T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO BOYUTLU KÖPÜKLEYİCİ İLE CAM KÖPÜĞÜ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ABDULKADİR SARI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2016

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO BOYUTLU KÖPÜKLEYİCİ İLE CAM KÖPÜĞÜ ÜRETİMİ VE KARKTERİZASYONU

ABDULKADİR SARI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. ALİ ATA

GEBZE
2016

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF GLASS FOAM WITH NANO SIZED FOAM AGENT

ABDULKADİR SARI

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. ALİ ATA

GEBZE

2016

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15/06/2016 tarih ve 2016/37 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 14/07/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Abdulkadir SARI' nın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Ali ATA

ÜYE : Prof. Dr. Ömer YILDIZ

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Ali Murat SOYDAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Binalarda harcanan enerjinin % 82 si ısıtma ve soğutma için kullanılmaktadır. Bu ise Türkiye'de harcanan enerjinin % 26'sına denk gelmektedir. Enerjisinin % 70' ini ithal eden ülkemizde tüketilen bu enerjiyi azaltmak için yapılan çalışmalar, öncelikli konular arasında yer almaktadır. Isıtma ve soğutmada enerji tasarrufu sağlamanın en etkili yolu nitelikli malzemeler ile yapılan ısı yalıtımından geçmektedir.

Cam köpüğü; cam veya cam benzeri malzeme eriyiklerine bir takım gazlar veya gaz oluşturucu maddeler eklenerek oluşturulmuş yüksek kabarcık içeriğine sahip camdır. Sonuç olarak ortaya çıkan gözenekli cam çok hafif olup yüksek basınç dayanımına ve boyutsal stabiliteye sahiptir. Bu özelliği cam köpüğünün özellikle termal ve akustik olarak nitelikli bir yapısal yalıtım malzemesi olarak kullanılmasını sağlar.

Özellikle atık camların hammadde olarak kullanılması ile üretilen cam köpüğü malzemesi nitelikli bir yalıtım malzemesi olmasının yanı sıra çevreyi koruyan katma değerli bir ürün olacaktır.

Teknolojinin gelişmesi ve malzemelerin nano boyutlarda üretilebilmesi malzeme özelliklerinin kontrol edilebilirliğini arttırmıştır. Nano boyutlu köpükleyici, büyük tane boyutlardaki köpükleyici malzemelere göre üretim proseslerinde farklılık oluşturmakta, köpük cam üretimi sırasındaki reaksiyonların verimini artırmaktadır.

Bu tez kapsamında atık cam ve yeşil renkli düz cam türlerinin ve alümina (Al_2O_3) etkisinin köpükleyici olarak nano boyutlu SiC kullanılmış cam köpüğü üretimine etkisi incelenmiştir. Ve üretilmiş olan numuneler için hacim artışı, ağırlık kaybı, mineralojik analiz (XRD), mikroyapı incelemesi (SEM), basınç dayanımı, görünür yoğunluk tayini, porozite, termal iletkenlik tayini gibi testler yapılmıştır.

Çalışmalarda üretilmiş olan cam köpüğünün ısı iletkenliğinin az, mukavemetinin yüksek olması ürünlerin hem yalıtım hem taşıyıcılığı aynı anda sağlayacak bir malzeme olduğunu, hem yapı sektörüne hem de yalıtım sektörüne hitap edebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Cam Köpüğü, Yalıtım, Enerji Verimliliği, Nano Parçacık, Atık Cam.

SUMMARY

82 % of the energy consumed is used in buildings for heating and cooling. This corresponds to 26 % of the energy consumed in Turkey. This studies to reduce the energy are among the priority issues for our country that imports 70 % of its energy. The most effective way of achieve energy savings for heating and cooling is through the thermal insulation made with quality materials.

Foam glass is glass having a high bubble content made by glass or melted glass. As a result, the porous glass is very light and has a high compressive strength and dimensional stability. This feature of the foam glass, especially as thermal and acoustic quality provides the use as a structural sealant.

Especially because a raw material of waste glass is used to produces glass foam it's a value-added product to protect the environment as well it being a superior insulating material.

Technology development increase the controllability of nano-sized materials to produce material properties. Nano-sized foaming agents make the difference in the manufacturing process compared to larger sized foaming agent and increase the efficiency of reaction during the production of foam glass.

In this thesis, the effect of glass types such as waste glass, green coloured flat glass, and alumina effect (Al_2O_3) were examined on foam glass materials produced using nano-sized foaming agents. Tests were performed, such as volume increase, weight loss, mineralogical analysis (XRD), microstructure analysis (SEM), compressive strength, determination of apparent density, porosity, and thermal conductivity determination.

In this study, due to the low thermal conductivity and high strength of foam glass, this produced material can be used for insulation and bearing. Thus, it can be used both insulation sectors and construction sector.

Key Words: Foam Glass, İsolation, Energy Efficency, Nano particules, Glass Waste.

TEŞEKKÜR

3141009 numaralı ‘’Düşük Isı İletkenliğine Sahip Yeni Nesil Nano Yapılı Cam Köpüğü Üretim Yönteminin Araştırılması’’ isimli TÜBİTAK TEYDEB 1501 kodlu projenin bir kısmı olan yüksek lisans tezime katkı ve yardımlarından dolayı öncelikle sayın danışmanım Prof. Dr. Ali ATA’ ya ve çok değerli hocam ve ağabeyim Yrd. Doç. Dr. Ali Murat SOYDAN’ a teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Deneylerde, laboratuvar desteklerini esirgemeyen TÜBİTAK Malzeme Araştırma Enstitüsüne ve değerli personeline, ayrıca çalışmalarımıza tecrübelerini ve deneyimlerini sunan kıymetli hocam Dr. Mustafa KARA’ ya teşekkür ederim. Yapılan çalışmalarda maddi ve manevi her türlü desteği esirgemeden sunan değerli çalışma arkadaşlarım Burcu DUYMAZ, Aylin ŞAHİN ve Dr. Yasemin KILIÇ ile çalışmalarımda her türlü desteği veren, güzel bir çalışma ortamı sunan Vefa Holding’ e ve VEKNO İleri Teknoloji ve İnovasyon A.Ş çalışanlarına teşekkürü borç bilirim. Yapılan çalışmalar için hammadde kaynaklarının kullanılmasında gösterdiği kolaylıktan ve cam hakkında verdiği kıymetli bilgilerden dolayı ŞİŞECAM Ar-Ge Merkezine, atık camların temin edilmesinde gösterdiği kolaylıktan ve cana yakınlıktan dolayı Cam Kırığı San. Ve. Tic. Ltd. Şirketine şükranlarımı sunarım.

Ve tüm eğitim hayatım boyunca, en zor zamanlarda dahi, eğitimimi ön planda tutan, maddi manevi her türlü desteği çekinmeden sağlayan özellikle sevgili babam Tahsin SARI başta olmak üzere sevgili aileme ve değerli arkadaşlarıma çok teşekkür eder saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLOLAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. ISI YALITIMI ve ISI YALITIM MALZEMELERİ	3
2.1. Yaygın Olarak Kullanılan Isı Yalıtım Malzemeleri	8
2.1.1. Sentetik Isı Yalıtım Malzemeleri	8
2.1.1.1. Genleştirilmiş Polistiren Köpüğü (EPS)	9
2.1.1.2. Ekstirüde Polistiren Köpüğü (XPS)	11
2.1.1.3. Poliüretan Köpüğü (PUR/PIR)	12
2.1.2. Mineral Kökenli Isı Yalıtım Malzemeleri	13
2.1.2.1. Cam Yünü	13
2.1.2.2. Taş Yünü	14
3. CAM KÖPÜĞÜ	16
3.1. Cam Köpüğünün Özellikleri	18
3.2. Cam Köpüğünün Tarihçesi	20
3.3. Cam Köpüğünün Avantajları ve Kullanım Alanları	21
4. CAM KÖPÜĞÜ ÜRETİMİ	24
4.1. Cam Köpüğü Üretim Aşamaları	25
4.1.1. Cam Seçimi	25
4.1.2. Camın Öğütülmesi	26
4.1.3. Köpük Yapıcı Malzeme Seçimi ve Karıştırma	29
4.1.4. Sinterleme	30
4.1.4.1. Isıtma Hızı	30
4.1.4.2. Köpük Oluşum Sıcaklığı	30

4.1.4.3. Reaksiyon İle Köpüklenme 31
4.1.4.4. Sinterleme Süresi 33
4.1.4.5. Soğutma Hızı 33
4.1.5. Tavlama 33
4.2. Cam Köpüğü Özelliklerini Etkileyen Faktörler 33
4.3. Cam Köpük İle İlgili Yapılan Çalışmalar 35
5. MATERYAL ve YÖNTEM 42
5.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler 42
5.2. Hammadde Karakterizasyon Testleri 43
5.2.1. Tane Boyut Dağılımı ve Sonuçları 43
5.2.2. Nem Tayini ve Sonuçları 46
5.2.3. Yarı Kantitatif Elementel Analiz (XRF) ve Sonuçları 47
5.2.4. Yaş Kimyasal Analiz ve Sonuçları 48
5.2.5. Mineralojik Analiz (XRD) ve Sonuçları 49
5.2.6. Mikroyapı Analizi (SEM) ve Sonuçları 50
5.2.7. Diferansiyel Termal Analiz (DTA) – Termal Gravimetri (TG) Analizi ve Sonuçları 51
5.2.8. Yüzey Alanı Tayini (BET) ve Sonuçları 54
6. KÖPÜK CAM ÜRETİM ÇALIŞMALARI VE NUMUNELERİN KARAKTERİZASYONU 56
6.1. Cam Köpüğü Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Görüntüleri 60
6.1.1. Silindirik Numunelere Ait Görüntüler 60
6.1.2. Kare Numunelere Ait Görüntüler 62
6.2. Cam Köpük Numunelerinin Karakterizasyonu 65
6.2.1. Hacim ve Ağırlık Değişimi Tayini ve Sonuçları 65
6.2.2. Minerolojik Analiz (XRD) ve Sonuçları 66
6.2.3. Yoğunluk, Su emme, Porozite Tayini ve Sonuçları 67
6.2.4. Basınç Dayanımının Tayini ve Sonuçları 70
6.2.5. Isıl İletkenlik Analizi ve Sonuçları 71
6.2.6. Mikroyapı (SEM) Analizi ve Sonuçları 72
6.2.7. Görünür Yoğunluk Tayini ve Sonuçları 78
7. GENEL SONUÇLAR 80

KAYNAKLAR 86
ÖZGEÇMİŞ 89

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
λ	:	Isıl iletkenlik katsayısı
Ø	:	Çap
ΔT	:	Sıcaklık değişimi
μ	:	Mikron
μm	:	Mikrometre
Å	:	Angstrom
^{o}C	:	Santigrat derece
cm	:	Santimetre
dk	:	Dakika
E	:	Elastik modül
gr	:	Gram
h	:	Saat
^{o}K	:	Kelvin derece
kg	:	Kilogram
kN	:	Kilonewton
kPa	:	Kilopascal
m	:	Metre
mm	:	Milimetre
MPa	:	Megapascal
N	:	Newton
nm	:	Nanometre
Pa	:	Pascal
s	:	Saniye
T	:	Sıcaklık
Tc	:	Kristalizasyon sıcaklığı
Tg	:	Camsı geçiş sıcaklığı
Ts	:	Yumuşama sıcaklığı
W	:	Güç

ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	:	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
BS	:	İngiliz standartları
CEN	:	Avrupa Standartlar Komitesi
CMC	:	Karboksimetil selüloz
CRT	:	Katot ışınlı tüp
DIN	:	Alman Standartları Enstitüsü
DS	:	Danimarka Standardizasyon Kuruluşu
DTA	:	Diferansiyel termal analiz
EN	:	Avrupa Birliği Standartları
EPB	:	Genleştirilmiş perlit
EPS	:	Genleştirilmiş polistiren köpük
EU	:	Avrupa Birliği
FG	:	Foamglass
HFCKW	:	Kısmi halojenleştirilmiş floroklorokarbon
ICB	:	Genleştirilmiş mantar
ICP	:	İndüktif eşleşmiş plazma
ISO	:	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
İTO	:	İstanbul Ticaret Odası
Max	:	Maksimum
Min	:	Minimum
Ort	:	Ortalama
PEG	:	Polietilenglikol
PVC	:	Polivinilklorür
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
SI	:	Uluslararası birim sistemi
TGA	:	Termo gravimetrik analiz
TS	:	Türk standartları
UK	:	Birleşik Krallık
USD	:	Amerikan doları
XPS	:	Ekstrüde polistiren köpük
XRD	:	X-Işını kırınım yöntemi
XRF	:	X-Işını floresans spektrometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	Stirenin polimerizasyonu.	9
2.2:	EPS köpük.	9
2.3:	EPS köpüğün üretim şeması.	11
2.4:	XPS köpük.	12
2.5:	Poliüretan köpüğü.	13
2.6:	Cam yünü.	14
2.7:	Taş yünü çeşitleri.	15
3.1:	Cam köpüğünün üç ana çeşidi.	17
3.2:	Süreksiz boşluklara sahip sam köpüğünün; a) görünümü b) mikroyapısı.	17
3.3:	Sürekli boşluklara sahip sam köpüğünün; a) görünümü b) mikroyapısı.	17
4.1:	Cam köpüğünün üretim süreci.	24
4.2:	a) Ergimiş cam, b) Cam köpüğü.	24
4.3:	a)% 5 SiC (45 µm) katkılı cam köpük malzemesinde başlangıç cam tane boyutunun mikro yapı üzerine etkisi, b)SiC katkılı cam köpükte cam tane boyutuna bağlı olarak değişen gözenek boyutu	26
4.4:	Elde edilen cam köpükler.	36
4.5:	% 5 SiC ve farklı boyuttaki camlar ile elde edilen cam köpüklerin SEM görüntüleri.	39
4.6:	Cam tane boyutunun bir fonksiyonu olarak FG2-6'nın gözenek çapı.	40
5.1:	Mastersizer 2000.	44
5.2:	Zetasizer Nano ZS.	44
5.3:	Atık cam (0) tane boyut dağılım grafiği.	45
5.4:	Yeşil renkli düz cam tane boyut dağılım grafiği.	45
5.5:	SiC tane boyut dağılım grafiği.	45
5.6:	Al_2O_3 tane boyut dağılım grafiği.	46
5.7:	Presica HA60 nem ölçme cihazı.	46
5.8:	Atık cam (36 µm) DTA/TG analizi sonucu.	53

5.9: Yeşil renkli düz cam (38 µm) DTA/TG analizi sonucu. 54
5.10: SiC (202 nm) DTA/TG analizi sonucu. 54
6.1: Karıştırma işleminde kullanılan bilyalı değirmen. 56
6.2: Granülleme çalışma görüntüsü. 57
6.3: Deneysel çalışmalarda kullanılan hidrolik pres. 57
6.4: PROHERM marka PLF120/45 model fırın. 58
6.5: NABERTHERM marka N500/85A model hava sirkülasyonlu fırın. 69
6.6: A1 silindirik numunesinin sinter öncesi, sinter sonrası ve kenarları kesilerek elde edilmiş köşeli ürününün görüntüsü. 60
6.7: A2 silindirik numunesinin sinter öncesi, sinter sonrası ve kenarları kesilerek elde edilmiş köşeli ürününün görüntüsü. 60
6.8: Y1 silindirik numunesinin sinter öncesi, sinter sonrası ve kenarları kesilerek elde edilmiş köşeli ürününün görüntüsü. 61
6.9: Y2 silindirik numunesinin sinter öncesi, sinter sonrası ve kenarları kesilerek elde edilmiş köşeli ürününün görüntüsü. 61
6.10: A1 kare plakasının sinter öncesi, sinter sonrası görüntüsü. 62
6.11: A2 kare plakasının sinter öncesi, sinter sonrası görüntüsü. 62
6.12: Y1 kare plakasının sinter öncesi, sinter sonrası görüntüsü. 63
6.13: Y2 kare plakasının sinter öncesi, sinter sonrası görüntüsü. 63
6.14: 500 kg/m^2 basınç ile preslenmiş numunelerin yan yana görüntüsü. 64
6.15: Yoğunluk tayini görüntüsü. 68
6.16: Basma cihazının a) yandan görünümü, b) önden görünümü. 71
6.17: Isıl iletkenlik için 500 kg/m^2 basınçla preslenmiş numunelerin. görüntüsü. 72
7.1: 2015 - 2020 yılları arasında cam köpüğünün küresel üretim ve büyüme kapasitesinin tahmini oranı. 84

