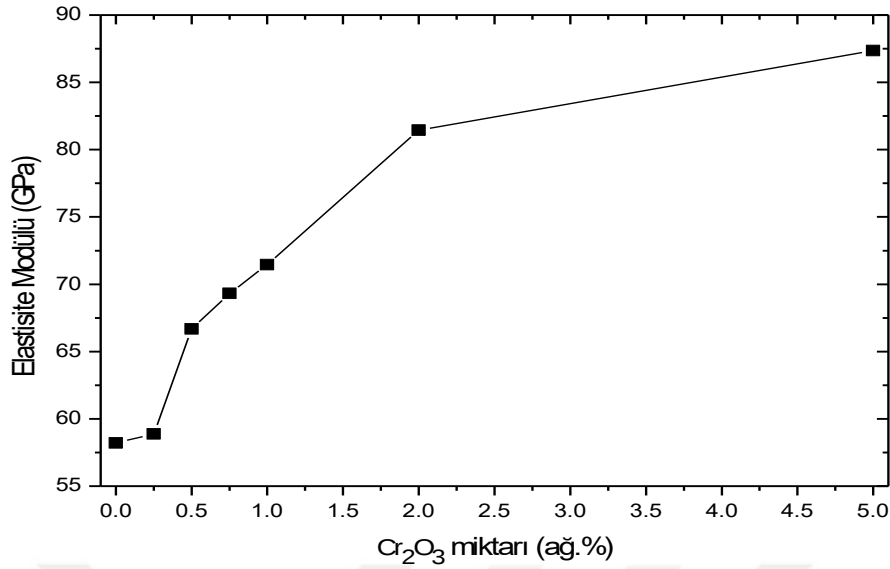
Katkı oranı (ağ.%)	Elastisite modülü (GPa)	Kesme modülü (GPa)	Poisson oranı	Hacim modülü (GPa)
Katkısız BS	58.20	23.52	0.24	36.93
%0.25 Cr_2O_3	58.88	23.76	0.24	37.60
%0.5 Cr_2O_3	66.68	27.57	0.21	38.22
%0.75 Cr_2O_3	69.33	28.52	0.22	40.59
%1 Cr_2O_3	71.44	29.07	0.23	43.91
%2 Cr_2O_3	81.45	32.79	0.24	52.59
%5 Cr_2O_3	87.36	35.43	0.23	54.49

Şekil 4.4.'de katkı oranlarına göre numunelerin poisson oranlarındaki değişim verilmiştir. Cam örneklerin hesaplan poisson oranları yapılan literatür taramalarında bulunan sonuçlar ile bir benzerlik göstermektedir. Katkı oranları ile poisson oranı arasındaki ilişki konusunda ise net bir şey söylemek mümkün değildir. Genellikle poisson oranı atomik paketleme faktörüyle ilişkilidir ve doğru orantılıdır (Rouxel, 2007). Ancak metalik katkılı camlarda poisson oranı geniş bir aralıkta yer alır. Örnek verilecek olursa Greaves ve arkadaşlarının (2011) yaptığı çalışmada Fe, Ti ve Pd temelli metalik camların atomik paketleme yoğunluğu birbirlerine çok yakın (0.63-0.65) bulunmasına rağmen, poisson oranları (0.28-0.43) çok geniş bir aralığa yayılmıştır.



Şekil 4.4. Katkı oranlarına göre poisson oranı değişim grafiği

Şekil 4.5.'de Cr₂O₃ katkı miktarı ile BS camın elastisite modülündeki değişim verilmektedir. BS camın elastisite modülü değerlerinde, Cr₂O₃ katkı oranına bağlı olarak bir artış gözlemlenmiştir. Elastisite modülü, malzeme rijitliğinin bir ölçüsüdür. Cr₂O₃, mohs sertlik skalasında 8-8.5 dereceye sahiptir. Literatürde Krom'un Young modülü 279 GPa olarak bulunmuştur (URL-11, 2017). Cr₂O₃ ilavesiyle BS camın elastisite modülünün doğru orantılı olarak artması, Cr₂O₃'in yüksek sertliği ile olabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda, elastisite modülü kimyasal bağlar ile doğrudan ilişkilidir. Atomlar arasındaki bağ kuvveti ne kadar büyük olursa, malzeme o kadar zor şekil değiştirir. Cr₂O₃ katkısı ile BS camın elastisite modülündeki bu artış; Cr₂O₃ katkısı ile BS camın atomik paketlenme yoğunluğunda ve köprülü oksijen sayılarında meydana getirdiği artış ile ilişkilendirilmektedir.



Şekil 4.5. Katkı oranlarına göre elastisite modülündeki değişim

Elastik özelliklerde son olarak numunenin hacim modülü incelenmiştir. Malzemenin sıkıştırılmaya karşı gösterdiği dirence hacim modülü denir. Numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde Cr₂O₃ katkı oranı arttıkça hacim modülünün de arttığı gözlemlenmiştir (Çizelge 4.4). Elastik özelliklerde görülen bu artışın temel nedeni sonraki bölümlerde (Bölüm 4.5) incelenen atomik paketlenme yoğunluğuyla doğrudan ilişkilidir (Rouxel, 2007). Cr₂O₃ ilavesi ile BS camın atomik paketlenme yoğunluğunda meydana gelen artış ile hacim modülünde bir artışa neden olmuştur.