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
2.1:	Türkiye nihai enerji tüketiminin sektörlere göre payları.	4
2.2:	Yalıtım ve gölgeleme açısından üç farklı örnek konutun ısıtma/soğutma amaçlı enerji tüketim karşılaştırması.	5
2.3:	Örnek binanın yalıtımlı ve yalıtımsız olması durumunda olası hava kirletici atık miktarı.	6
2.4:	Yalıtım derecesine göre ısı ihtiyacı.	6
2.5:	Isı yalıtım malzemelerinin yapıldığı hammaddeye göre sınıflandırılması.	7
2.6:	Isı yalıtım malzemeleri ürün standardı.	7
2.7:	Yapılarına göre ısı yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması.	8
2.8:	EPS köpüğün özellikleri.	10
2.9:	XPS köpüğün özellikleri.	12
2.10:	Poliüretan köpüğün özellikleri.	13
2.11:	Cam yününün özellikleri.	14
2.12:	Taş yününün özellikleri.	15
3.1:	Cam köpüğün yoğunluk ve ısı iletkenlik özelliklerinin diğer yapı malzemeleri ile karşılaştırılması.	18
3.2:	Cam köpüğün fiziksel özellikleri.	19
3.3:	Bina ve soğuk odalar için istenilen cam köpük malzemesi kalınlık değeri.	23
4.1:	Kullanılan cam atıklarının kimyasal kompozisyonu.	27
4.2:	Hammadde olarak kullanılan geri dönüştürülmüş camların oksit bileşenleri.	28
4.3:	Cam köpük numunelerinin ağırlıkça % bileşenleri.	28
4.4:	Çeşitli atmosferlerde SiC' in muhtemel reaksiyonları.	32
4.5:	Brusatin ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan camların kompozisyonu.	38
5.1:	Deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddeler.	42
5.2:	Hammaddelerin tane boyut dağılımı.	43

5.3: Hammaddelerin XRF analiz sonuçları. 47
5.4: Hammaddelerin yaş kimyasal analiz sonuçları. 49
5.5: Hammaddelerin XRD analiz sonuçları. 50
5.6: SiC tozunun mikroyapı görüntüleri. 50
5.7: Deneylerde kullanılan hammaddelerin DTA/TGA sonuçları. 53
5.8: Deneylerde kullanılan hammaddelerin yüzey alanı (BET) sonuçları. 55
6.1: Köpük cam üretiminde kullanılan optimum kompozisyonlar. 56
6.2: Silindirik ve kare şekilli cam köpük numunelerin pres koşulları. 58
6.3: Belirlenen kompozisyonlara ait sinterleme rejimi. 59
6.4 Silindirik cam köpüğü numunelerinin sinterleme öncesi ve sonrası boyut ve ağırlıkları. 61
6.5: Kare cam köpüğü numunelerinin sinterleme öncesi ve sonrası boyut ve ağırlıkları. 64
6.6: Cam köpük numunelerinin hacim artışı ve ağırlık kaybı değerleri. 66
6.7: Cam köpük numunelerinin XRD analiz sonuçları. 67
6.8: Cam köpük numunelerine ait yoğunluk, porozite ve su emme değerleri. 69
6.9: Silindirik ve kare cam köpüğü numunelerin basma mukavemeti ve elastik modülü sonuçları. 71
6.10: Cam köpük numunelerin ısıl iletkenlik analiz sonuçları. 72
6.11: Silindirik cam köpük numunelerin mikroyapı görüntüleri. 73
6.12: Kare cam köpük numunelerin mikroyapı görüntüleri. 74
6.13: Cam köpük numunelere ait görünür yoğunluk değerleri. 79
7.1: ABD ve EU’ da satılan cam köpüğü fiyatları. 84

1. GİRİŞ

İnsanlar var olduğu dönemden itibaren doğanın kendilerine sunduğu imkanlardan faydalanırken aynı zamanda da doğanın olumsuz etkilerine karşı korunmanın yollarını araştırmışlardır. Kutuplardaki Eskimoların buz kulübeleri, Kızılderililerin çadırları ve New York'un gökdelenlerinin konfor koşulları farklı olsa da hepsi aynı temel amaçla, insanı doğanın acımasız koşullarından korumak, yalıtmak için inşa edilmiştir. Yapıların ve insanların günümüzde de yıkıcı dış etkenlerle karşı karşıya olduğunu düşünürsek, "yalıtım" kelimesi, örtünme, barınma, konfor, sağlık ihtiyaçlarının ötesinde, ilk çağlardaki kadar olmasa da can güvenliği açısından hala büyük önem taşımaktadır [1].

Yalıtım, su yalıtımı, ses yalıtımı, yangın yalıtımı gibi birçok alanda hayatımıza girmiş olsa da barınmanın en temel şartı ısı yalıtımıdır. Başlangıçta insanlar vücut ısılarını hayvansal ve bitkisel kökenli malzemelerden sağlarken değişen zaman ve teknoloji ile birlikte bu malzemeler yerlerini farklı malzemelere bırakmıştır.

Isı yalıtımı malzemelerini bitkisel ve hayvansal kökenli malzemeler, mineral kökenli malzemeler, sentetik malzemeler ve yüksek performanslı malzemeler olmak üzere çeşitlendirmek mümkündür. Bitkisel ve hayvansal kökenli yalıtım malzemelerinden gelişen zamanla birlikte istenilen performans alınamaması, yüksek performanslı malzemelerin ise maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı mineral kökenli malzemeler ve sentetik malzemeler en çok kullanılan ısı yalıtım malzemeleri olmuşlardır. Mineral kökenli olan cam köpüğü düşük yoğunluğu, düşük ısı iletim katsayısı, su geçirmezliği ve yüksek mekanik dayanımı ile özellikle yalıtım sektöründe uzun süredir kullanılmaktadır.

Bu çalışmada amaç, atık malzemeleri değerlendirerek katma değeri yüksek cam köpüğü oluşturmaya çalışarak karakterize etmektir. Hammadde olarak atık camların, cam köpük üretiminde kullanılması 1940 - 1950'lerden beri uygulanmaktadır. Hem atıkların kullanımının arttırılması hem de cam köpük üretimine uygun atıkların belirlenmesi için geniş çapta araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin; cam köpük üretimindeki proses parametreleri ve cam köpük mikroyapısı arasındaki ilişki ile ilgili yapılmış olan ilk sistematik çalışmalardan birinde, soda-kireç cam atığı ile farklı köpük yapıcılar kullanılmış, tane boyutu, köpükleşme süresi ve sıcaklığı, ısıtma ve soğutma hızı, nihai mikroyapı üzerinde su ve diğer bileşiklerin etkisi incelenmiştir [2].

Bu tez kapsamında köpükleyici olarak nano boyutta silisyum karbür (SiC), yeşil renkli düz cam ve atık camlar kullanılarak cam köpüğü malzemesi üretilmiş ve üretilen cam köpüğü malzemelerinin hacim ve ağırlık değişimi, mineralojik analizleri, yoğunluk, su emme, porozite, basma mukavemeti, ısıl iletkenlik değerleri ve mikroyapıları incelenmiştir.

2. ISI YALITIMI ve ISI YALITIM MALZEMELERİ

Farklı sıcaklığa sahip iki ortam arasında ısı geçişini azaltmak için kullanılan malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak sınıflandırılır. Başka bir ifadeyle; ısı kayıplarını ve kazançlarını azaltmak için kullanılan, ısıl dirençleri yüksek ve ısı iletim katsayıları düşük malzemeler olarak da adlandırılır. Bu malzemelerin performansı ısı iletkenlik ve ısıl direnç katsayısı, basma mukavemeti, çekme mukavemeti, buhar difüzyon direnci, su ve nemden etkilenmezlik, yanmazlık ve alev geçirmezlik, yoğunluk, boyutsal kararlılık, kimyasal kararlılık gibi temel özelliklere göre değerlendirilmektedir.

Isı yalıtımında kullanılan malzemelerin esas amacı, yapı elemanlarının ısı iletim direncini artırmaktır. Bundan dolayı, bu malzemelerin yalıtım özelliği ısı iletim katsayılarına bağlıdır. Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı (International Organization for Standardization - ISO) ve Avrupa Standardizasyon Komitesi (European Committe for Standardization - CEN) standartlarına göre ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayısı 0,065 W/m.K değerinden düşük olmalıdır [3].

Isı yalıtım malzemelerinde uygulamaya göre aranması gereken özellikler;

- Isı iletim katsayısı (W/mK)
- Yoğunluk (kg/m3)
- Yangın sınıfı (DIN 4102, BS 476)
- Sıcaklık dayanımı (ºC)
- Mekanik dayanım (kPa)
- Buhar difüzyon direnci
- Su emme
- Boyutsal kararlılık

Ülkemizde hali hazırda inşa edilmiş ve inşa edilmekte olan konutlar değerlendirildiğinde, yalıtımın yetersiz kaldığı ve çok önemli miktarda enerji kayıplarının yaşandığı ve buna bağlı olarak da aşırı enerji kullanımından ve fosil yakıtların tüketilmesinden dolayı açığa çıkan CO_2' in çevreye verdiği zarar tartışılmaz bir gerçektir.

Dünyadaki toplam enerji tüketiminin % 40'ı binalarda gerçekleşmektedir ve bu tüketim sonucu atmosfere salınan toplam CO_2'nin % 24'ü binalardaki enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Ekonomik daralmaya rağmen, 2008 yılında bina sektörü en fazla enerji tüketen sektör haline gelerek yıl içinde toplam tüketimde % 36 oranına ulaşmıştır.

Tablo 2.1: Türkiye nihai enerji tüketiminin sektörlere göre payları.

Enerji Tüketim Dağılımı				
Konut ve Hizmetler	Sanayi	Tarım	Ulaştırma	Enerji Dışı Kullanım
35	37	6	18	4

Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği (İZODER) tarafından, binalardaki enerji tasarrufunun daha iyi anlaşılması amacıyla Türkiye ile aynı iklimde, fiziksel yapı olarak birbiri ile aynı olan fakat sadece yalıtım açısından farklı olan üç konut üzerinde testler yapılmıştır. Tablo 2.2' de, Konut 1'den farklı olarak Konut 2'de pencere panjurları kış günlerinde geceleri tamamen, yaz günlerinde ise gündüzleri % 85 kapatılmıştır. Bunun sonucunda, ısıtma/soğutma enerji ihtiyacından % 34 tasarruf edildiği gözlemlenmiştir [4]. Konut 1 ve Konut 2' nin duvarları içten 7 cm kalınlıkta, çatıları 14 cm kalınlıkta yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Konut 3' te ise farklı olarak duvarlar dıştan 10 cm kalınlıkta, çatı ise 20 cm kalınlıkta yalıtılmıştır. Bu yalıtımın sonucunda, Konut 3' te ısıtma/soğutma enerji ihtiyacından % 65 tasarruf sağlandığı görülmüştür. Yapılan testler neticesinde, yalıtım kalınlığında artış yapılmasıyla sağlanan enerji tasarrufunun ihmal edilemeyecek kadar fazla olduğu anlaşılmaktadır. Diğer bir yandan, sade, yalıtımsız bir binaya yalıtım yapılması halinde ortaya çıkabilecek enerji tasarrufunun miktarının ve öneminin göz ardı etmek mümkün değildir [4].

Tablo 2.2: Yalıtım ve gölgeleme açısından 3 farklı örnek konutun ısıtma/soğutma amaçlı enerji tüketim karşılaştırması.

	Konut 1	Konut 2	Konut 3
Alan	100 m^2	100 m^2	100 m^2
Hacim	250 m^3	250 m^3	250 m^3
Kış sıcaklığı	19 ºC gündüz	19 ºC gündüz	19 ºC gündüz
	15 ºC gece	15 ºC gece	15 ºC gece
Pencereler	16 m^2	16 m^2	16 m^2
	3.2 m^2'si güneyde	3.2 m^2'si güneyde	3.2 m^2'si güneyde
Kış geceleri	Panjurlar açık	Panjurlar kapalı	Panjurlar kapalı
Yaz günleri	Panjurlar açık	Panjurlar % 85	Panjurlar % 85
Duvar yalıtımı	7 cm içten	7 cm içten	10 cm dıştan
Çatı yalıtımı	14	14	20
Isıtma/soğutma	14.300 kWh	9.420 kWh	5.070 kWh
	% 100	-% 34	-% 65

Binalarda ısı yalıtımı, duvarlara, pencerelere, döşemelere, tesisatlara, tavan ve çatı bölgelerine yapılmaktadır.

Duvarlarda; enerji verimliliği, ısı kaybeden duvarlara yapılmalıdır. Duvarlarda yalıtım içten veya dıştan yapılmakta ve çeşitli özelliklerdeki ısı yalıtım malzemeleri kullanılarak enerji verimliliği sağlanmış olmaktadır.

Pencerelerde tüketilen enerjinin dağılımı incelendiğinde, yaklaşık % 50' civarında enerjinin binalarda harcandığı gözlemlenmiştir. Binalardaki gerçekleşen ısı kayıplarının % 30' unun pencerelerden gerçekleştiği göz önüne alındığında, pencerelerde kullanılan tek cam yerine yalıtım camlı üniteler kullanıldığında ısı kayıplarında ortalama % 50 civarında azalma gözlemlenmekte ve büyük oranda enerjiden tasarruf sağlanmaktadır.

Yalıtımlı ve yalıtımsız bir konutun çevre kirliliği açısından verdiği zarar değerlendirilmiş ve Tablo 2.3'teki durum gözlemlenmiştir [5]. Binaların ısı yalıtımlı hale getirilmesi durumunda zararlı gazların yaklaşık olarak % 70 - 75 oranında atmosfere salınımının önlenebileceği gözlemlenmiştir.

Tablo 2.3: Örnek binanın yalıtımlı ve yalıtımsız olması durumunda olası hava kirletici atık miktarları.

	Mevcut/Yalıtımsız		Isı Yalıtımlı	
Zararlı Maddeler	İstanbul	Elazığ	İstanbul	Elazığ
CO_2 (ton/yıl)	11,0	16,6	2,9	4,1
SO_2 (kg/yıl)	1,8	2,8	0,5	0,7
NOx (kg/yıl)	21,0	31,9	5,7	7,9
CO (kg/yıl)	7,2	10,9	1,9	2,7
CxHy (kg/yıl)	1,5	2,4	0,4	0,6
Partikül (kg/yıl)	5,3	8,0	1,4	2,0

Binaların yalıtım derecelerinin "yetersiz" seviyeden "iyi" seviyeye getirilmesi durumunda ısı ihtiyacında % 74,7 oranında çok ciddi bir azalma meydana gelmektedir. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere, yalıtım seviyesi arttıkça enerji tüketimi azalarak yaklaşık % 75 civarında ısınma enerjisinden tasarruf sağlanmaktadır. Bu tasarrufa ait datalar Tablo 2.4' te gösterilmiştir [5].

Tablo 2.4: Yalıtım derecelerine göre ısı ihtiyacı.