4.4. Sertlik, Kırılma Tokluğu ve Gevreklik Sonuçları

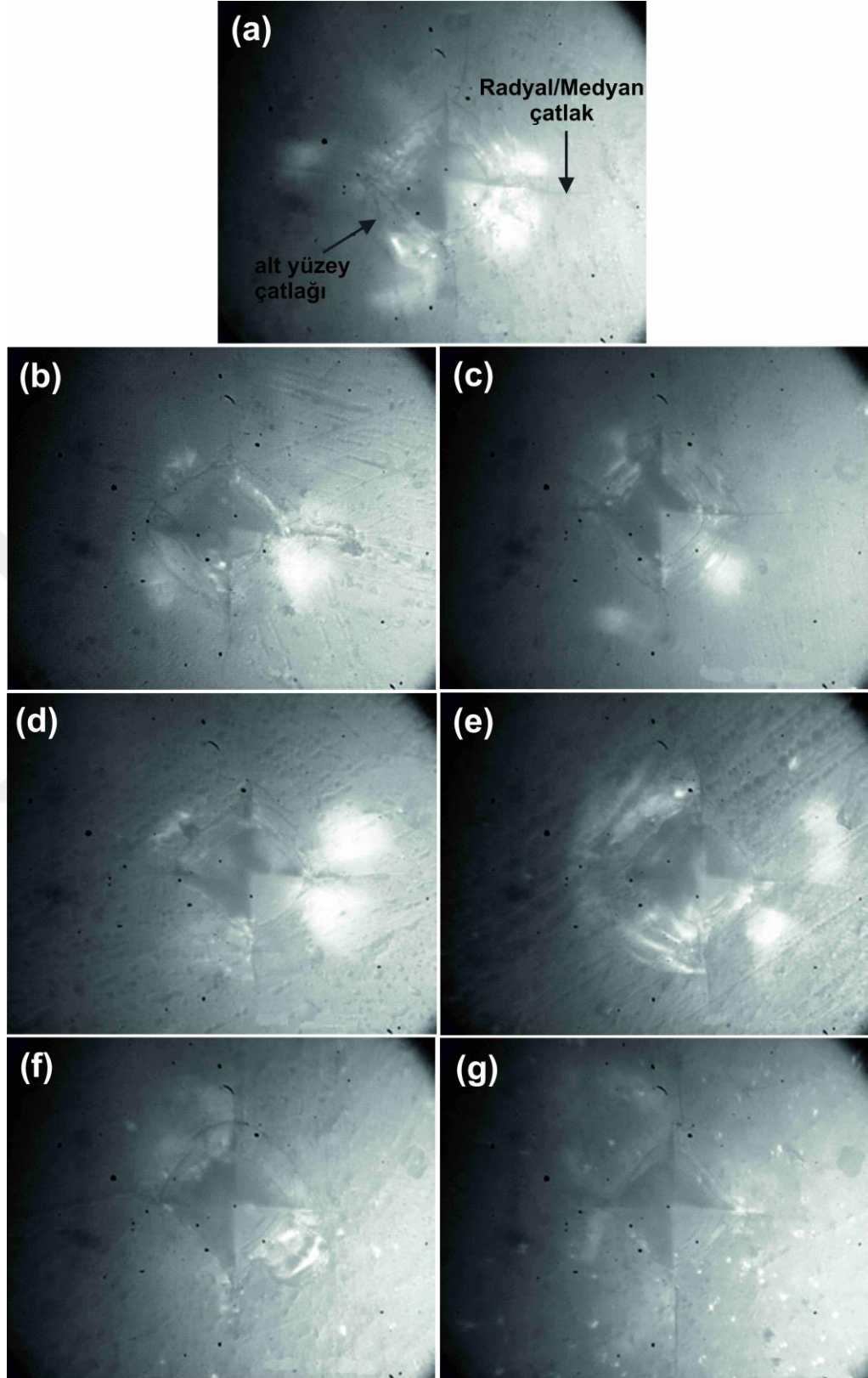
Numunelerin sertlik değerleri Mikro-Vickers sertlik ölçüm cihazıyla tespit edilmiştir. Sertlik ölçümleri, 1000 gram yük 5 sn uygulanarak yapıldı. Çizelge 4.5.'de numunelerin Cr₂O₃ katkı miktarına göre BS camın sertlik ve kırılma tokluğu değerlerindeki değişim verilmektedir. BS camların sertlik değerlerinde, Cr₂O₃ katkı oranındaki artışla birlikte paralel bir artış meydana gelmiştir. Bu durumun, Cr₂O₃'in mohs sertlik skalasında 8-8.5 dereceye sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zaten çok uzun zamanlardan beri Cr₂O₃'in, en sert oksit olduğu bilinmektedir (Samsonov, 1982). Ayrıca, BS cam içerisinde Cr₂O₃ miktarı arttıkça Na₂O oranının azalıp yerine ağ yapıcı Cr₂O₃'in yapıya girmesi nedeniyle, artan

köprülü oksijen sayısında (KOS) rijitliği arttırmıştır. Sertliğin artması ise bu rijitlikteki bir artışın sonucu olabileceği düşünülmektedir (Nabhan ve ark., 2016).

Çizelge 4.5. Numunelerin sertlik, kırılma tokluğu ve gevreklik değerleri

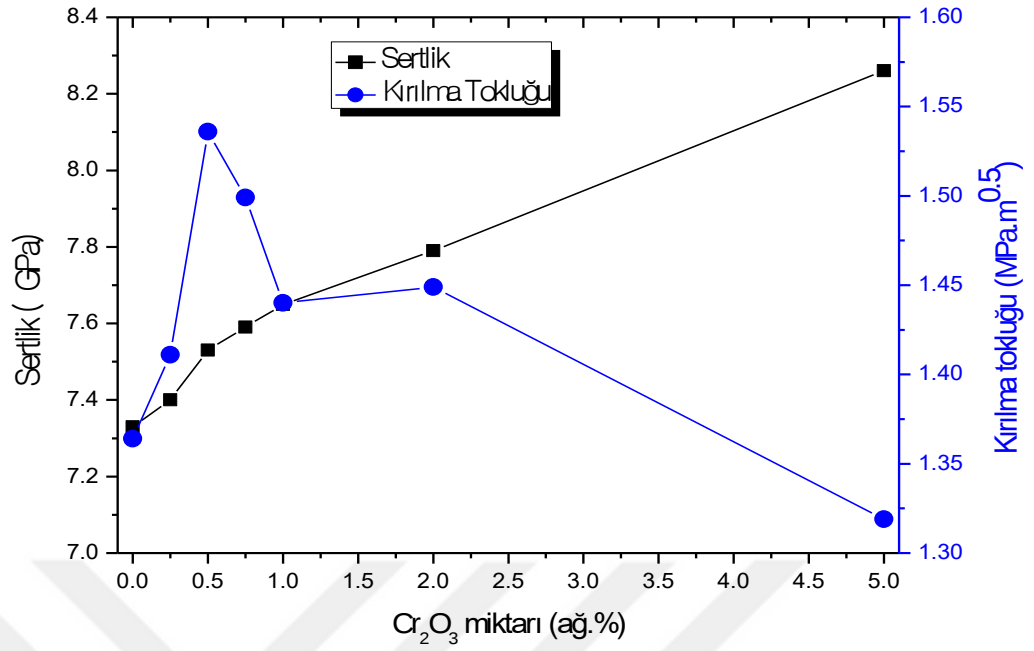
Katkı Oranı (ağ.%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (GPa)	Kırılma Tokluğu (Mpa.m ^{0.5})	Gevreklik (µm ^{-1/2})
Katkısız BS	2.24	7.33	1.36	5.37
%0.25 Cr ₂ O ₃	2.26	7.40	1.41	5.24
%0.5 Cr ₂ O ₃	2.27	7.53	1.54	4.90
%0.75 Cr ₂ O ₃	2.29	7.59	1.50	5.06
%1 Cr ₂ O ₃	2.32	7.65	1.44	5.31
%2 Cr ₂ O ₃	2.40	7.79	1.45	5.38
%5 Cr ₂ O ₃	2.53	8.26	1.32	6.26