Yalıtım Derecesi	Dış Kapılar ve Pencereler	Çatı	Dış Duvar	Döşeme	Isı İhtiyacı kWh/Yıl
Yetersiz	Çift Cam	18 cm Beton	30 cm delikli tuğla	18 cm Beton	34.790
Orta	Çift Cam	+ 5 cm yalıtım	+ 5 cm yalıtım	+ 5 cm yalıtım	15.2 80
İyi	Üç Cam	+ 15 cm yalıtım	+ 12 cm yalıtım	+ 10 cm yalıtım	8.79 0

Tablo 2.4' te gösterilen nedenlerden dolayı, büyük oranda enerji tüketimin olduğu binalarda, ulusal ve bölgesel mevsim koşulları göz önünde bulundurularak, ısı yalıtımının zorunlu tutulması artık kaçınılmazdır.

Isı yalıtım malzemelerinin ısıya karşı yalıtım sağlamakta olan hammaddelerine göre yapılan sınıflandırma Tablo 2.5 'te, ısı yalıtım malzemelerinin uygulama standartları gösterilmiştir [3]. Tablo 2.6' da, ısı yalıtım malzemelerinin yapılarına göre sınıflandırılası ise Tablo 2.7' de verilmiştir.

Tablo 2.5: Isı yalıtım malzemelerinin yapıldığı hammaddeye göre sınıflandırılması.

Isı Yalıtım Malzemeleri			
Bitkisel ve hayvansal kökenli malzemeler	Mineral kökenli malzemeler	Sentetik malzemeler	Yüksek performanslı malzemeler
-Mantar -Ahşap -Talaş ve lif -Hayvansal dokumalık lifler -Bitkisel dokumalık lifler -Saman -Yosunlar vb.	-Cam yünü -Taş yünü -Seramik yünü -Cam köpüğü -Fosil silisler vb.	-Polietilen -Polivinilklorür köpükler (PVC) -Genleştirilmiş polistiren köpük (EPS) -Ekstrüde polistiren köpük (XPS) -Poliüretan köpük (PUR) -Fenolformaldehit köpükler vb.	-Saydam yapılı yalıtkanlar -Vakumlanmış yalıtım panelleri -Kompozit yalıtkanlar -Aerojel

Tablo 2.6: Isı yalıtım malzemeleri ürün standartları.

Cam yünü	TS 901 EN 13162: 2010
Taşyünü	TS 901 EN 13162: 2010
Genleştirilmiş polistren (EPS)	TS 7316 EN 13163: 2010
Ekstrüde polistiren (XPS)	TS EN 13164: 2010
Poliüretan (PUR/PIR)	TS EN 13165: 2010
Fenol köpüğü	TS EN 13166: 2010
Cam köpüğü	TS EN 13167: 2010
Ahşap lifli levhalar	TS EN 13168: 2010
Genleştirilmiş perlit (EPB)	TS EN 13169: 2010
Genleştirilmiş mantar (ICB)	TS EN 13170: 2010
Ahşap yünü levhalar	TS EN 13171+A1: 2015

Tablo 2.7: Yapılarına göre ısı yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması.

Isı Yalıtım Malzemeleri		
Lifli Malzemeler	Köpük Malzemeler	
Mineral Yünü	Sert Köpük Malzemeler	Yumuşak Köpük Malzemeler
Taş Yünü	Genleştirilmiş Polistiren Köpük (EPS)	Elastomerik kauçuk köpüğü
Cam Yünü	Ekstrüde Polistiren Köpük (XPS)	Polietilen köpük
Ahşap Yünü	Poliüretan Köpük (PUR/PIR)	Melamin köpüğü
		Fenol köpüğü
		Genleştirilmiş perlit
		Kalsiyum silikat
		Doğal mantar
		Cam köpük

Isı yalıtım malzemelerinin gözenekli olmaları, yalıtım özelliklerini artıran bir parametre olarak incelendiğinde, ısı yalıtım malzemelerini açık ve kapalı gözenekli olarak sınıflandırabiliriz. Açık gözenekli ısı yalıtım malzemeleri, mineral yünü (camyünü, taşyünü), ahşap yünü gibi lifli malzmeler, kapalı gözenekli ısı yalıtım malzemeleri ise ekstrüde polistiren köpüğü (XPS), cam köpüğü gibi malzemelerdir.

2.1. Yaygın Olarak Kullanılan Isı Yalıtım Malzemeleri

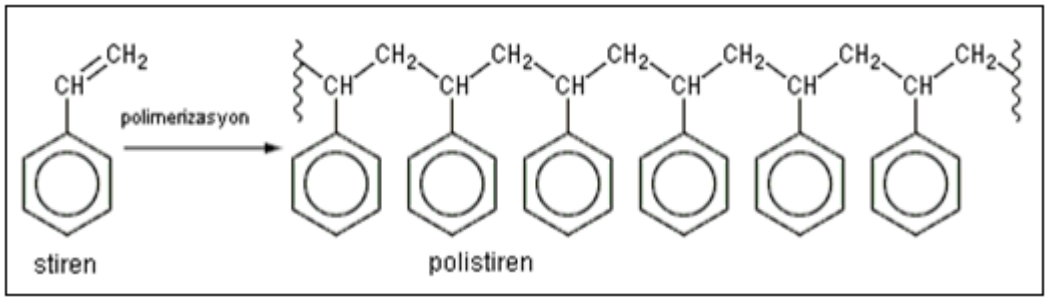
Isı yalıtım malzemelerini Tablo 2.5' de, belirtildiği gibi sınıflandırmak mümkündür [3]. Günümüz şartlarında bitkisel ve hayvansal kökenli malzemelerin istenilen seviyelerde yalıtım özelliği göstermesi mümkün değildir. Yüksek performanslı malzemeler ise üretim maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle belirli alanlarda kullanılmaktadırlar. Günlük hayatta ise en çok kullanılan ısı yalıtım malzemeleri sentetik ve mineral kökenli malzemelerdir.

2.1.1. Sentetik Isı Yalıtım Malzemeleri

Sentetik malzemelerin içerisinde ısı yalıtımında en çok kullanılan malzemeler genleştirilmiş polistiren köpük, ekstrüde polistiren köpük ve poliüretan köpüktür.

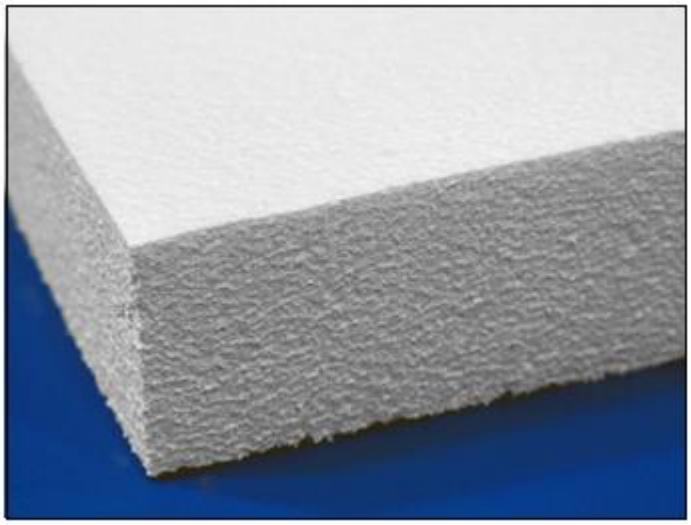
2.1.1.1. Genleştirilmiş Polistiren Köpük (EPS)

Polistiren köpüklerin ana maddesi olan stiren (C_8H_8), petrol veya doğal gazın etilen (C_2H_4) ve benzen (C_6H_6) ile tepkimeye girmesi ile oluşturulur. Benzen ise kömürden veya petrolden sentezlenir. Stiren, ısı veya benzoil peroksit gibi bir başlatıcı yardımıyla polimerize edilir. Stirenin polimerizasyonu Şekil 2.1' de gösterilmiştir. Polimerizasyonun durdurulması zordur, bununla birlikte, oksijen, kükürt ya da kinol inhibitörleri kullanılabilir [6].



Şekil 2.1: Stirenin Polimerizasyonu.

Genleştirilmiş polistiren köpükler, polistiren hammaddesinin su buharı ile temas etmesi durumunda içerisinde bulunan pentan gazının genleşmesiyle büyük bloklar halinde şişirilip ve sıcak tel ile kesilerek üretilirler. Levha şeklinde kalıp içerisinde şişirilerek de üretilebilirler. Şekil 2.2' de EPS köpüğe örnek gösterilmiştir [7].

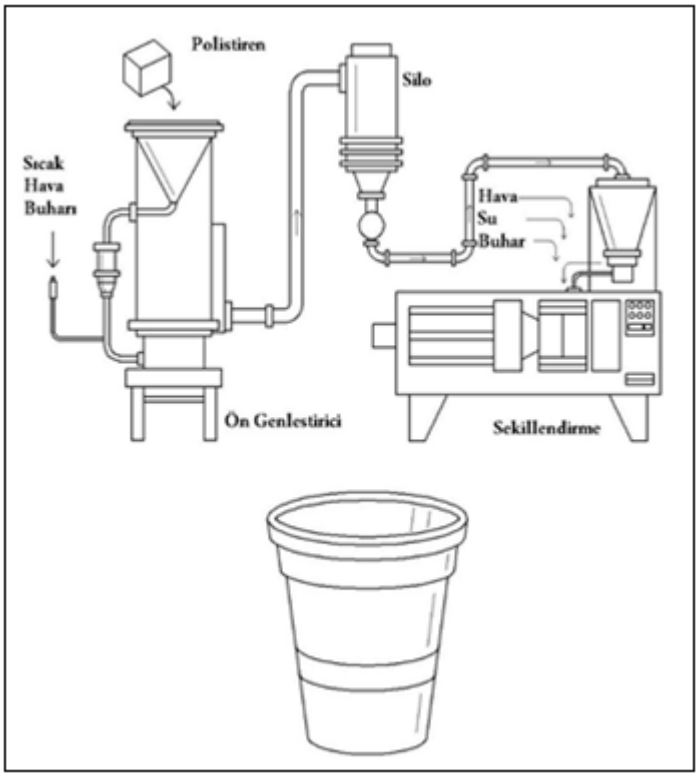


Şekil 2.2: EPS köpük.

EPS üretiminde ilk basamak polistiren taneciklerinin 80 - 100 °C sıcaklıkta buhara maruz bırakılmasıyla pentan gazı ile her biri birbirinden bağlantılı olmayacak şekilde ön genleştirilmesidir. İkinci aşama ise EPS' nin dinlendirme aşamasıdır. Şişirilmiş EPS tanecikleri az miktarda pentan gazı ve yoğunlaşmış buhar içerirler. Bu aşamada tanecikler soğurken oluşan gözenekli yapıda, pentan gazı yerine kademli olarak hava dolmaya başlar. Ardından, EPS belirli bir şekil (bloklar, panolar) vermek için kalıplanır. Bu aşamada köpük şeklini korumak, genleşmeyi devam ettirmek ve taneciklerin birbirleri ile tutunmasını artırmak için tekrar buhara maruz bırakılır. Bu aşamada buhar her bir taneciğin birbiri ile birleşmesine yol açar ve homojen bir ürün oluşur. Kısa süreli soğuma aşamasından sonra EPS bloğu kalıptan çıkarılır ve kızgın tel kullanımı ya da bir başka yöntemle şekillendirme işlemi yapılır. İstanbul Ticaret Odası (İTO) tarafından yapılan araştırmaya göre Tablo 2.8' de EPS köpüğün özellikleri, Şekil 2.3' de ise EPS' nin üretim şeması gösterilmiştir [1],[6].

Tablo 2.8: EPS köpüğün özellikleri.

Termal İletkenlik λ (W/m.K)	0,040 ort.
Kullanım Sıcaklığı (°C)	-180 / +75
Yanma Sınıfı	B1 - B2
Yoğunluk (kg/m^3)	15 - 30
Buhar Difüzyon Direnç Katsayısı	20 -80
Su Emme (Hacimce %)	0 - 5
Mekanik Dayanım (kPa)	50 - 150



Şekil 2.3: EPS' nin üretim şeması.

2.1.1.2. Ekstrüde Polistiren Köpük (XPS)

XPS 1940'lı yılların başında Dow Kimya Şirketi tarafından Amerika'da askeri amaçlı talep üzerine yüzer sallar için üretilmiştir. Üretim prosesi olarak ekstrüzyon makinelerinde blok halinde ekstrüzyon ile üretilir. Ekstrüder içerisinde polistiren eritilerek köpükleştirici ajan olarak CO_2 veya HFCKW (kısmen halojenleşmiş floroklorokarbon) eklenerek geniş delikli bir kanaldan geçirilerek XPS blokları üretilir. Oluşan bloklar bir soğutma bölgesinden geçtikten sonra kesme makinesi ile kesilerek panel haline getirilir ve kenarları şekillendirilir. Köpükler panelin dış yüzeyinde kalır [8]. Şekil 2.4' te XPS köpüğe örnek gösterilmiş olup, İstanbul Ticaret Odası (İTO) tarafından yapılmış araştırmaya göre Tablo 2.9' da ise XPS köpüğün özellikleri sunulmuştur [1],[9].

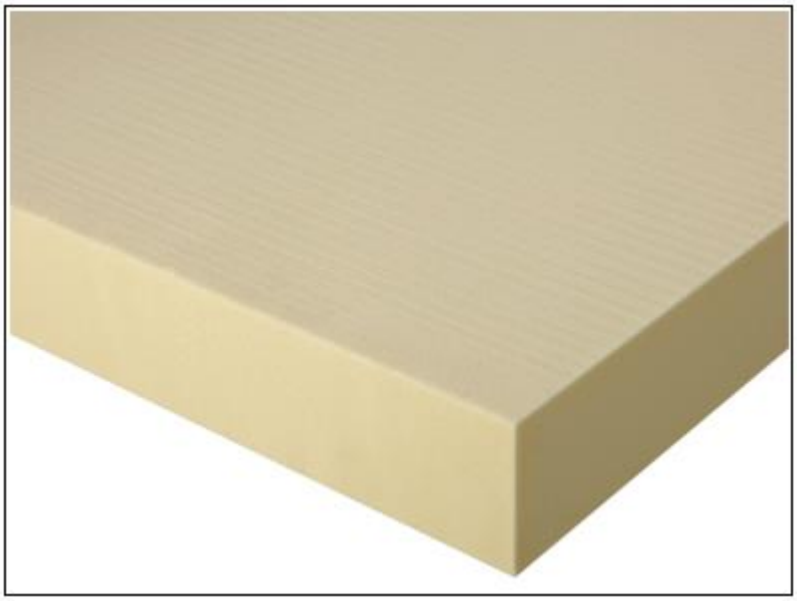
Şekil 2.4: XPS köpüğü.

Tablo 2.9: XPS köpüğün özellikleri.

Termal İletkenlik λ (W/m.K)	0,028 – 0,031
Kullanım Sıcaklığı (ºC)	-50 / +80
Yanma Sınıfı	B1
Yoğunluk (kg/m^3)	25 - 45
Buhar Difüzyon Direnç Katsayısı	80 - 250
Su Emme (Hacimce %)	0 – 0,5 max.
Mekanik Dayanım (kPa)	100 - 500

2.1.1.3.Poliüretan Köpük (PUR/PIR)

Poliüretan köpüğü, iki ayrı komponent olan poliol ve izosiyanatın tepkimeye sokulması ile oluşur. Genellikle levha, sandviç panel yaya yapıştırıcı özelliği ile püskürtme yöntemi ile kullanılan bir malzemedir. Son yıllarda gelişen kimyasal özellikleri sayesinde yangın dayanımları da oldukça yükselmiştir. Şekil 2.5' te poliüretan köpüğüne bir örnek olarak gösterilmiştir [10]. Tablo 2.10' da ise poliüretan köpüğünün özellikleri sunulmuştur [1].



Şekil 2.5: Poliüretan köpüğü.

Tablo 2.10: Poliüretan köpüğün özellikleri.