Şekil 4.6.'da numunelerin Vickers çentik izleri ve kenarlarındaki çatlakların resimleri gösterilmektedir. Şekil dikkatli incelendiğinde, Cr₂O₃ katkı oranı arttıkça çentik izlerinde bir miktar küçülme olduğu görülmektedir. Çatlak boyları ise % 0.5 Cr₂O₃ katkı oranına kadar azalmış ve % 0.75–5 katkı oranlarda ise çatlak boylarında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Çentik izleri kenarlarında oluşan bu çatlakların genellikle radyal ve medyan tipi çatlaklar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. Cam numunelerin 10 N yük altındaki Vickers çentik izleri ve oluşan çatlakların resimleri; (a) katkısız, (b) % 0.25 Cr_2O_3 , (c) % 0.5 Cr_2O_3 , (d) % 0.75 Cr_2O_3 , (e) % 1 Cr_2O_3 , (f) % 2 Cr_2O_3 , (g) % 5 Cr_2O_3 katkılı BS cam örnekler

Şekil 4.7.'de BS camların Cr_2O_3 katkı oranlarına göre, sertlik ve kırılma tokluklarındaki meydana gelen değişim verilmiştir. Numunelerin kırılma toklukları ise Denklem 3.10. kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemde ki çatlak boyları, Vickers sertlik ölçümlerinin köşelerinde oluşan çatlaklardır. Ölçümlerde, yeteri kadar uzun olmayan çatlak boyları olan örneklerde ölçümler tekrarlanmıştır. Çünkü yeteri kadar gelişmeyen çatlaklar, doğru olmayan sonuçlar verir (Barlet ve ark., 2015). Kato ve ark. (2010) çatlama direncinin Vickers sertliğiyle açık bir ilişkisi olmadığını tespit etmişlerdir. Sertlik ve kırılma tokluğu ölçüm sonuçları, % 0.25 ve 0.5 Cr_2O_3 katkı miktarında, BS camın kırılma tokluğunda bir artış olduğunu göstermiştir. Fakat % 0.75 ve diğer katkı oranlarında ise, kırılma tokluğunda bir miktar azalma olduğunu göstermiştir. Kırılma tokluğu, cam malzemelerde Si-O-Si bağlarıyla ilişkilidir. BS camlarda, yapıya Cr_2O_3 ilavesi camsı ağı polimerizasyonunu arttırarak, Si-O-Si bağlarının yaklaşmasını sağlar. Bu polimerize yapının mikro çatlakların yayılmasını engelleyerek kırılma tokluğunun artmasına neden olduğu düşünülmektedir (Wang ve Cheng, 2014). Ayrıca, % 0–0.5 Cr_2O_3 katkılı BS cam örneklerde oluşan çentiklerin etrafında tabakalaşma daha net görülmektedir (Şekil 4.6-a-c.). Yani çatlamaya, kırılmaya karşı bir direnç söz konusudur. Bunun sonucu olarak kırılma tokluğunun artış göstermiş olabileceği düşünülmektedir. Fakat % 0.75–5 Cr_2O_3 katkı aralığındaki örneklerin çentiklerinde ise tabakalaşmada giderek bir azalma olmuş ve bununla birlikte çentik çatlak boyları daha uzun elde edilmiştir (Şekil 4.6-d-g). Bunun nedeni ise Cr_2O_3 katkı miktarının artışı ile birlikte köprülü oksijen sayısının artarak camın rijitliğini ve sertliğini arttırmasıdır.



Şekil 4.7. Katkısız ve Cr₂O₃ katkılı BS Numunelerin sertlik ve kırılma toklukları

Gevreklik değeri, sertlik ve çatlak başlatma eğilimi ile ilişkilidir (Narayanan ve Shashikala, 2015). Ancak % 0.5 oranına kadar kırılma tokluğunda görülen aşırı yükseliş, gevreklik değerinin azalmasına neden olmuştur. % 0.75 ve daha yüksek katkı oranlarında ise sertliğin artmaya devam etmesinden dolayı, gevrekliğin de arttığı düşünülmektedir.

4.5. Köprülü Oksijen Sayısı ve Atomik Paketleme Yoğunluğu Sonuçları

Çizelge 4.6.'da Cr₂O₃ katkı oranına göre BS camların köprülü oksijen sayılarındaki değişimi verilmiştir. Numunelerin köprülü oksijen sayıları, Denklem 3.12. kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6. Katkı oranına göre köprülü oksijen sayıları (KOS) değerleri

Katkı Oranı (Ağ.%)	Köprülü oksijen sayıları (KOS)
Katkısız BS	3.921
%0.25 Cr ₂ O ₃	3.924
%0.5 Cr ₂ O ₃	3.926
%0.75 Cr ₂ O ₃	3.929
%1 Cr ₂ O ₃	3.932
%2 Cr ₂ O ₃	3.942
%5 Cr ₂ O ₃	3.974

Çizelge 4.6.'da görüldüğü üzere SiO₂ tetrahedrallerde ki KOS sayısı, Cr₂O₃ katkısı ile artmıştır. Reddy ve arkadaşları (2006), yaptıkları bir çalışmada mol'ce en fazla % 0.1 oranında Cr₂O₃ iyonlarının ağ modifikatörü olarak görev yaptığı, daha yüksek oranlarda ise Cr₂O₃ iyonlarının ağ yapıcı olarak görev yaptığını öne sürmüşlerdir. Bu yüzden bu artışın nedeni Cr₂O₃ katkı oranı artarken ağ yapıcı atomların fraksiyonunun artması ve ağ modifikatörü görevi gören sodyumun (Na) fraksiyonunun azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.7.'de BS camların atomik paketleme yoğunluğunun Cr₂O₃ katkı oranlarına göre değişimi verilmiştir. Örneklerin atomik paketlenme yoğunlukları Denklem 3.13. kullanılarak hesaplanmıştır.

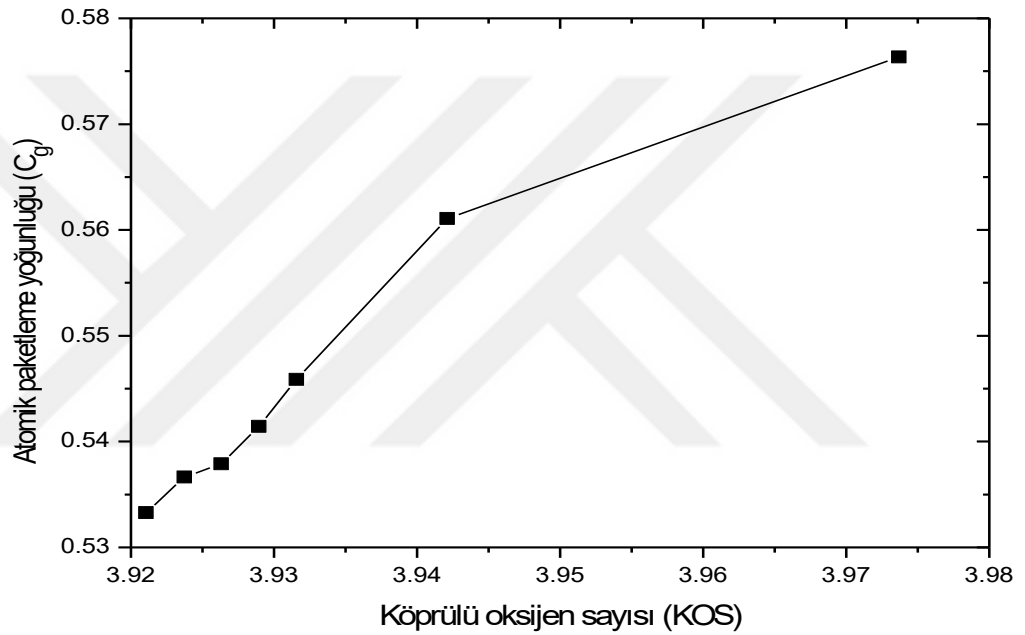
Çizelge 4.7. Katkı oranına göre örneklerin atomik paketlenme yoğunlukları

Katkı oranı (Ağ.%)	Atomik paketleme yoğunluğu (C _g)
Katkısız BS	0.533
%0.25 Cr ₂ O ₃	0.537
%0.5 Cr ₂ O ₃	0.538
%0.75 Cr ₂ O ₃	0.541
%1 Cr ₂ O ₃	0.546
%2 Cr ₂ O ₃	0.561
%5 Cr ₂ O ₃	0.576

Çizelge 4.7.'de görüldüğü üzere atomik paketleme yoğunluğu katkı oranıyla birlikte artış göstermiştir. Bu artışın, kromun sahip olduğu iyonik yarıçapın (0.52 Å), silisyum (0.4 Å) ve borun (0.23 Å) sahip olduğu iyonik yarıçaptan daha fazla

olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca kromun oksijenle olan bağlanma enerjisinin (461 kJ/mol) silisyumun oksijenle olan bağlanma enerjisinden (799.6 kJ/mol) çok daha düşük olması bu sonucu destekler niteliktedir (Luo, 2009). Bu yüzden Cr_2O_3 katkısı ile BS camlarında sıklaştırma miktarını arttırarak, atomik paketlenme yoğunluğunu arttırdığı düşünülmektedir.

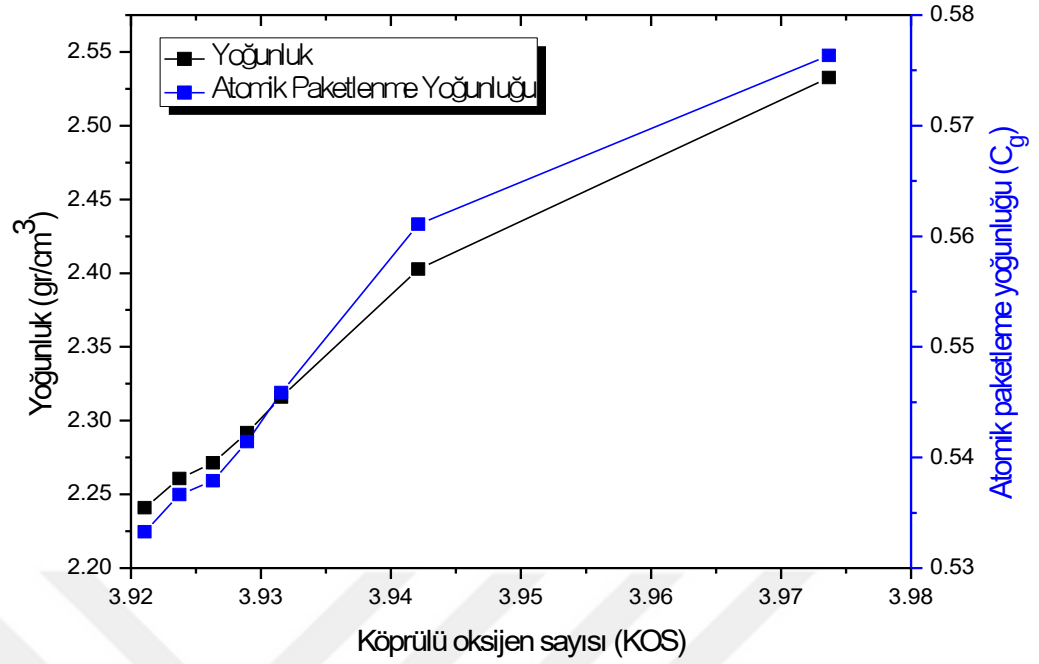
Şekil 4.8.'de Cr_2O_3 katkılı numunelerin köprülü oksijen sayısına (KOS) göre değişen atomik paketlenme yoğunluğunun (C_g) grafiği verilmektedir.