Termal İletkenlik λ (W/m.K)	0,035
Kullanım Sıcaklığı (^oC)	-200 / +110
Yanma Sınıfı	B1 – B2 – B3
Yoğunluk (kg/m^3)	30 - 40
Buhar Difüzyon Direnç Katsayısı	30 - 100
Su Emme (Hacimce %)	3 – 5 max.
Mekanik Dayanım (kPa)	100 - 400

2.1.2. Mineral Kökenli Yalıtım Malzemeleri

Isı yalıtım malzemelerinde mineral kökenli malzemeler yanmazlık özelliklerinden dolayı oldukça yaygın olarak kullanılırlar. En çok kullanılan mineral kökenli malzemeler cam yünü ve taş yünüdür.

2.1.2.1.Cam Yünü

Silis kumunun yüksek sıcaklıklarda ergitilerek elyaf haline getirilmesi ile elde edilen bir ısı yalıtım malzemesidir. Şilte ve levha halinde kullanılabilir. Şekil 2.6’ da

cam yününe örnek olarak gösterilmiştir [11]. Tablo 2.11' de ise cam yününün teknik özellikleri gösterilmiştir [1].

Şekil 2.6: Cam yünü.

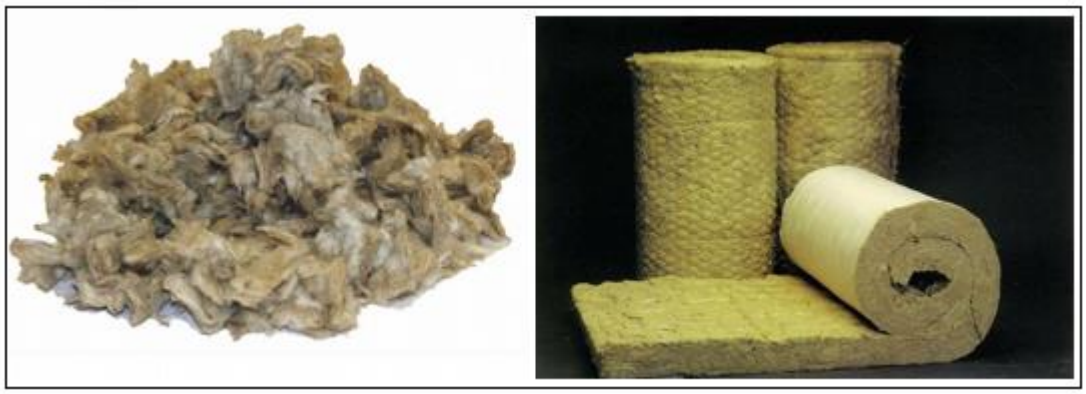
Tablo 2.11: Cam yününün özellikleri.

Termal İletkenlik λ (W/m.K)	0,04
Kullanım Sıcaklığı (ºC)	Max. 250
Yanma Sınıfı	A
Yoğunluk (kg/m^3)	14 - 100
Buhar Difüzyon Direnç Katsayısı	1
Su Emme (Hacimce %)	3 - 10
Mekanik Dayanım (kPa)	15 - 65

2.1.2.2. Taş Yünü

Bazalt, diyabaz, dolomit gibi kayaların karışımlarının yüksek sıcaklıklarda ergitilerek elyaflaştırılması ile elde edilen mineral kökenli yün çeşididir. Yangın dayanımları yüksek olduğundan dolayı yangın dayanımı açısından önem arz eden yapılarda kullanılabilirler. Şilte, sandviç panel ya da yün olarak kullanılırlar. Düşük yoğunluklu taş yünü belirli bir dayanımları olmadığından genellikle dolgu olarak kullanılırlar. Yüksek yoğunluklu taş yünleri ise sandviç panellerin aralarında yahut çatıların üzerine yalıtım malzemesi olarak halı şeklinde serilirler. Ayrıca taş yünü açık gözenekli bir yapıya sahip bir malzeme olduğu için, boşluklarına giren hava sürtünme

kayıplarına yol açar. Böylece akustik enerjinin bir kısmının ısı enerjisine dönüşerek ses yalıtımı sağlanmış olur. Şekil 2.7' de dökme taş yününe ve şilte taş yününe örnek ürün gösterilmiştir [12],[13]. Tablo 2.12' de ise taş yününün özellikleri gösterilmiştir [1].



Şekil 2.7: Taş yünü çeşitleri.

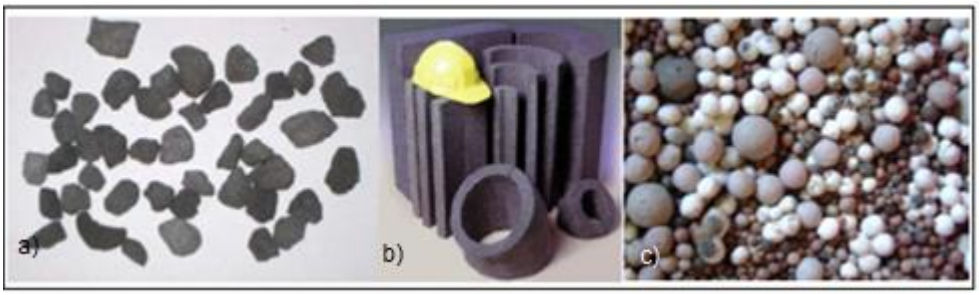
Tablo 2.12: Taş yününün özellikleri.

Termal İletkenlik λ (W/m.K)	0,04
Kullanım Sıcaklığı (ºC)	Max. 750
Yanma Sınıfı	A
Yoğunluk (kg/m^3)	30 - 200
Buhar Difüzyon Direnç Katsayısı	1
Su Emme (Hacimce %)	2,5 – 10
Mekanik Dayanım (kPa)	15 - 65

3. CAM KÖPÜĞÜ

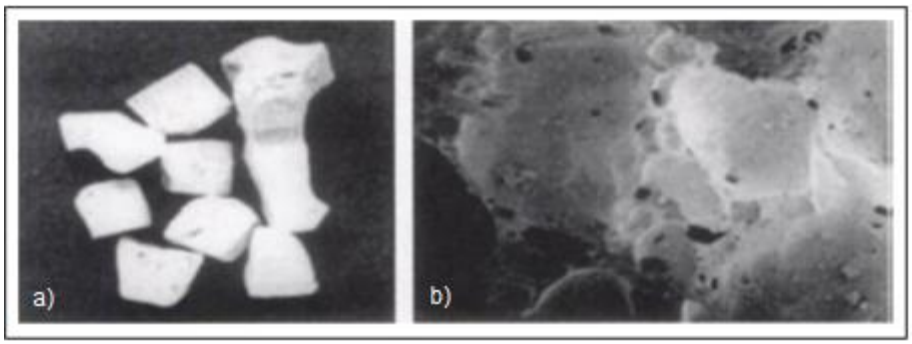
Mineral kökenli cam veya cam benzeri malzemelerin eriyiklerine çeşitli gaz veya gaz oluşturucu maddelerin eklenmesiyle oluşturulmuş, kabarcık oranı yüksek yalıtım malzemesine cam köpüğü denmektedir. Sonuçta ortaya çıkmış olan gözenekli yapı çok hafif olmasının yanı sıra yüksek basınç dayanımına ve boyutsal stabiliteye sahiptir. Bu özelliği cam köpüğünün özellikle termal ve akustik yapısal yalıtım malzemesi olarak kullanılmasını sağlamıştır [14].

Cam köpüğünün üç ana çeşidi bulunmaktadır. Şekil 3.1' de cam köpüğü çeşitleri gösterilmiştir [15]. Cam köpüğünün ilk çeşidi gevşek cam köpüğü agregasıdır. Sürekli levhalar halindeki cam köpüğünün kırılması ile elde edilir. Cam köpük agregalar genellikle beton, zemin yalıtımı, temel kazığı, tavan ve taban kaplamaları, dolgu yalıtımda agrega olarak kullanılmaktadır. Cam köpüğünün ikinci çeşidi kalıp yardımıyla üretilmiş sürekli ürünlerden meydana gelen bloklardan oluşmuştur. Cam köpük bloklar genellikle prekast beton paneler, beton tuğlalar, boru yalıtımı, duvar izolasyonu, zemin ve çatı kaplamaları uygulamalarında kullanılmaktadır. Birbirinden bağımsız bloklar halinde üretilen cam köpüğü, camın köpükleyici ile karıştırıldıktan sonra kalıp içerisinde fırında pişirilmesi ile oluşturulur. Köpükleşme sonrası, blokların iç gerilimlerini azaltmak ve daha homojen bir yapıya sahip olmaları için tavlama yapılmaktadır. Peletleme işlemi ile üretilen ve daha sonra blok, panel, döşeme yapımında kullanılan küresel cam köpüğü peletleri de üçüncü çeşittir. Küresel peletler, peletleme prosesi sonrası üretilmektedir. İnce ince öğütülmüş cam ve köpük yapıcı ajanın küre haline getirilerek döner fırında pişirilmesi ile oluşturulur. Pişirme işlemi sonrasında, cam köpüğü kürecikleri ikinci türde olduğu gibi tavlanır ve soğutulur. Ürün blok, panel veya levha üretimlerinde kullanılabilir. Yapılan bir araştırmada; ağırlıkça % 50' ye kadar olan cam suyunun, atık NaCa silikat cam tozuna eklenmiş ve 805 ºC' de 1 dk pişirilerek yüksek porozitede granüller elde edilmiştir [15], [16].

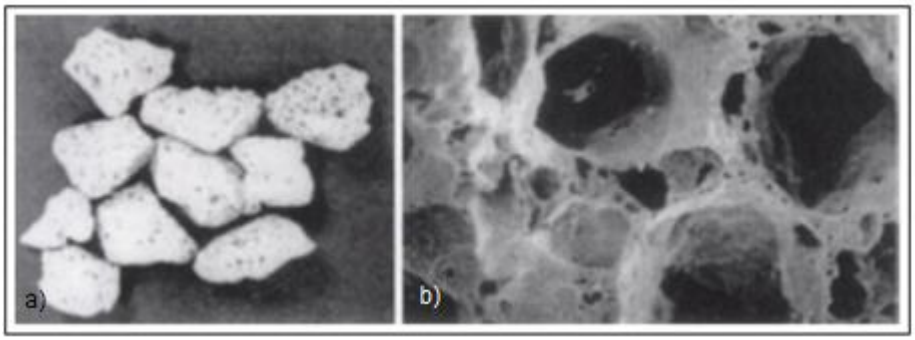


Şekil 3.1: Cam köpüğünün üç ana çeşidi: a) Gevşek cam köpüğü agregası, b) Bloklar, c) Peletleme.

Cam köpüğü sayısız mikro boşluğa sahip gözenekli bir malzemedir. Cam köpüğünün içerdiği boşlukların yapısı süreksiz ve sürekli olmak üzere iki şekilde incelenebilir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3' te aynı özgül ağırlığa sahip (3,93 kN/m^3) iki farklı boşluk yapısına sahip cam köpüğü malzemesinin Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş mikro yapı resimleri gösterilmiştir [17].



Şekil 3.2: Süreksiz boşluklara sahip cam köpüğünün; a) görünümü b) mikro yapısı.



Şekil 3.3: Sürekli boşluklara sahip cam köpüğünün; a) görünümü b) mikro yapısı.

3.1. Cam Köpüğünün Özellikleri

Cam köpük malzemesinde bulunması gereken özellikler BS EN 13167:2012+A1:2015 standardında açıklanmıştır. Bu standarda göre cam köpüğünün diğer yapı malzemeleri ile özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 3.1' de gösterilmiştir [18].

Tablo 3.1: Cam köpüğün yoğunluk ve ısı iletkenlik özelliklerinin diğer yapı malzemeleri ile karşılaştırılması.

Malzeme	Yoğunluk (kg/m^3)	Termal iletkenlik (kcal/mhºC)
Tuğla Kili	1800	0,75
Klinker	2000	0,90
Çakıllı Beton	2200	1,10
Köpük Beton	500	0,08
Cam Köpüğü	200-300	0,06

Cam köpüğünün yoğunluk ve termal iletkenlik özelliklerinin tuğla kili, klinker, köpük beton, çakıllı beton ile karşılaştırıldığında, daha düşük yoğunluğa ve termal iletkenlik katsayısına sahip olduğu Tablo 3.1' den anlaşılmıştır. Kelly ve arkadaşlarının çalışmaları ile Foamglass Şirketinin çalışmaları derlenerek oluşturulan Tablo 3.2' de ise cam köpüğünün sahip olduğu fiziksel özellikler sunulmuştur [19],[20],[21].

Tablo 3.2: Cam köpüğün fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Değer (SI)	ASTM	EN ISO
Bileşim	Soda – kireç silikat cam – fiber veya bağlayıcı içermeyen inorganik		
Kalınlık	40 - 180 mm		EN 823
Uzunluk	600 mm		EN 822
Genişlik	450 mm		EN 822
Nem Absorpsiyonu	% 0,2	C240	EN 1609, EN 12087
Su-Buhar Geçirgenliği	0 perm-cm	E 96 Wet Cup Procedure B	EN 12086 EN ISO 10456
Yoğunluk	120 kg/m^3	C303	EN 1602
Lineer Termal Genleşme Katsayısı	9 x 10^{-6}/K (25 – 300 ºC)	E228	EN 13471
Elastik Modülü	900 MPa	C 623	EN 826 Method A1
Termal İletkenlik	0,039 W/mK (0 ºC) 0,040 W/mK (10 ºC) 0,042 W/mK (24 ºC)	C177, C518	EN 12667 EN 12939 λ_D (90/90) 0.41 W/mK @ 10 ºC
Spesifik Isı	0,84 kJ/kg.ºK		
Termal Difüzivite	4,2 x 10^{-7} m^2/s		
Maksimum Servis Sıcaklığı	-268 – 468 ºC		
Su Alma Özelliği	% 90 bağıl nemde ağırlık artışı		
Asit Direnci	HF hariç diğer asit ve buharlarına karşı dayanıklıdır		
Kapilarite	Yok		
Yanabilirlik ve Aleve Karşı Dayanım	Yanmaz – alev almaz	E 186, E84	EN ISO 1182 (A1 sınıf)
Basma Dayanımı Blok	620 kPa	C165, C 240, C552	EN 826 Method A
Boyutsal Kararlılık	Mükemmel - çekme, kabarma, şişme olmamaktadır.		EN 1604 (DS 70/90)
Eğilme Mukavemeti, Blok	480 kPa	C203, C240	EN 12089 (BS 450)
Cam Köpük Karakteristikleri	Suya dayanıklı, dirençli, yüksek basma dayanımı, ateşe ve kimyasala dayanıklı, kolay şekillendirilebilir, yanmaz, su geçirmez, boyutsal olarak kararlı, ekolojik		

3.2. Cam Köpüğünün Tarihçesi

Cam köpüğü malzemesi 1930' lu yıllardan beri ticari olarak kullanılmaktadır. İlk olarak işlenmemiş özel formülle üretilmiş bir cam kullanılmasıyla üretilmeye başlanmıştır. 1930'lu yıllarda cam köpük üretimi için 3 patent çıkarılmıştır: 1931 yılında, Amerikalı Albert L. Kern, % 20 oranında linyit, kömür ahşap gibi yanabilir malzeme içeren silika ile hidroklorik asit ve sodyum hidroksit solüsyonunu köpük yapıcı malzeme olarak kullanmış ve cam köpük üretim yöntemi geliştirmiştir. Hazırladığı karışımı 1500 ºC' de sinterleyerek gözenekli ürün elde etmiştir. 1932 yılında Moskova'daki Mendeleev Enstitüsü'ndeki laboratuvar mühendisi I. I. Kitaigorodsky cam köpük üretimi için farklı bir yöntem geliştirmiştir. İyi öğütülmüş toz haldeki cam ile kalsiyum karbonatın 850 ºC'ye kadar ısıtılıp, sonrasında çelik kalıplarda soğutulması ile cam köpük elde etmiştir. 1934' te ise iyi öğütülmüş silika, boraks ve çinko oksit karışımından elde edilmiş olan cam köpüktür. Bu teknoloji daha sonra Pittsburgh Plate Glass & Corning Glass Works (Pennsylvania, USA) laboratuvar teknisyeni olan William O. Lytle tarafından geliştirilmiş ve 1940 yılında hava ve su buharı gibi ilave köpük yapıcılar kullanarak daha fazla gözenek içeriğine sahip cam köpüğünün üretim patentini almıştır. Bu teknoloji ile üretilmiş cam köpüğü hafif, rijit, ateş-hava-kemirgen ve böceklere dayanıklı yeni yalıtım malzemesi olarak piyasada kendine yer bulması kolay bir ürün olmuştur. Bu cam köpüğün seri üretimi 1943 yılında Port Allegany' de (Pennsylvania, USA) başlamıştır.