Şekil 4.8. Cr_2O_3 katkılı BS cam numunelerin köprülü oksijen sayısına göre atomik paketlenme yoğunluğunun değişimi

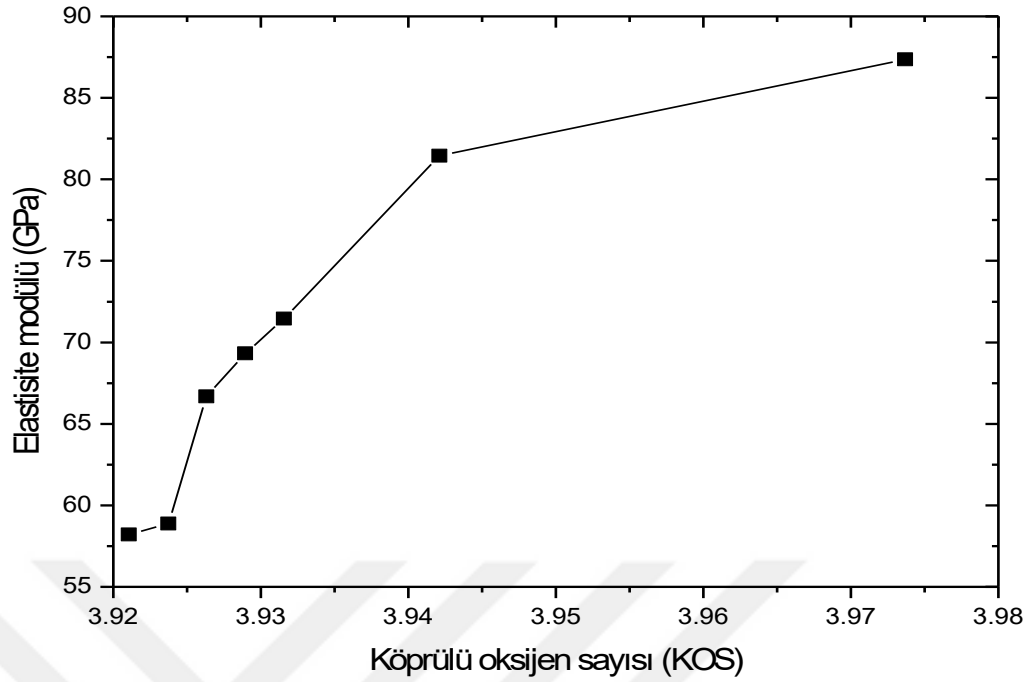
Şekil 4.8.'de görüldüğü üzere katkı oranı ile köprülü oksijen sayısı ve atomik paketlenme yoğunluğu arasında doğru orantı söz konusudur. Yani, katkı oranı arttıkça köprülü oksijen sayısı ve atomik paketlenme yoğunluğu da artmıştır.

Şekil 4.9.'da Cr_2O_3 katkılı BS numunelerin köprülü oksijen sayısı ile yoğunluk ve atomik paketlenme yoğunluğu arasındaki ilişki verilmektedir.



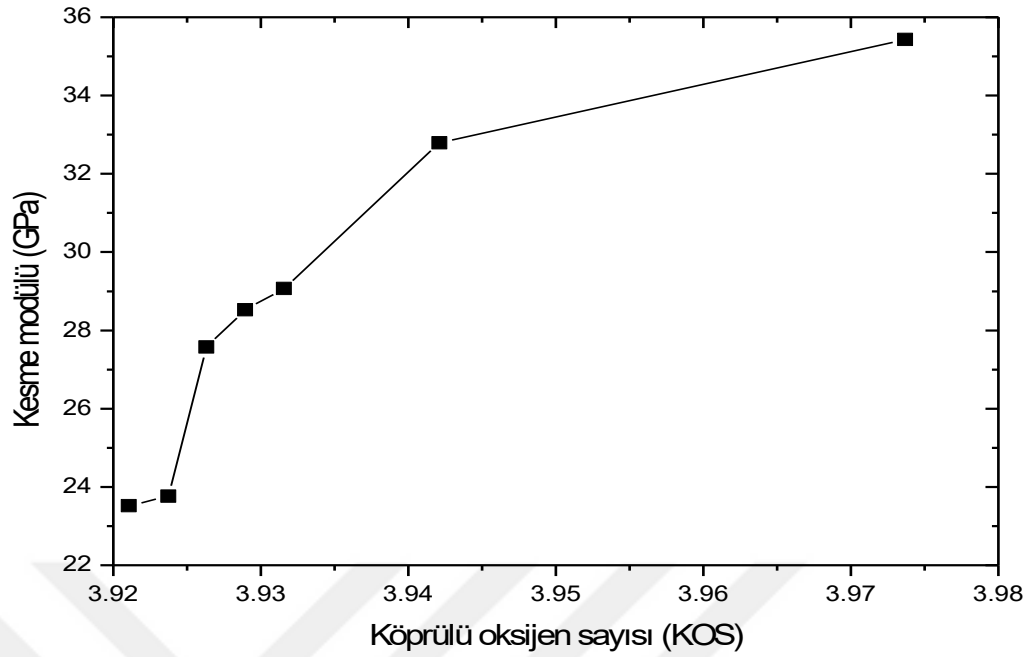
Şekil 4.9. Cr_2O_3 katkılı numunelerin köprülü oksijen sayıları ile yoğunluk ve atomik paketlenme yoğunluğu arasındaki ilişki

Şekil 4.9.'dan anlaşılacağı üzere yoğunluk ve atomik paketlenme yoğunluğunun arasında bir doğru orantı olduğu, birbirine yakın grafik sonuçları verdiği görülmektedir. Thiruraman ve Prakash (2015), KOS ile yoğunluk arasında bir doğru orantı olduğunu ileri sürmüştür. Şekil 4.10.'da Cr_2O_3 katkılı BS cam numunelerin elastisite modülünün köprülü oksijen sayısına göre değişimi gösterilmektedir.