Şu anda ise dünya üzerinde cam köpüğü üretimi yapan irili ufaklı birçok firma bulunmaktadır. Aşağıda cam köpüğü üretimi yapan önemli üreticilerin isimleri bulunmaktadır [15].

- Pittsburgh Corning, UK
- Cell-u-Foam, USA
- Misapor AG, Switzerland
- Geofil, Hungary
- Hasopor AG, Norway
- Millcell AG, Switzerland
- Liaver, Germany

3.3. Cam Köpüğünün Avantajları ve Kullanım Alanları

Cam köpüğü malzemesi yüksek dayanımlı hafif yalıtım malzemesi olmasının yanında enerji verimliliğini gerektiren standartları sağlaması sebebiyle ABD ve Avrupa'da uzun yıllardan beri kullanılan bir yalıtım malzemesidir. Kyoto Sözleşmesi Ek 1' de yer alan ülkelerin karbon salınımını düşürmekle yükümlü olduğu bilinmektedir. Karbon salınımında en büyük etken ise binaların ısıtılmasından kaynaklanmaktadır. Bu bakımdan metrekare başına düşen ısı kaybının azaltılması karbon salınımının engellenmesi açısından oldukça önem taşımaktadır. İnşa edilen yeni binalarda cam köpüğü kullanımı enerji tüketimini büyük ölçüde düşüreceğinden bu yapıların karbon emisyonlarında da düşüş gözlenecektir.

Cam köpüğünün enerji korunumuna katkı sağlamasının yanı sıra hafif olması sebebiyle de birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar imalat üretkenliği, dizayn esnekliği, düşük nakliye ve işletme maliyetleri olarak gösterilebilir. Ayrıca cam köpüğü kemirgenlere ve yangına karşı dirençlidir ve nem tutmaz, toksin madde içermez ve ses emici özelliğe sahiptir.

Bir yalıtım malzemesi olarak cam köpüğü, yüksek yalıtım özelliklerine sahip olan mineral kökenli lifler ve polimerik malzemeler ile kıyaslanabilmektedir. Cam köpüğü ayrıca üst düzey dayanım özelliklerine de sahiptir. Ayrıca polimerik malzemelere göre yangın dayanımı açısından üstün olması, mineral kökenli malzemelere göre ise boyutlarının stabil olması cam köpüğünü polimerik ve mineral kökenli malzemelerden avantajlı kılmaktadır.

Cam köpüğünün arzu edilen özellikleri yüksek dayanım, düşük birim ağırlık ve düşük ısıl iletkenliktir. Bu özellikleri cam köpüğüne kazandıran, aralarında ince duvarlar olan çok sayıda küçük, eşit büyüklükte hava kabarcıklarıdır. Malzeme camdan üretildiğinden doğal olarak çoğu ortamda inert olup biyolojik, ısıl, kimyasal ve çevresel bozulmalardan etkilenmez [15].

2. Dünya Savaşı 'nın sonlarına doğru ABD limanlarında denizaltı ağları için kullanılan yüzdürme blokları cam köpüğü malzemesinin ilk uygulama alanlarından biridir. O dönemde kullanılan mantarın bulunması zordu ve genellikle talep edilenden daha az miktarda bulunabiliyordu ayrıca cam köpüğünün denizaltı ve su üstü silah atışları nedeniyle parçalansa dahi yüzme özelliğini koruyabildiği ve ağları tutmaya devam edebildiği farkedilmişti. Aynı dönemlerde mantar, ısı yalıtım malzemesi olarak

soğuk hava depolarında da kullanılıyordu. Nem geçirimsiz olma özelliği nedeniyle cam köpüğü soğuk hava depolarında kullanım için de çok uygundu. Ortam havasından soğuk yüzeye gelen su buharı akımı ısı yalıtım malzemesi doygunluğu için büyük risk oluşturmaktadır. Bu durum bu tür bir su buharı akımına karşı geçirimsiz olan cam köpüğü için bir sorun teşkil etmiyordu. Bu nedenle 1950'lerden 1970'lere kadar soğuk hava depolarında cam köpüğü kullanımı yaygınlaşmıştır. Yine o dönemlerde cam köpüğü ısı yalıtım malzemesi sanayi borularında da kullanıldı [22].

Cam köpüğü;

- Temel ve çatı yalıtımında,
- Beton ve sıva içerisine karıştırılarak,
- Ateşe dayanıklı bölmelerde,
- Çift duvar arasında, tuğla ve briket boşluklarında,
- Tank ve boru yalıtımında,
- Toz tutma ve süzme işlemlerinde,
- Plastiklere karıştırılarak hafif malzeme yapımında,
- Yağ ve diğer kimyasal maddeleri emici olarak kullanılmaktadır.

Isı yalıtımı amacıyla kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin kullanıldıkları bölgelerin iklim koşullarına göre uygulama kalınlıkları farklılık göstermektedir. Türkiye' de dört farklı iklim bölgesi bulunmaktadır. Birinci iklim bölgesinden dördüncü iklim bölgesine doğru uygulanan ısı yalıtım malzemelerinin kalınlıkları artmaktadır. Aynı özellik cam köpüğü malzemesi içinde geçerli olmaktadır. Örneğin; sıcaklığın 0 ºC üzerinde olduğu bölgelerde cam köpük uygulama kalınlığı 5,1 cm ile 8 cm arasında, sıcaklığın 0 ºC'den daha düşük olduğu bölgelerde uygulama kalınlığı 10 - 25 cm arasında değişkenlik göstermektedir. Saeed ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre binalar ve odalar için önerilen cam köpük malzemesi kalınlık değerleri Tablo 3.3' te gösterilmiştir [18].

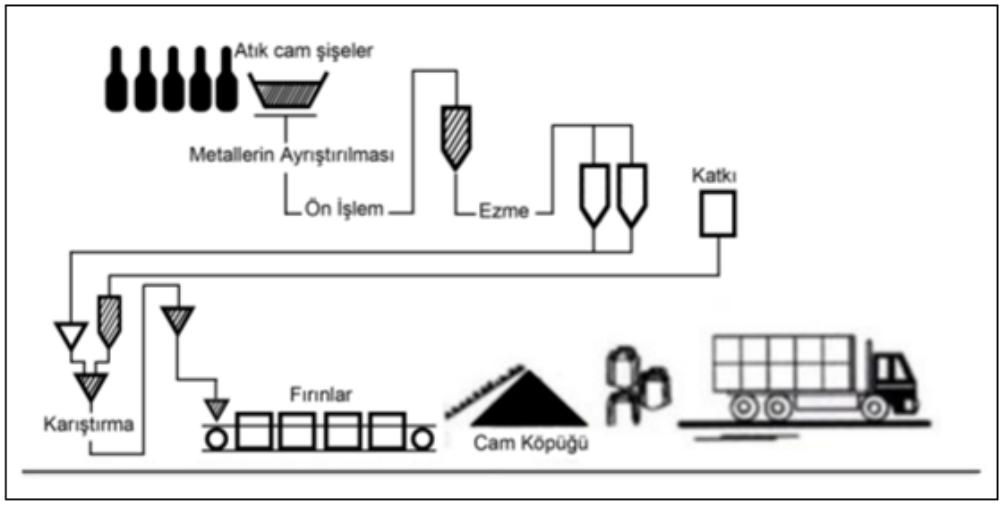
Tablo 3.3: Bina ve soğuk odalar için önerilen cam köpük malzemesi kalınlık değerleri.

Sıcaklık	Kalınlık
16	5,1
10	5,1
4	8
-1	10
-7	13
-12	15
-18	18
-23	20
-29	20
-34	23
-40	25
-46	25

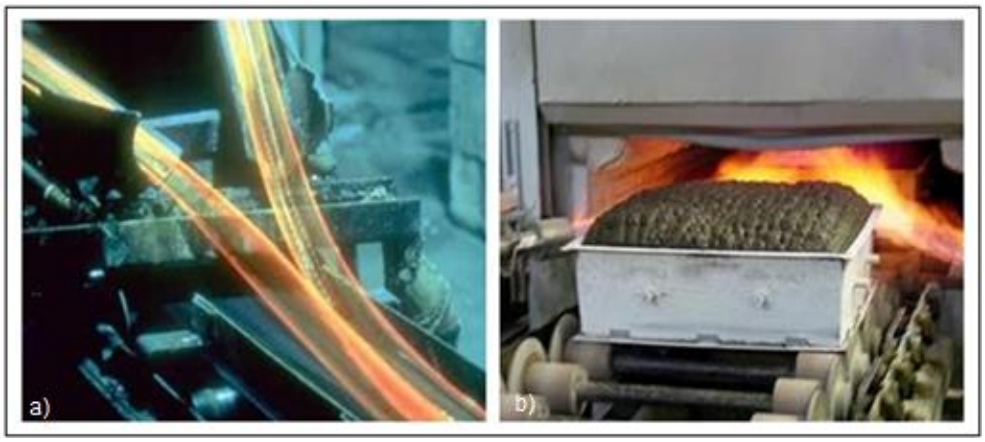
4. CAM KÖPÜĞÜ ÜRETİMİ

Cam köpüğü üretiminin temeli cam içerisinde 700 – 900 °C sıcaklık aralığında bir gaz meydana getirilip bu gazın genleştirilmesiyle beraber genleşme sonucunda boşluklu hücresel bir yapı oluşturulmasına dayanır.

Cam köpüğü eritilmiş veya sinterlenmiş cam parçalarından imal edilebilir. Sonraki aşamada köpük yapıcı malzeme ile karıştırılan cam tozları ısıtılır. Isıtılan köpük yapıcı madde bir gaz açığa çıkarır ve bu gaz erimiş camı genleştirir. Onitsuka ve arkadaşlarının çalışmasından alınan cam köpüğünün üretim süreci Şekil 4.1' de özetlenmiştir [15]. Şekil 4.2 ve 4.3'te Foamglass Co.' ye ait üretim resimleri gösterilmiştir [23].



Şekil 4.1: Cam köpüğünün üretim süreci.



Şekil 4.2: a) Ergimiş cam, b) Cam köpüğü.

4.1. Cam Köpüğü Üretim Aşamaları

Köpük üretimindeki ana kademeler şöyledir:

Nemli harmanda oluşturulan kürecikler kurutulur ve birbirlerine yapışmaması amacıyla ayırıcı bir madde ile karıştırıldıktan sonra fırına verilir.

Köpürme esnasında;

- Yüksek sıcaklığın etkisi ile cam tanecikleri birbirine yapışarak köpük yapıcı maddeyi hapseder,
- Köpük yapıcı maddenin bozunması veya fırın atmosferi ile reaksiyona girmesi sonucunda gaz açığa çıkar,
- Açığa çıkan gaz, cam içinde kabarcıklar oluşturarak kütlenin yoğunluğunu düşürür.

Daha sonra köpüren cam tavlanarak soğutulur. Cam köpüğü üretimi için gerekli olan basamaklar, cam seçimi, camın öğütülmesi, köpük yapıcı malzeme ile karıştırma, sinterleme ve tavlamadır.

4.1.1. Cam Seçimi

Cam kırığı (atık cam) seçilirken dikkat edilmesi gerekenler;

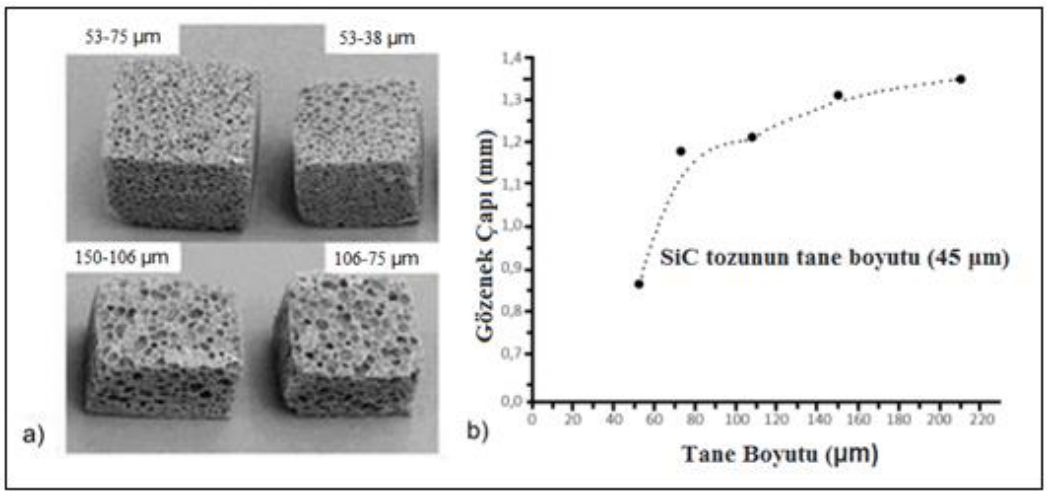
- Hammadde olarak camın yumuşama noktası düşük olmalıdır. Genellikle, cam tozunun sinterleme sıcaklığı, karbonun oksitlenme sıcaklığından daha yüksektir. Yanma öncesi camın sinterlenmesi gerçekleşirse, genleşmeden kaynaklı olarak zayıf ve uniform olmayan bir yapı elde edilir.
- Pişirim sıcaklığı civarında, camın viskozite değişim hızı düşük olmalıdır. Bu sayede, daha uniform boşluk boyutuna sahip cam köpük elde edilir.
- Oksijen kaynağı olan bileşenden doğru oranda içermelidir. Bu bileşenler, genleşme kapasitesini etkiler, oksitleyici arıtma bileşeni olarak kullanılmalıdır ve miktarının kontrolü önemlidir.
- Termal genleşme katsayısı küçük olmalıdır. Bu durum, tavlama ve soğuma süresini kısaltmaktadır.

- Kimyasal kararlılığa sahip olmalıdır. Cam köpük ürünleri çoğu uygulamalarda zor şartlarda kullanıldığından kimyasal kararlılık gerekli bir özelliktir.
- Devitrifikasyona eğilimi düşük olmalıdır. Devitrifikasyon camın kristalleşmesidir bu da, oluşan ürünün mukavemetini düşürmektedir.

4.1.2. Camın Öğütülmesi

Cam köpük üretiminde kullanılan cam tozunun tane boyutunun 50 µm ve altında olması gerekmektedir.

Başlangıç malzemesi olarak kullanılan camın öğütülmesi ve tane boyutunun 0,4 mm' den daha az olması gerekmektedir, aksi takdirde köpüklenme işlemi tamamen durur. Elde edilen cam köpüğün gözenek çapı ile başlangıç hammaddelerin tane boyutu arasında kesin bir ilişki bulunmaktadır. Örneğin, Şekil 4.3 te' de % 5 SiC katkılı soda-kireç camından farklı boyutlarda cam kullanılarak elde edilmiş cam köpükler bulunmaktadır. Cam köpükteki gözeneklerin, camın tane boyutu ile ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.4 b' de gösterilmektedir [24].



Şekil 4.3: a) % 5 SiC (45 µm) katkılı cam köpük malzemesinde başlangıç cam tane boyutunun mikro yapı üzerine etkisi. b) SiC katkılı cam köpükte cam tane boyutuna bağlı olarak değişen gözenek boyutu.

Köpük yapıcının tane boyutu da gözenek boyutunu ve köpüklenme davranışını etkilemektedir [25]. İri taneli silisyum karbür (SiC) (74 - 78 µm) içeren karışım 950 ºC' de zor köpüklenirken, ince taneli SiC (4 - 7 µm) içeren karışımın daha düşük sıcaklıklarda hacminde fazlaca artış olmaktadır. Ayrıca, başlangıç karışımına ön

sıkıştırma yapılması da cam köpük ürünün yapısını etkilemektedir. Sıkıştırılmış tozlar ile elde edilen cam köpük gevşek tozlar ile elde edilene göre her zaman daha üniform bir yapıya sahiptir, bunun muhtemel sebebi de kapalı porozite başlangıcının daha erken olmasıdır.

Cam ve köpük yapıcı malzeme tozlarının tane boyutları birbirinden çok farklı ise elde edilen cam köpüğün mikroyapısı homojen olmayacaktır [24].

Lakov tarafından yapılan çalışmada, deneysel çalışmalarda gıda endüstrisinden elde edilen beyaz, yeşil ve kahverengi cam atığı kullanılmıştır. Cam atıklarının kimyasal kompozisyonu köpüklenme açısından çok önemlidir. Bu amaçla analiz edilen cam atıklarının kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Bu kompozisyonun tipik endüstriyel silika camına karşılık geldiği görülmektedir [26].

Tablo 4.1: Kullanılan cam atıklarının kimyasal kompozisyonu.

Oksitler	Ağırlıkça
Al_2O_3	1,77
CaO	8,67
Fe_2O_3	0,27
K_2O	0,48
MgO	2,77
MnO	< 0,01
Na_2O	13,26
P_2O_5	0,05
SiO_2	72,31
TiO_2	0,06
SO_3	< 0,03
Nem	0,11
3X	0,026

Yüksek kaliteli cam köpüğü üretiminde camın kompozisyonu, köpükleyici ajan ve sinterleme rejimi önemlidir. Toz metodunda gerçekleşen köpüklenme, camın daha viskoz olan kısımlarında meydana gelmektedir. Camın kompozisyonunda bulunan sodyum oksit (Na_2O), magnezyum oksit (MgO), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir(III)oksit (Fe_2O_3) miktarının artırılması ve silisyum oksit (SiO_2) miktarının azaltılması alternatif bir viskozite oluşturmaktadır. Camın köpüklenme sıcaklığı

artırılarak viskozitesi azaltılmaktadır. Bunun sonucunda da köpüklenme derecesi artmaktadır. Köpüklenme derecesinin artması ise, yoğunluğun azalmasına ve gözenek boyutlarının büyümesine neden olmaktadır. Diğer bir önemli nokta ise camların kristalleşme eğiliminin düşük olma zorunluluğudur, aksi halde oluşan kristaller bünyede olumsuz etki yaratmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, fırın sıcaklığının cam köpüğünün endüstriyel üretiminde çok önemli bir rol oynadığı ve bu sıcaklığın 830 - 860°C arasında olması gerektiği belirtilmiştir [26].

Vancea tarafından yapılan çalışmada pencere camı ve şişe camı atıklarının cam köpüğü üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Hammadde olarak kullanılan geri dönüştürülmüş cam atıklarının kompozisyonları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Hammadde olarak kullanılan geri dönüştürülmüş camların oksit bileşenleri.

	Kompozisyon (Ağırlıkça %)						
Geri Dönüştürülmüş Cam	SiO_2	Na_2O	K_2O	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3
Pencere Camı	71,86	13,13	0,02	5,64	9,23	0,08	0,04
Şişe camı	72,00	13,00	-	1,00	12,00	2,00	-

Kompozisyonları belirlenen pencere ve şişe camı atıkları 0,1 mm boyutunun altına granüle edilmiş ve Tablo 4.3' te belirtilen oranlarda kullanılarak cam köpük numuneleri hazırlanmıştır. Köpükleyici ajan olarak < 0,1 mm boyutlardaki % 3,03 - 5,88 arasındaki oranlarda sıva atığı kullanılmıştır.

Tablo 4.3: Cam köpük numunelerinin ağırlıkça % kompozisyonu.

Numuneler	Cam Atığı		Sıva Atığı	Görünür Yoğunluk	Maksimum Porozite
	Pencere Camı	Şişe Camı			
1	94,12	-	5,88	0,47	54,54
2	-	94,12	5,88	0,51	51,75

Pencere ve şişe camı atıkları ile üretilen cam köpükler için optimum sonuçlar 1 ve 2 numaralı numunelerde görülmüştür. Elde edilen cam köpüklerinin tamamında ısı iletkenlik değeri 0,25 W/mK'den küçük çıkmıştır. λ değeri cam köpüğünde bulunan iki temel fazın λ değerleriyle uyumludur: λ_{cam}= 0,45-1,45 W/mK ve λ_{hava}= 0,023 W/mK (porların içinde bulunan hava) [27].

4.1.3. Köpük Yapıcı Malzeme Seçimi ve Karıştırma

Cam köpük üretiminde genellikle kullanılan köpük yapıcı maddeler; silisyum karbür, siyah karbon ve kalsiyum karbonattır. Ağırlıkça % 90,3 – 98,8 oranında soda kireç camı içerisine ağırlıkça % 1,5 – 9,5 arasında köpükleştirici ajan ilave edilir.

Genel olarak, herhangi bir cam (tercihen toz formda), camın yumuşama sıcaklığı (Littleton) üzerinde ($10^{6.6}$ Pa.s viskoziteye denk gelir) bozunması ya da reaksiyonu ile gaz çıkışı gerçekleşen uygun köpük yapıcı malzeme ilavesi ile köpük formuna dönüştürülebilir. Eğer gaz oluşumu, camın yumuşama sıcaklığının altında gerçekleşirse, cam tozu kapalı gözeneğe sahip olacak şekilde sinterlenmemiştir ve gazlar bünyede hapsolur. Eğer gaz oluşumu camın viskozitesi çok düşük olduğu zaman gerçekleşirse, gazlı ürünler eriyikten uzaklaşır ve cam eriği rafine edilmiş olur [24].

Köpük yapıcılar genel olarak 2 gruba ayrılabilir:

- Camın yumuşama noktası üzerinde oksijen (O_2), karbondioksit (CO_2), su (H_2O), kükürtdioksit (SO_2) gibi gazların gelişimi ile bozunan köpük yapıcılardır. Bu gruptaki köpük yapıcılar; mangandioksit (MnO_2), kobalt(III)oksit (Co_2O_3), stronsiyum karbonat ($SrCO_3$), talk, kalsiyum sülfat ($CaSO_4$)'tır. Ağırlıkça % 1 - 5 aralığında ilave edildiklerinde etkilidirler.
- Atmosfer ve cam ile camın yumuşama noktası üzerinde etkileşir. Bu gruptaki bileşikler genellikle şeker ve nişasta gibi karbon ve karbonlu bileşiklerdir. Camın kompozisyonuna (sülfat içeriği) ve köpükleşmeyi gerçekleştiren karbon cinsine bağlı olarak ağırlıkça % 0,2 - 2 aralığında ilaveler yapılmaktadır. Köpük yapıcı gazların oluşumu, atmosfer ile karbonun oksidasyonuna bağlıdır ancak ayrıca karbonun cam içerisindeki H_2O, alkali, sülfat gibi bileşenlerle reaksiyonuna da bağlıdır. Elde edilen cam köpüklerin gözenek boyutları genellikle küçüktür. Kapalı gözenekler içindeki köpük yapıcı gazlar CO_2/CO karışımıdır [28].

Birçok köpük yapıcı malzeme olmasına rağmen SiC kullanılmasıyla cam köpüğün mikro yapısı tam olarak kontrol edilebilir. Bundan dolayı SiC etkili bir köpük yapıcı maddedir. SiC, cam atığına ağırlıkça % 0,1 ile birkaç oranında ilave edildiğinde oldukça etkili bir köpük yapıcı madde olarak görev yapmaktadır. SiC, oksitlenme reaksiyonundan kaynaklı olarak, cam içinde hava kabarcıkları oluşturarak camın köpükleşmesine sebep olmaktadır. Reaksiyon sıcaklığı, karbonatlar, karbon, organik

bileşikler gibi diğer bileşikler ile kıyaslandığında genellikle yaklaşık 1000 ºC' den yüksektir. Saf SiC' ün DTA/TGA sonuçlarına göre (4.1) ve (4.2) numaralı reaksiyonlar 900 ºC' nin üzerinde gerçekleşmektedir.

$$SiC + 2O_2 \rightarrow SiO_2 + CO_2 \tag{4.1}$$

$$SiC + O_2 \rightarrow SiO + CO \tag{4.2}$$

Başka bir olası reaksiyon ise,

$$SiC + SiO_2 \rightarrow CO_2 + 2Si \tag{4.3}$$

4.1.4. Sinterleme

Sinterlemede önemli olan basamaklar; ısıtma hızı, ısıtma süresi ve soğutma hızı gibi basamaklar ve bu basamaklarda gerçekleşen olaylar bu bölümde açıklanmıştır.

4.1.4.1.Isıtma Hızı

Cam köpüğünün optimize edilebilmesi için ısıtma hızı ısıtma mutlaka kontrol edilmesi gereken bir parametredir. Başlangıç tozlarının inceliği ve yüksek derecede dağılım, cam ve köpük ajanı taneleri arasındaki boşluklara yüksek miktarda hava girişi sağlanmalıdır. Yani düşük termal iletkenlik katsayısına sahip bir cam köpüğü elde etmek için ısıtma hızının yavaş bir şekilde artması gerekmektedir. Örneğin; yüksek ısıtma hızı (40ºC/dk) ile cam yapısında büyük çatlaklar oluşmaktadır. Isıtma hızının 5 - 10 ºC/dk olması durumunda genellikle sorunsuz olarak cam köpük üretimi gerçekleştirilmektedir.

4.1.4.2.Köpük Oluşum Sıcaklığı

Cam köpüğü üretiminde gerçekleşen reaksiyon sıcaklığı camın yumuşama sıcaklığından yüksek olduğu anda cam tanecikleri sinterlenmeye başlar. Belirli bir sıcaklığa ulaşıldığında, köpükleyici ajanlar gaz salınımı yaparak ergimiş camın

köpürmesine neden olmaktadır. Gaz salınımından dolayı, köpükleyici ajan tanelerinin bloke edildiği yerlerde gözenekler meydana gelmektedir. Ayrıca köpükleyici ajanların reaksiyon sıcaklıklarının camın yumuşama sıcaklığına yakın olması tavsiye edilmiştir [30].

Köpükleşme prosesi için maksimum sıcaklığın seçimi önemlidir. Cam viskozitesi ve köpük oluşum sıcaklığı birbiri ile bağlantılıdır. İdeal köpük oluşum sıcaklığı; viskozite tarafından kontrol edilen maksimum köpük kararlılığı ve gözeneklerin homojen, düzgün şekil ve büyüklüğü ile onları ayıran duvarların minimum kalınlığı tarafından karakterize edilen iç hücre yapısına göre seçilmelidir. Eğer, seçilen köpük oluşum sıcaklığı çok yüksek ise erime viskozitesi < 10^3 Pa.s' nin altında olacağı yapıyı kontrol etmek zorlaşmaktadır. Çünkü kabarcıklar kalıbın üst bölgesine doğru yönelmekte ve kabarcık dağılımı kararlı halden uzaklaşmaktadır. Bunun tersine, sıcaklık düşük olduğunda, cam viskozitesi çok yüksek ve gaz genleşmesi zor olduğu için hacim artışı düşük olmaktadır. Seçilen optimum sıcaklıkta hacim artışı kaçınılmazdır. Literatürde yapılan bir çalışmada; pelet olarak preslenmiş soda - kireç camı ve ağırlıkça % 8 SiC karışımının hava ortamında ısıtılması ve soğutulması sonunda hacim değişimi belirlenmiştir [31].

600 ºC' den 750 ºC' ye çıkış sinter rejiminde preslenmiş cam tozunda hafif bir çekme meydana gelmektedir. 750 - 800 ºC'den daha yüksek sıcaklıklarda köpük yapıcı ajan aktif hale gelmekte ve gaz oluşum reaksiyonuna bağlı olarak yaklaşık 700 ºC' de kuvvetli bir hacim artışı görülmektedir. Yüksek pişirim sıcaklıklarında porozite değerlerinde artış görülürken, basınç dayanımlarında azalma meydana gelmektedir.

Sinterleme işlemi genellikle paslanmaz çelik kalıplarda gerçekleştirilir. İşlem genellikle 3 saat civarında sürmektedir. İşlem sırasında yaklaşık 400 ºC civarında karbonun bozuşması gerçekleşir. Yaklaşık 700 ºC civarlarına gelindiğinde ise cam tamamen sinterlenmiş olur. Daha sonra köpükleşme sıcaklığına kadar yavaşça soğutulur, son olarak cam tavlama işlemi sıcaklığı olan 600 ºC civarına soğutulur.

4.1.4.3.Reaksiyon İle Köpüklenme

Yumuşamış cam kimyasal reaksiyon ile taneler arasına atmosfer ve köpük yapıcı ilave edilerek köpüklenebilir. Saf karbon, silisyum karbür, şeker, nişasta ya da organik atıklar gibi karbon içeren köpük yapıcı olarak kullanılması ile yumuşama işlemi

esnasında karbondioksit açığa çıkmaktadır [32]. Kapalı gözenekler içinde bulunan köpük gazı genellikle karbondioksit (CO_2) ve karbonmonoksit (CO) karışımıdır. Başlıca cam köpük üreticilerinden Pittsburg Corning, oksidasyon ile köpüklenme işlemini kullandığından, bu işlem önemli bir köpüklenme işlemi olarak kabul edilebilir [33].

SiC, cam köpükteki hücrelerin uniform, kontrollü ve belli boyutta hücreler elde edilmesine olanak sağlayan çok etkili bir köpük yapıcı olarak kabul edilmektedir [34]. Üretimdeki bloklar ve şekilli parçalarda olduğu gibi birçok çeşitte cam köpük için karbon tercih edilmesine rağmen, SiC ticari uygulamalar için en önemli köpük yapıcı olarak bilinmektedir. SiC' ün köpüklenme reaksiyonu karbona göre daha yüksek sıcaklıklarda (950 – 1150 ºC) gerçekleşmektedir. Ayrıca oluşan reaksiyon, karbonda oluşan reaksiyondan daha karmaşıktır. Bayer ve Koese tarafından SiC ve gaz arasında termodinamik olarak muhtemel reaksiyonlar Tablo 4.4' te gösterildiği gibi tespit edilmiştir [31].

Tablo 4.4: Çeşitli atmosferlerde SiC' in muhtemel reaksiyonları.