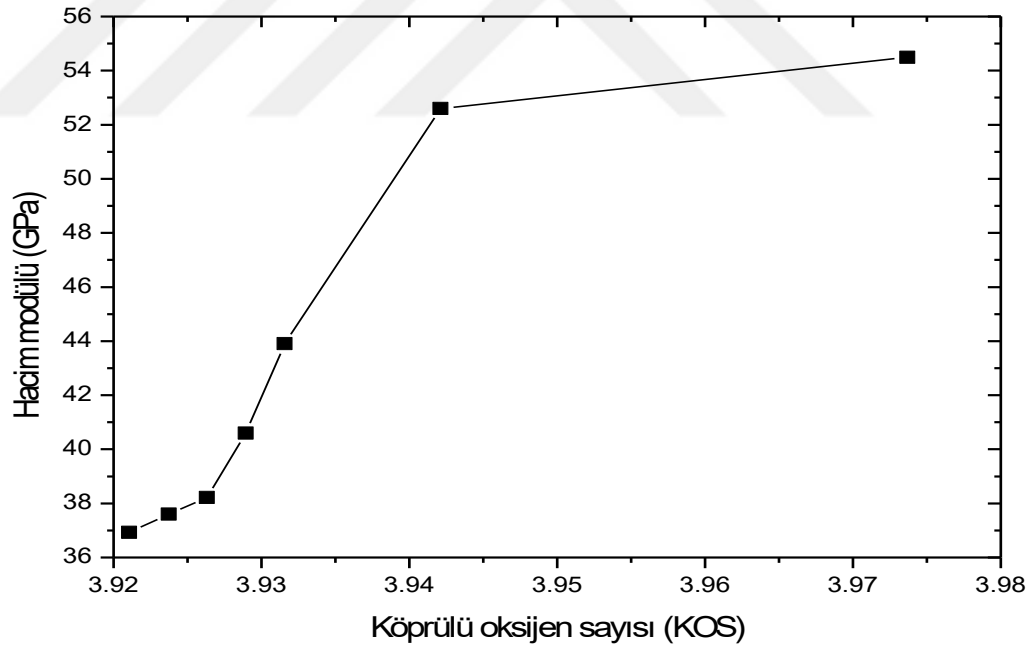


Şekil 4.10. Cr_2O_3 katkılı BS cam numunelerin elastisite modülünün köprülü oksijen sayısına göre değişimleri

Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi köprülü oksijen sayısı arttıkça elastisite modülünde de bir artış olmaktadır. Yapılan literatür taramaları sonucu katkı oranı arttıkça sodyum oksitinin (Na_2O) fraksiyonunun düşüyor olması elastisite modülünün azalma sebeplerinden biri olduğu düşünülmektedir (Scannell ve ark., 2016). Ayrıca elastisite modülü, atomik paketlenme yoğunluğuyla doğru orantılı, atomlar arasındaki bağ gücü ile de ters orantılı olması bu sonucu destekler niteliktedir (Rouxel, 2007). Şekil 4.11.'de Cr_2O_3 katkılı numunelerin kesme modülünün köprülü oksijen sayısına göre değişimi ve Şekil 4.12.'de ise Cr_2O_3 katkılı BS numunelerin hacim modülünün köprülü oksijen sayısına (KOS) göre değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Cr_2O_3 katkılı BS cam numunelerin kesme modülünün köprülü oksijen sayısına göre değişimleri



Şekil 4.12. Cr_2O_3 katkılı BS cam numunelerin hacim modülünün köprülü oksijen sayısına göre değişimleri

Şekil 4.11. ve 4.12.'de görüldüğü üzere Cr_2O_3 katkılı numunelerin kesme ve hacim modüllerinin de köprülü oksijen sayısına paralel olarak artış göstermiştir. Scannell ve Huang'da (2016), yaptıkları çalışmada elastik özelliklerin köprülü

oksijen sayısıyla doğru orantılı şekilde artıp azaldığını öne sürmüştür. Rouxel (2007), ise metalik camlarda daha yüksek atomik paketlenme yoğunluğu görüldüğünü ve elastik özelliklerin atomik paketlenme yoğunluğuyla hassas bir şekilde ilişkili olduğu sonucuna varmıştır. Bu durumlar göz önüne alındığına atomik paketlenme yoğunluğu ile paralellik gösteren köprülü oksijen sayısının elastik özelliklerle ilişkili olması kaçınılmazdır.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan deneyler sonucunda düşük katkılı Cr_2O_3 (% 0 – 0.75 arası) katkılı BS cam numunelerinde şeffaflık söz konusudur. Bu transparanlık %1 ve daha yüksek katkı oranlarında kaybolmuştur.

XRD sonuçları, %0 – 1 katkı aralığında tamamen camsı amorf yapı meydana gelmiştir. Fakat %2 ve %5 katkı oranında ise BS camın yapısında krom oksit (eskolat) kristal fazları oluşmuştur. Yani bu oranlarda kristal faz oluşmuştur. Cr_2O_3 'in BS camlarda kristalleşmeyi arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Örneklerin yoğunluk sonuçları, Cr_2O_3 'in yüksek yoğunluğu nedeniyle, Cr_2O_3 miktarıyla doğru orantılı bir şekilde BS camların yoğunluğunda bir artış meydana gelmiştir. Beklenildiği üzere numunelerin molar hacimleri katkı oranları ve yoğunluklarıyla ters orantılı bir şekilde azalma göstermiştir.

Hesaplanan poisson oranları ile katkı oranları arasında bir ilişki tespit edilememiştir. Yalnızca %0.25 ve %2 oranlarında, katkısız borosilikat cam numunesinden yüksek poisson oranı elde edilmiş olup, diğer tüm oranlarda katkısız borosilikat camdan daha düşük değerler bulunmuştur.

Elastisite modülü ise katkı oranıyla paralellik göstermiş olup, doğru orantılı olarak artmaktadır. Numunelerin hacim modülleri ve kesme modüllerinde de katkı oranıyla paralel olarak artan sonuçlar elde edilmiştir.

Sertlik değerleri, Cr_2O_3 'ün sahip olduğu yüksek sertlik değeri ve köprülü oksijen sayısında meydana gelen artış nedeniyle, katkı oranı arttıkça sertlik değeri de artmıştır.

Cr_2O_3 polimerizasyonu arttırırken, kırılma tokluğu değerleri, %5 katkı oranı hariç diğer tüm katkı oranlarında katkısız borosilikat cam numunesinden daha yüksektir.

Köprülü oksijen sayısı ve atomik paketleme yoğunlukları Cr_2O_3 katkı oranı artışıyla artış göstermiştir. Köprülü oksijen sayısı arttıkça, yoğunluk, elastisite modülü, hacim modülü, kesme modülü ve sertlik değerleri de artmıştır. Poisson oranı ile köprülü oksijen sayısı arasında açık bir ilişki bulunamamıştır.

Bütün bu sonuçlar göz önüne alındığında, Cr_2O_3 katkılı BS cam numuneleri katkısız BS camlarına göre daha iyi elastik ve mekanik özellikler gösterdiği görülmüştür. Bu çalışmanın asıl amacı radyasyon zırhlayabilen camlara alternatifler bulabilmektir. Bu amaçla üretilen Cr_2O_3 katkılı BS camları fiziksel, mekanik ve elastik özellikler bakımından sınıfı geçmiş, katkısız BS camlara göre daha üstün performans sergilemiştir.