Reaksiyon	1000 ºK' de ΔH/kJ	1500 ºK' de ΔH/kJ
$SiC + ½ O_2 \rightarrow SiO + C$	-134,7	-179,08
$SiC + ½ O_2 \rightarrow CO + Si$	-157,3	-204,60
$SiC + O_2 \rightarrow SiO + CO$	-333,5	-412,3
$SiC + O_2 \rightarrow SiO_2 + C$	-656,1	-575,7
$SiC + O_2 \rightarrow CO_2 + Si$	-350,6	-357,3
$SiC + 2O_2 \rightarrow SiO_2 + CO_2$	-1048,1	-970,7
$SiC + 2CO \rightarrow SiO_2 + 3C$	-258,6	-91,2
$SiC + 3 H_2O \rightarrow SiO_2 + CO + 3H_2$	-279,9	-327,2
$SiC + 4 H_2O \rightarrow SiO_2 + CO_2 + 4H_2$	-281,6	-316,3

Silisyum karbür belli miktarda karbonlu ürünler oluşturur, bu ürünler köpük oluşumunu sağlar, kalan silisyum oksit ise cam ile birleşmektedir. Köpük yapıcı içerisinde silisyum oksit salınımı, camın kısmi kristalizasyonuna neden olabilir. Silisyum oksit yapıda kristobalit olarak görülebilir. Bu durum özellikle borosilikat camları için geçerlidir. Bu fazların polimorfik dönüşümü, cam köpüğün soğuması sırasında mikro çatlaklara ve mekanik olarak zayıf ürünler elde edilmesine neden olabilir. Cam tozuna bazen ağırlıkça % 10' dan fazla kaolen ilave edilmesi kristobalit oluşumunu azaltmaktadır. Kaolen, alümina (Al_2O_3) miktarını arttırdığı ve Al_2O_3 ise devitrifikasyonu azaltıcı bir malzeme olduğundan kristobalit oluşumu azaltılabilmektedir [24].

4.1.4.4.Sinterleme Süresi

Isıl işlem süresi ile cam köpüğün yoğunluğu arasında belirgin bir bağlantı bulunmaktadır. Gaz çıkışı süresince, yoğunluk sürekli olarak mimimuma doğru azalmaktadır. Bu basamak tamamlandığında, gözeneklerin birleşmesine bağlı olarak köpük kademeli olarak çökmektedir. Hücre duvarlarındaki spesifik yüzey alanının azalmasına bağlı olarak sistemin yüzey enerjisi azalmaktadır. Bu proses yoğunlukta yeni bir artışa sebep olmaktadır. Bu nedenle, ısıtma hızı süresinin iyi hesaplanması önem taşımaktadır.

4.1.4.5.Soğutma Hızı

Köpük sıcaklığından, tavlama sıcaklığına biraz daha yakın bir sıcaklığa hızlı soğutma ile viskozitede artış sağlanabilmektedir. Soğutma hızı seçiminde residual stresin oluşmasını önlemek amacıyla çok düşük soğutma hızının seçilmesi gereklidir. Soğutma süresince, hücreler arası boşluklarda bulunan gaz basıncı, bazı küçülmelere ve katmanlar arasında gerilmelere sebep olmaktadır.

4.1.5. Tavlama

Köpükleşme işleminde sonra tavlama yapılması gereklidir. Çünkü tavlama esnasında, iç gerilmeler azaltılmakta ve kontrol edilmekte ve böylece daha kararlı yapıda bir cam köpük elde edilebilmektedir [35].

Tavlama hızı, camın kimyasal bileşimi (genleşme katsayısı) ve cam köpüğü yapısı (gözeneklerin sayısı, boyutu, hücre duvarı kalınlığı, köpük yapıcı ajan türü, cam köpüğün şekil ve boyutları) gibi birçok faktöre bağlıdır.

4.2. Cam Köpük Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Cam köpüğü malzemesinin düşük yoğunluğu en önemli karakteristik özellikleridir. Son dönemlerde üretilen cam köpüğünün yoğunluğu 100 kg/m^3 civarındadır. Cam köpüklerinin yoğunluklarının yanı sıra diğer önemli özellikleri; mukavemet, su emme ve termal iletkenliktir. Cam köpüğünün bu karakteristik

özellikleri gözenek boyut ve dağılımı, gözeneklerin yalıtılmış konumları, gözenekler arasındaki cam duvarların kalınlığı gibi camın yapısına ve belli oranda yoğunluğa bağlıdır. Yüksek porozite yani düşük yoğunluklu cam köpüğü üretilmesi durumunda mukavemet düşük olmaktadır.

Cam köpüğünün su emme özellikleri ile yoğunluğu arasında ilişki bulunmaktadır. Tuz ve karbonat içeriğine sahip köpükleyici ajanın nötrleşme çeşidi yani gaz emisyonları ile ısınmaya bağlı olarak gerçekleşen bozunma sonucunda camda açık gözenekler oluşturmaktadır ve bu durum % 50 - 70 civarında yüksek su emmeye neden olmaktadır. Maden kömürü, kok kömürü, duman (is), grafit, daha az sıklıkta silisyum karbür gibi karbon içeren redoks gaz-yapıcıların kullanılması ile kapalı gözenekler elde edilmektedir. Bu malzemelerin su emmeleri tuz ve karbonat içeriğine sahip köpük yapıcılar ile üretilen malzemelerden daha düşüktür ve % 10 - 15 civarındadır. Cam köpüğün yoğunluğu arttıkça düşük su emmenin gerçekleşmesi zordur, çünkü yüksek poroziteli gözenekleri birbirinden ayırmak kolay değildir.

Termal iletkenlik ise, kapalı gözeneklerin açık gözeneklerden daha fazla olması durumunda poroziteye bağlı olmaktadır. Bu nedenle, kapalı gözenekleri daha fazla olan cam köpükler ısı yalıtım malzemesi olarak adlandırılırlar. Kapalı gözeneğe sahip cam köpüklerin termal iletkenlikleri, içerdikleri katı ve gaz fazı oranına bağlıdır. Yani cam köpüğünün içerisindeki gözenek yüzdesi yüksek olduğu durumda gözeneklerde daha fazla gaz fazı bulunacağından ve gazların termal iletkenliği düşük olduğundan, cam köpüğün de termal iletkenliği düşüktür.

Isı yalıtımı yüksek olan cam köpüğü elde edilmesi için camın viskozitesi ile köpükleştirme sıcaklığı aralığında yüzey geriliminin düşük olması, kristalizasyona eğiliminin olmaması ve yüksek oksitlenme potansiyelinin olması gerekmektedir.

Ayrıca, kullanılacak olan camın iyi öğütülüş olması gerekmektedir. Mevcut halde cam köpük üretiminde kullanılan cam tozunun spesifik yüzey alanı en az 1500 m^2/kg'dır. Cam köpük üretiminde kullanılacak cam tozunun spesifik yüzey alanı 10.000 m^2/kg veya daha fazla olabilir.

Köpükleyici ajan miktarı da cam köpüğü üretimini etkileyen parametrelerden biridir. Köpükleyici ajanın az olması durumunda, camdan taneler ayrılmaya başlar ve mikroskobik boyutlar sayısız küçük kapalı gözenek oluşumuna neden olur [36].

4.3. Cam Köpük İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrit (Si_3N_4)' in oluşan cam köpüğün gözenek boyutu ve gözenek yapısının kontrolünün sağlanmasına konsantrasyonlar, karışımdaki diğer mineral bileşenleri ve köpükleşme sıcaklığının değişimi ile izin veren etkili köpük yapıcılardır. SiC ve Si_3N_4'ün etkili köpük yapıcılar oldukları termogravimetrik analizden görülmektedir. Termaogravimetrik analizler SiC ve Si_3N_4'ün oksidasyonun cam tozu ile karıştırıldıklarında fazlaca arttığını göstermiştir. Reaksiyon yaklaşık 800 ºC' de başlamakta ve eş zamanlı olarak karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO_2), azot (N_2), hidrojen (H_2) gibi gazların oluşumu gerçekleşmektedir [28]. Çalışmada; tane boyutu < 0,1 mm borosilikat cam tozuna, tane boyutu < 0,01 mm ve < 0,05 mm arasında olan SiC and Si_3N_4 tozunu ağırlıkça yaklaşık % 5 oranında köpükleştirici malzeme olarak ilave etmiştir. Karışım kuru olarak bilyalı değirmende öğütülmüştür. Paslanmaz çelik kalıplarda şekillendirilen tozlar, 950 – 1150 ºC arasında sinterlenmiştir. Soğutma hızı 0,5 – 2 ºC/dk' dır. Bu çalışma ile, SiC ve Si_3N_4'ün borosilikat camları ve diğer camlar için etkili köpük yapıcı malzemeler olduğunu göstermiştir. Bu durum; SiC ve Si_3N_4'ün cam ile kimyasal reaksiyonundan, atmosferden ve cam karışımındaki diğer bileşiklerden kaynaklanmaktadır. SiC ve Si_3N_4'ün köpükleştirici etkisi, az oranda mangandioksit (MnO_2), demir(III)oksit (Fe_2O_3), kobalt(III)oksit (Co_2O_3), nikel oksit (NiO) ve özellikle bakır(II)oksit (CuO) gibi geçiş metallerinin bulunduğu durumlarda artmaktadır. Sıcaklık yükselmesine bağlı olarak cam karışımında kristobalit oluşumunun ise ağırlıkça % 10 - 30 kaolen ilave edilmesi ile engellenebileceği gösterilmiştir [28].

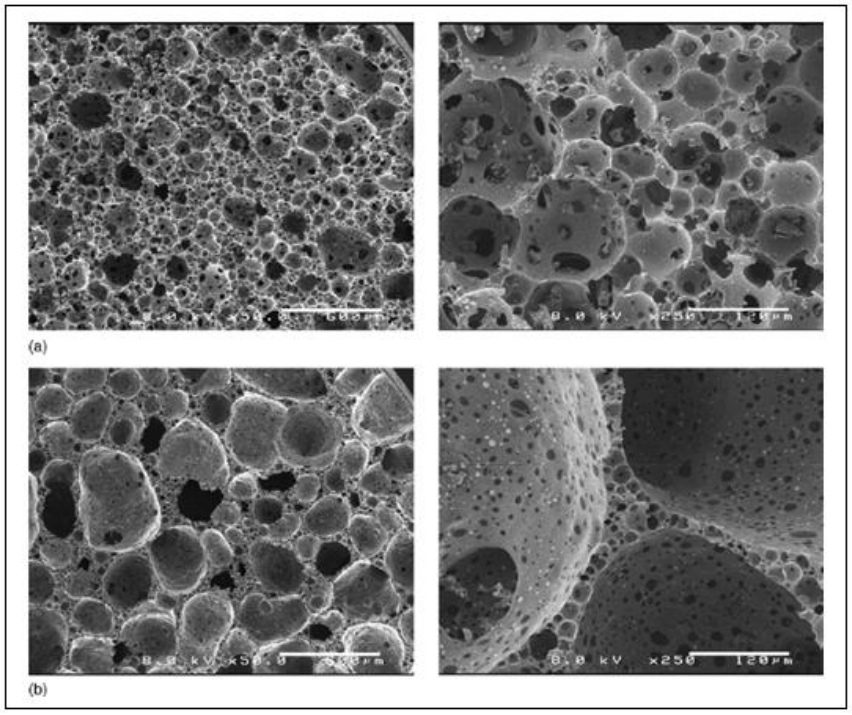
Huni ve panel şeklindeki atık katot ışını tüp camlarından, köpük yapıcı madde olarak, ağırlıkça % 4 oranında tane boyutu < 63µm SiC ile ağırlıkça % 5 oranında tane boyutu < 10 µm titanyum nitrür (TiN) ilave edilmiş ve ısıl işlem ile (750 – 850 ºC, 60 - 120 dk) cam köpük sentezlemişlerdir. Bağlayıcı olarak 2 ml ağırlıkça % 1 arap zamkı içeren sulu solüsyon kullanmışlardır. 40 mm çapta ve 6 mm kalınlıktaki numuneleri tek eksenli presleme ile elde etmişlerdir. Presleme basıncı 5 tondur. Cam köpükler 750 ºC'de 120 dk boyunca hava atmosferinde elektrik fırın kullanılarak yapılan ısıl işlem sonrası elde edilmiştir [37].

SiC katkılı numunenin mikroyapısında Şekil 4.4' te görüldüğü gibi çok küçük kapalı gözenekler olduğu görülmüştür [37]. Civalı porozimetre ile tek ve çok dar bir gözenek boyut dağılımına sahip olduğunu belirlenmiştir.

Tüm hücrelerin komşu hücreler ile tamamen bağlı, uniform bir yapıda olduğu gözlenmiştir.

SiC' ün indirgenmesinden sonra makro gözeneklerin tek bir dağılım gösterdiği görülürken, TiN' ün ise çift dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen cam köpüklerin eğme mukavemetlerinin, poroziteye bağlı olarak 4 ile 68 MPa arasında, basma mukavemetlerinin ise 4 ile 267 MPa arasında değiştiği görülmüştür.

Cam köpüklerin termal iletkenlikleri, lazer flaş deneyleri ile oda sıcaklığındaki termal yayınımlarından belirlenmiştir. Termal iletkenlik değerleri 0,08 – 0,43 W $m^{-1}.K^{-1}$. Dielektrik sabitleri empedans spektroskopi ile incelenmiş ve cam köpüklerin yalıtkan olduğu belirlenmiştir. Elektriksel geçirgenlik değerlerinin 2,6 – 3,1 Scm^{-1} aralığında bulunmuştur.



Şekil 4.4: Elde edilen cam köpükler a) SiC (750 ºC, 120 dk) ve b) TiN (750 ºC, 120 dk).

Bu değerler numune kalınlığına göre değişmekte ve poroziteye bağlı olarak belirlenen bir limit değere yöneldiği ya da numunenin gaz hacmi ve malzeme cinsi arasındaki ilişkiye göre değişmektedir.

Elde edilen sonuçlar, termal iletkenliğin poroziteden çok fazla etkilendiğini göstermiştir. Özellikle, iletkenliğin porozite ile lineer olarak azaldığı bulunmuştur. Bu sonuçlar elde edilen cam köpük malzemelerin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceklerini göstermiştir [37].

Bir diğer çalışmada, geri dönüştürülmüş soda-kireç camı ile artistik cam eşyaların parlatılması ile oluşan SiC atıkları kullanarak cam köpük yapılabilirliğini araştırmışlardır [38]. Cam bilyalı değirmende maksimum tane boyutu 37 μm olacak şekilde öğütülmüştür. Kurutulmuş SiC parlatma atığı, cam tozu içerisine ağırlıkça % 2,5 - 17,5 aralığında farklı oranlarda ilave edilmiştir. Parlatma atığı yaklaşık % 50 oranında SiC ve aşınmış cam; ayrıca da gözle görülebilir ağır metal oksitler içermektedir. SiC atığı-cam karışımları bilyalı değirmende 30 dk öğütülmüş ve karıştırılmıştır. Isıl işlem, 10 ºC/dk hızla 950 ºC'ye çıkılarak ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Köpükler 10 ºC/dk' dan hızlı olarak, hızlı bir şekilde köpükleşme sıcaklığından 600 ºC'ye soğutulmuştur. Bunun sebebi mikro yapısal gelişimi seçilen bekleme süresinde sabitlemektedir. Daha sonra kısa bir tavlama işlemi gerçekleştirmek için, yaklaşık 1 ºC/dk yavaşça 500 ºC'ye soğutulmuş ve son olarak da yaklaşık 5 ºC/dk ile hızlıca oda sıcaklığına soğutulmuştur [38].

Elde edilen cam köpüğün temel özellikleri aşağıdaki gibidir [38]:

- Soda-kireç camına SiC atığı ilavesi ile 950 ºC'de ısıl işlem sonrasında minimum rölatif yoğunluğu % 8 olan (% 92 porozite) cam köpük elde edilmiştir.
- Elde edilen cam köpüklerin porozite ve mukavemet değerleri ticari cam köpüklerinkine yakın bir değerdedir. Sınırlı SiC atığı ilavesi durumunda MnO_2 gibi bir oksitleyici ilavesi ile direnci yüksek ve homojen köpükler elde edilebilmiştir. Mekanik mukavemetin köpükleşmenin homojenliğinden dolayısı ile SiC ve oksitleyici ilavesinden fazlaca etkilendiği görülmüştür.
- Kurşun silikat camı ile TiN ya da SiC katkısı ile cam köpük yapmışlardır.
- Çalışmalar, katodik ışın tüp endüstrisi atıkları olan molce % 2 - 5 oranında kurşun(II)oksit (PbO) içeren camlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
- Karıştırma işlemi sonrasında tek eksenli pres ile 40 mm çapında pres numuneler basılmıştır. Elektrikli fırında 700 – 900 ºC derece aralığında ısıl işlem gerçekleştirilmiştir [39].