5.2. Öneriler

Bilindiği üzere gelişmekte olan teknoloji ile birlikte radyasyonun zararları da artmaktadır. Bu yüzden radyasyon zırhlama çalışmaları tüm dünyada hızla devam etmektedir. Birçok radyasyon yayan cihazın bulunduğu ortamda cam vazgeçilmez bir malzemedir. Günümüzde radyasyon zırhlayıcı cam olarak kurşun katkılı camlar kullanılmaktadır. Kullanılan kurşun camları toksiktir, insan sağlığına birçok zararı bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı olarak kurşun katkılı camların yerine doğa dostu, toksik olmayan, kurşunlu camların yerini alabilecek camların üretilip, mekanik anlamda yeterli olup olmadığı konusunda bilgi sahibi olunmaya çalışılmıştır.

Cr_2O_3 katkılı BS camların, kurşun katkılı camlara alternatif olabilecek fiziksel, mekanik ve elastik özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

İlerleyen çalışmalarda cam numunelerin mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenebilir.

Özellikle cam numunelerin köprülü oksijen atomlarının durumu hakkında daha fazla fikir sahibi olabilmek ve moleköl yapısının incelenmesi için FTIR ve NMR spekturumları ölçümler yapılabilir.

Tavlama sıcaklığı ve süresinin, cam numunelerin yoğunluğuna olan etkisi araştırılabilir.

Işığın geçirme özellikleri gibi radyoaktif ışınlarla karşı olan davranışları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- ABD EL-FATTAH, Z.M., AHMAD, F., and HASSAN, M.A., 2017. Tuning the Structural and Optical Properties in Cobalt Oxide-Doped Borosilicate Glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 728: 773-779.
- ALHARBI, A.F., JOLLEY, K., SMITH, R., ARCHER, A.J., and CHRISTIE, J.K., 2017. A New Potential For Radiation Studies Of Borosilicate Glass. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 393: 73–76.
- ANONİM, 2008.
http://ismek.ist/files/ismekOrg/file/2013_hbo_program_modulleri/camin_kimyasal_yapisi.pdf, Erişim Tarihi 25 Temmuz 2017.
- ANONİM, 2012.
http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Cam%20Analizleri.pdf, Erişim Tarihi 22 Temmuz 2017.
- ANONİM, 2013.
http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Cam%20%C3%9Cretimi%20Ve%20%C5%9Eekillendirme%20Y%C3%B6ntemleri.pdf, Erişim Tarihi 22 Temmuz 2017.
- ANSTIS, G.R., CHANTIKUL, P., LAWN, B.R., and MARSHALL, D.B., 1981. A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements. *Journal of the American Ceramic Society*, 64(9): 533–538.
- BAHRA, N.H., JAAFAR, M.S., ISKANDAR, S.M., and CHENG, S.K., 2015. Effect of Different Concentrations of Doped Rare Earth Element on Borate–Silica Oxide Glass Structure. *Journal of Optoelectronics and Biomedical Materials*, 7(2): 47-52.
- BARLET, M., DELAYE, J., CHARPENTIER, T., GENNISSON, M., BONAMY, D., ROUXEL, T., and ROUNTREE, C.L., 2015. Hardness and Toughness of Sodium Borosilicate Glasses via Vickers's Indentations. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 417–418: 66–79.
- BENOIT, M., ISPAS, S., and TUCKERMAN, M.E., 2001. Structural Properties of Molten Silicates From ab Initio Molecular-Dynamics Simulations: Comparison Between $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ and SiO_2 . *APS Physics, Physical Review B*, 64(22): 224205.
- EBRAHIMI, E., and REZVANI, M., 2018. Optical and Structural Investigation on Sodium Borosilicate Glasses Doped with Cr_2O_3 . *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 190: 534–538.
- EL-DAMRAWI, G., HASSAN, A.M., and EL-JADAL, S., 2017. Morphological and Structural Investigations on Iron Borosilicate Glasses. *New Journal of Glass and Ceramics*, 7: 13-21.
- EREMYASHEV, V.E., SHABUNINA, L.A., and MIRONOV, A.B., 2013. Structural Particulars of Iron-Containing Borosilicate Glasses. *Glass and Ceramics*, 70(11-12): 391-394.
- GAAFAR, M.S., and MARZOUK, S.Y., 2007. Mechanical and Structural Studies on Sodium Borosilicate Glasses Doped with Er_2O_3 Using Ultrasonic Velocity and FTIR Spectroscopy. *Physica B*, 388: 294–302.

- GANVIR, V.Y., and GEDAM, R.S., 2017. Effect of La_2O_3 Addition on Structural and Electrical Properties of Sodium Borosilicate Glasses. *Materials Research Express*, 4(3).
- GREAVES, G.N., GREER, A.L., LAKES, R.S., and ROUXEL, T., 2011. Poisson's Ratio and Modern Materials. *Nature Materials*, 10: 823-837.
- KARAMANOV, A., PISCIELLA, P., and PELINO, M., 1999. The Effect of Cr_2O_3 as a Nucleating Agent in Iron-rich Glass-ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 19: 2641-2645.
- KATO, Y., YAMAZAKI, H., YOSHIDA, S., and MATSUOKA, J., 2010. Effect of Densification on Crack Initiation Under Vickers Indentation Test, *J. Non-Cryst. Solids*, 356: 1768-1773.
- KULLBERG, A.T.G., LOPES, A.A.S., VEIGA, J.P.B., and MONTEIRO, R.C.C., 2017a. Crystal Growth in Zinc Borosilicate Glasses. *Journal of Crystal Growth*, 457: 239-243.
- KULLBERG, A.T.G., LOPES, A.A.S., and MONTEIRO, R.C.C., 2017b. Effect of ZnF_2 Addition on the Crystallization Behaviour of a Zinc Borosilicate Glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 468: 100-104.
- KUMAR, V., PANDEY, O.P., and SINGH, K., 2010. Structural and Optical Properties of Barium Borosilicate Glasses. *Physica B*, 405: 204-207.
- LAOPAIBOON, R., and BOOTJOMCHAI, C., 2015. Characterization of Elastic and Structural Properties of Alkali-borosilicate Glasses Doped with Vanadium Oxide Using Ultrasonic Technique. *Glass Physics and Chemistry*, 41(4): 352-358.
- LI, B., WANG, S., and FANG, Y., 2017. Effect of Cr_2O_3 Addition on Crystallization, Microstructure and Properties of $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ Glass-ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 693: 9-15.
- LUO, Y.R., 2009. Bond Dissociation Energies. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 65-98.
- MAURO, J.C., ELLISON, A.J., and PYE, L.D., 2013. Glass: The Nanotechnology Connection. *Int. J. Appl. Glass Sci.*, 4: 64-75.
- MAURO, J.C., 2014. Grand Challenges in Glass Science. *Frontiers in Materials*, 1: 1-4.
- MEEJITPAISAN, P., KAEWKHAO, J., LIMSUWAN, P., and KEDKAEW, C., 2012. Physical and Optical Properties of the SLS Glass Doped with Low Cr_2O_3 Concentrations. *Procedia Engineering*, 32: 787-792.
- NABHAN, E., NABHAN, A., and ABD EL AAL, N., 2016. Mechanical and Structural Properties of Zinc – Sodium - Phosphate Glasses Doped with Cu_2O . *American Journal of Physics and Applications*. 4(6): 145-151.
- NARAYANAN, M.K., and SHASHIKALA, H.D., 2015. Physical, Mechanical and Structural Properties of $\text{BaO}-\text{CaF}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 430: 79-86.
- OMAR, A., ELSHENNAURI, A.W., and KHATER, G.A., 1991. The Role of Cr_2O_3 , LiF and Their Mixtures on Crystalline Phase Formation and Microstructure in Ba, Ca, Mg Aluminosilicates Glass. *Br. Ceram. Trans. J.*, 90: 179-183.
- PAVAI, R.E., and THIRUMAL, C., 2013. FTIR and Ultrasonic Investigations on B_2O_3 - $\text{BaO}-\text{CuO}$ Glasses. *International Journal of Recent Scientific Research*, 4(11): 1915-1919.
- REDDY, R.M., REDDY, M.S., and VEERAAIAH, N., 2006. Physical Properties of $\text{PbO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ Glasses Doped with Cr_2O_3 . *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 44: 446-454.

- ROUXEL, T., 2007. Elastic Properties and Short-to Medium-Range Order in Glasses. J. Am. Ceram. Soc., 90(10): 3019–3039.
- RULAND, W., 1969. The Structure of Amorphous Solids. Pure and Applied Chemistry, 18(4): 489-516.
- SANTIC, A., SKOKO, Z., GAJOVIC, A., REIS, S.T., DAY, D.E., and MOGUS-MILANKOVIC, A., 2011. Physical Properties of Lead Iron Phosphate Glasses Containing Cr₂O₃. Journal of Non-Crystalline Solids, 357: 3578–3584.
- SANTIC, A., MOGUS-MILANKOVIC, A., FURIC, K., BERMANEC, V., KIM, C.W., and DAY, D.E., 2007. Structural Properties of Cr₂O₃-Fe₂O₃-P₂O₅ Glasses, Part I. Journal of Non-Crystalline Solids, 353: 1070-1077.
- SAMSONOV, G.V., 1982. The Oxide Handbook, 2nd edition. IFI/Plenum, New York, 192-195.
- SCANNELL, G., BARRA, S., and HUANG, L., 2016. Structure and Properties of Na₂O-TiO₂-SiO₂ Glasses: Role of Na and Ti on Modifying the Silica Network. Journal of Non-Crystalline Solids, 448: 52–61.
- SCANNELL, G., and HUANG, L., 2016. Structure and Thermo-mechanical Response of Na₂O-TiO₂-SiO₂ Glasses to Temperature. Journal of Non-Crystalline Solids, 453: 46–58.
- SHAND, E.B., 1968. Engineering Glass, Modern Materials. Cilt 6, Academic Press, New York, 262.
- SHELBY, J.E., 1997. Density and Molar Volume, in Introduction to Glass Science and Technology, London, United Kingdom: The Royal Society of Chemistry, 137-142.
- TAŞÇIOĞLU, S., 1992. Bor ve Silisyum Kimyası. Marmara Üniversitesi Yayınları, 515:192.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., and SCHERIFF, R.E., 1993. Applied Geophysics. Cambridge University Press, London, 225.
- THIRUMARAN, S., and PRAKASH, N., 2015. Structural Characterization of Some Borate Glass Specimen by Ultrasonic, Spectroscopic and SEM Studies. Indian Journal of Pure and Applied Physics, 53(2): 82-92.
- URL-1, <http://www.mailce.com/cam-nasil-bulundu.html>, Erişim tarihi 7 Temmuz 2017.
- URL-2, <http://bilgihanem.com/camin-icadi-cam-nedir/>, Erişim tarihi 10 Temmuz 2017.
- URL-3, <https://www.britannica.com/technology/glass>, Erişim tarihi 25 Temmuz 2017.
- URL-4, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Cam>, Erişim tarihi 22 Kasım 2017.
- URL-5, <http://www.rci.rutgers.edu/~glasseng/CourseLinks/ZachariasenRules.pdf>, Erişim tarihi 22 Temmuz 2017.
- URL-6, <http://www.gursanglass.com.tr/trelkitabi.pdf>, Erişim tarihi 12 Ekim 2017.
- URL-7, https://tr.wikipedia.org/wiki/Silisyum_dioksit, Erişim tarihi 20 Kasım 2017.
- URL-8, <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/kullanim-alanlari/cam-ve-seramik-sanayi>, Erişim tarihi 28 Temmuz 2017.
- URL-9, https://en.wikipedia.org/wiki/Borosilicate_glass, Erişim tarihi 22 Kasım 2017.
- URL-10, https://en.wikipedia.org/wiki/Boron_trioxide, Erişim tarihi 17 Kasım 2017.
- URL-11, <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromium>, Erişim tarihi 10 Kasım 2017.
- VOLF, M.B., 1984. Chemical Approach to Glass. Elsevier, New York, NY.
- WANG, Z., and CHENG, L., 2014. Effects of Doping CeO₂/TiO₂ on Structure and Properties of Silicate Glass. Journal of Alloys and Compounds, 597: 167-174.

- YAOWAKULPATTANA, P., WAKASUGI, T., KONDO, S., and KADONO, K., 2015. Effect of Alkaline and Alkaline-Earth Metal Oxides Addition on the Glass Formation and Crystallization of ZnO-Al₂O₃-SiO₂ Glasses. *Engineering Journal*, 19(3): 21-33.
- ZHU, H., LIAO, Q., WANG, F., DAI, Y., and LU, M., 2016. The Effects of Chromium Oxide on the Structure and Properties of Iron Borophosphate Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 437: 48–52.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Kaan DOĞRU

Uyruğu: T.C.

Doğum Yeri: Şanlıurfa

Doğum Tarihi: 15.12.1992

Telefon: 05416265108

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	Çeş Anadolu Lisesi, Merkez, Şanlıurfa	2010
Üniversite	Makine Mühendisliği, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa	2015
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa	2018

YABANCI DİLLER

İngilizce