- Sonuçlarda; kurşun silikat camı içerisine TiN ya da SiC ilavesi ile cam içerisinde kurşunun kimyasında değişim olduğu görülmüştür. +2 değerlikli Pb(II)'nin kısmen Pb(0)'a indirgendiği tespit edilmiştir. Bu çalışma ile TiN ya da SiC gibi indirgeyici katkı ilavesi ile uygun sıcaklıkta sinterleme sonrasında silikat camlarındaki kurşun oksidin neredeyse tamamının indirgenebileceği gösterilmiştir [28].

Brusatin ve arkadaşları tarafından 2004 yılında gerçekleştirilen çalışmada kullanılan atık camların kimyasal kompozisyonu (ICP) Tablo 4.5' de verilmiştir [29]. Camlar bilyalı değirmenlerde öğütülmüş ve 300 - 212 (FG1), 212 - 150 (FG2), 150 - 106 (FG3), 106 - 75 (FG4), 75 - 73 (FG5), 3 - 38 (FG6) µm tane boyutlarında farklı fraksiyonlara ayrılmıştır. Köpük yapıcı madde olan SiC' ün ortalama tane boyu ise 40 µm' dir [29].

Soda kireç camı ve SiC tozları kuru olarak karıştırılmış ve alt kısmı kalıptan çıkarmayı kolaylaştırması için alümina tozu ile kaplanmış paslanmaz çelik kalıplara konmuştur. Soğuk presleme ile tozlar sıkıştırılmıştır. Sinterleme işlemi 900 ºC' ye 10 ºC/dk ısıtma hızı ile çıkılarak gerçekleştirilmiş ve bu sıcaklıkta 30 dk beklenmiştir. Sonrasında ise 950 ºC' ye çıkılmış ve bu sıcaklıkta da 30 dk beklenmiştir. 600 ºC' de yapılan tavlama işleminden sonra numuneler yavaşça oda sıcaklığına soğutulmuştur.

Cam tozundaki tane boyutu 300 - 212, 212 - 150, 150 - 106, 106 - 75, 75 - 53, 53 - 38 µm aralığında boyut çeşitliğine sahip ve ağırlıkça % 2 – 5 SiC miktarı farklılığının cam köpük üzerine etkisi incelenmiştir [29].

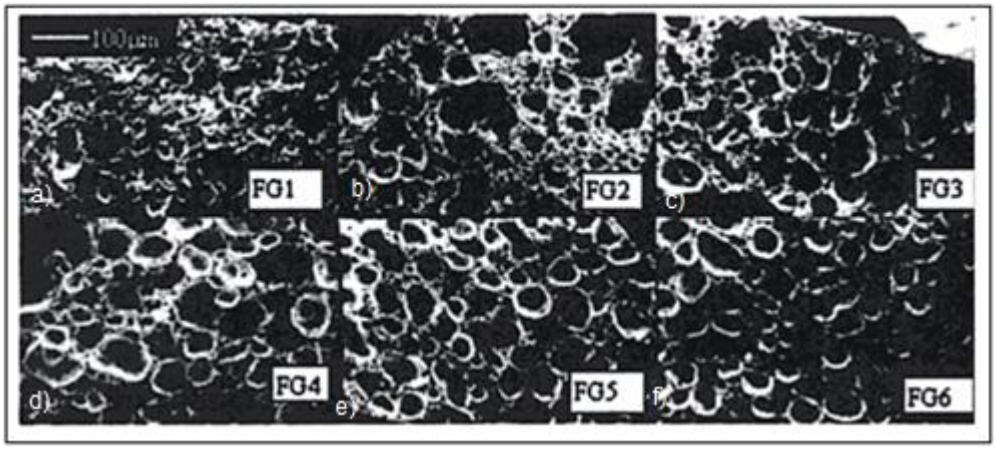
Tablo 4.5: Brusatin ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan camların kompozisyonu.

	Soda - kireç camı	Parlatma atığı	CRT camları	
			Panel	Boyun & Huni
	Oksit (% ağırlıkça, temel oksitler)			
SiO_2	71,60	65,50	60,70	53,91
Al_2O_3	0,97	12,56	1,70	1,79
Na_2O	13,50	1,65	7,50	6,15
K_2O	0,42	1,62	6,90	8,30
CaO	9,00	1,20	0,10	3,46
MgO	3,87	2,20		1,50
BaO	0,07		9,90	0,80
SrO			8,60	0,75
PbO	0,06		0,01	22,16

Tablo 4.5: Devam.

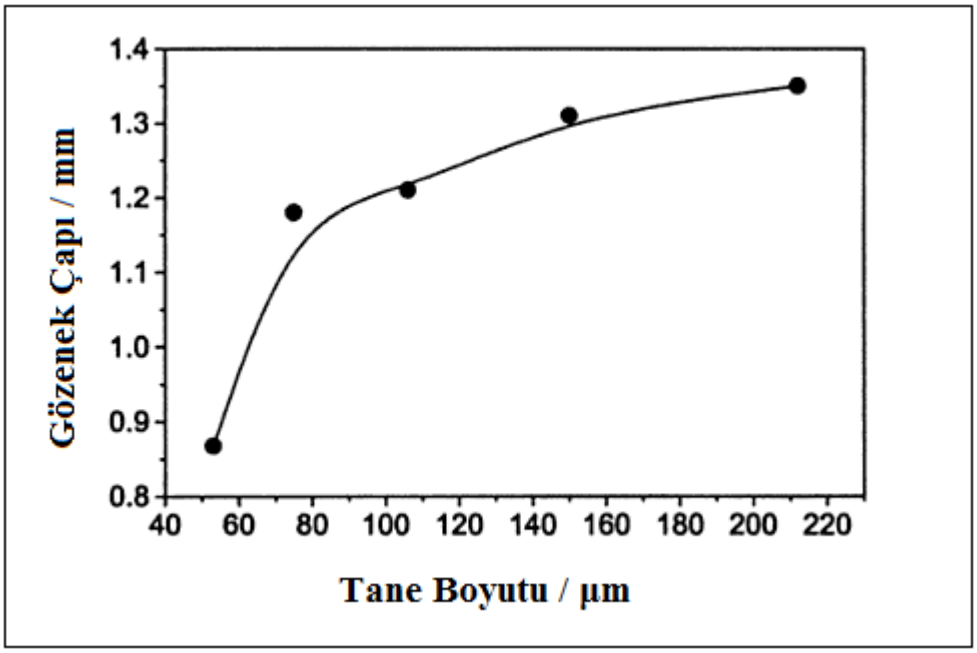
SO_3	0,19			
ZrO_2	0,01	5,10	2,50	
TiO_2	0,06	0,41	0,55	0,07
Fe_2O_3	0,13	0,75	0,05	0,02
Cr_2O_3	0,03			
As_2O_3	0,01			
Sb_2O_3			0,45	
NiO			0,01	

Şekil 4.5' te % 5 SiC ile farklı tane boyutlarında camlardan aynı ısıl işlem ile elde edilen cam köpüklerin mikro yapı görüntüleri bulunmaktadır. Sonuç olarak, cam ile köpükleyici ajanın tane boyutu birbirine ne kadar yakın ise gözenek boyut dağılımı o kadar homojen hale geldiği görülmüştür.



Şekil 4.5: % 5 SiC ve farklı boyuttaki camlar ile elde edilen cam köpüklerin SEM görüntüleri a) 300 - 212 µm (FG1), b) 212 – 150 µm (FG2), c) 150 – 106 µm (FG3), d) 106 – 75 µm (FG4), e) 75 – 53 µm (FG5) ve f) 53-38 µm (FG6)].

Ayrıca, Şekil 4.6' da verilen görüntü Image-Pro Plus, Media Cybernetics analiz yazılımı kullanılarak ölçülen ortalama hücre boyutunun, cam tane boyutu azaldıkça azaldığını göstermektedir. Üretilen cam köpüklerin morfolojisine bakıldığında, düzenli küresel hücrelerin farklı kalınlıklardaki duvarlarla ayrılmış olduğu ve farklı boyutlarda boşluklardan oluştuğu görülmektedir [29].



Şekil 4.6: Cam tane boyutunun bir fonksiyonu olarak FG2-6'nın gözenek çapı.

Görsel olarak inceleme yapıldığında, işlemde yüksek köpükleşme sıcaklıkları (950 ºC' de 30 dk bekleme, 1000 ºC' de 30 dk bekleme) kullanıldığında ve köpük yapıcı oranı ve cam tozu boyutu sabit tutulduğunda, elde edilen cam köpükteki hücre boyut dağılımının homojen olmadığı ve ayrıca birçok mukavemet düşürücü geniş boşluklar olduğu görülmüştür.

Cam köpüklerde normalde, basınç dayanımının rölatif yoğunluk azaldıkça azalması beklenmektedir. Bu çalışma ile elde edilen cam köpüklerde daha yüksek yoğunluk, daha büyük hücrelerin olması durumunda elde edilmiş ve hücre boyutundaki azalma ile mukavemette artış olduğu görülmüştür. Bunu sebebinin hücre boyutundaki çeşitliliğin değişen yoğunluktan kaynaklı olabileceği düşünülmüştür.

Son yıllarda, cam köpüğünün üretimi için herhangi bir termal işlemin yapılmadığı "soğuk" teknoloji uygulanmaktadır. Bu şekilde, tüm sentezler oda sıcaklığında gerçekleşmektedir. Bu metot, cam suyu ve ince alüminyum tozları arasındaki kimyasal reaksiyona dayanmaktadır. Bu reaksiyon sonucu ortaya çıkan hidrojen, cam suyunun içinde çok sayıda gözeneğin oluşmasına neden olmaktadır. Isıl işlemin olmaması, yapı malzemelerinin kurulacağı yerde cam köpüğü üretimini gerçekleştirme imkanı tanımaktadır. Ancak, bu metodun bazı olumsuz yanları da vardır. Birincisi, açığa çıkan hidrojenin yanıcı ve tehlikeli olması, ikincisi ise cam köpüğü yapısını homojen bir şekilde üretmenin zorluğudur.

Sonuç olarak, köpüklenme reaksiyonlarının geciktirilmesinin bu teknolojinin gelişiminde rol oynayacağı düşünülmektedir. Bu araştırmadaki cam köpüğü üretiminde, cam suyu ve alüminyum arasındaki reaksiyonu geciktirecek, homojen bir karışım oluşturulduktan sonra reaksiyonun devam etmesini sağlayacak katkı maddelerinin araştırılması tavsiye edilmiştir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Laboratuvar ölçekli cam köpük üretimi deneysel çalışmaları Gebze Teknik Üniversitesi'nin ve Tübitak MAM Malzeme Enstitüsü'nün laboratuvar imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda hammadde olarak atık cam, yeşil renkli düz cam, köpükleyici ajan olarak silisyum karbür (SiC), katkı minerali olarak alümina (Al_2O_3) ve bağlayıcı olarak selülozik kağıt tutkalı (CMC) kullanılmıştır.

Atık cam kullanımı ile atık ekonomik ve çevre açısından yarar sağlayacağı düşünülmüştür. Ancak, atık camın kompozisyonunun kararlı olmamasına karşın alternatif olarak Şişecam tarafından sürekli aynı kompozisyonda üretilebilen yeşil renkli düz camın da cam köpük üretiminde kullanılması uygun görülmüştür.

Nano boyutlu SiC kullanımı ile cam-SiC arasındaki köpüklenme derecesinin fazla olacağı varsayılmıştır.

Ayrıca çalışmalarda camın viskozitesinin artırılarak köpüklenme reaksiyonunu hızlandırmak ve camın ergimesi sırasında taneler arasında aglomerasyonu engellemek amacıyla karışıma Al_2O_3 ilave edilmiştir. Bu şekilde üretilen cam köpük malzemesinde Al_2O_3'ün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır.

5.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddelerin listesi Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddeler.

Hammadde Adı	Temin Edilen Firma
Atık Cam (0 kodlu)	Cam Kırığı San. Ve. Tic. Ltd. Şti
Yeşil Renkli Düz Cam	Şişecam Ar-Ge Merkezi
SiC Tozu (nano)	.Ukrayna
Al_2O_3 (Alümina Tozu) A16 SG	ALMATIS

5.2. Hammadde Karakterizasyon Testleri

Hammaddeler için tane boyut, nem, yarı-kantitatif elementel analiz (XRF), mineralojik analiz (XRD), yaş kimyasal analiz, diferansiyel termal analiz /termal gravimetri (DTA/TG) analizi, taramalı elektron mikroskop (SEM) analizleri yapılmıştır.

5.2.1. Tane Boyut Dağılımı ve Sonuçları

Atık cam, yeşil renkli düz cam ve SiC hammaddeleri tane boyut analizi öncesi öğütme bilyalı değirmende öğütülmüştür. Bu nedenle kırık olarak elde edilen atık cam ve yeşil renkli düz cam hammaddeleri iç çapı 200 mm ve yüksekliği 170 mm olan değirmenler kullanılarak 72 devir/dk hızla öğütülerek deneysel çalışmalarda kullanılacak boyutlara getirilmişlerdir. Bir değirmende yaklaşık 2,200 gr cam hammaddesi öğütülmüş olup, her bir öğütme işlemi 16 mm, 18 mm, 21 mm, 22 mm, 28 mm ve 32 mm çaplarında toplam ağırlığı 3,200 gr olan alümina bilyalar ve 2,500 gr su yardımıyla öğütülmüştür. Yaş öğütme işleminin tamamlanmasının ardından değirmenler küvetlere boşaltılarak, hammaddelerin 110 °C sıcaklıkta kuruması sağlandıktan sonra oluşmuş olan topaklanmaların dağıtılması için 3 saat boyunca kuru öğütmeye tabi tutulmuştur.

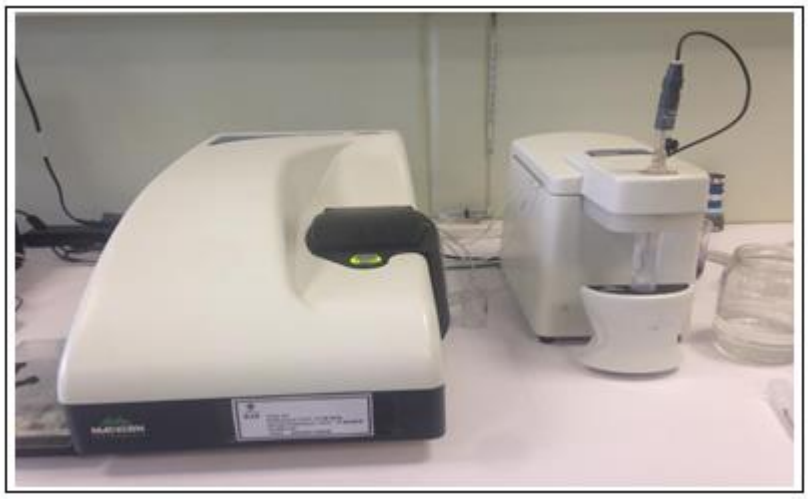
Cam hammaddelerini istenilen tane boyutuna getirmek için bilyalı değirmende Tablo 5.2' de belirtilen sürelerde öğütme işlemi uygulanmıştır.

Tablo 5.2: Hammaddelerin boyut dağılımı.

	Atık Cam (0)	Yeşil Renkli Düz Cam	SiC (nm)	Al_2O_3
Yaş öğütme	22 saat	18 saat	-	-
Kuru öğütme	6 saat	3 saat		
d_{10}	2,71 µm	2,57 µm	-	0,47 µm
d_{50}	14,98 µm	14,08 µm	202,1 nm	1,44 µm
d_{90}	36,88 µm	38,10 µm	-	44,86 µm

Deneylerde kullanılan SiC, cam ve Al_2O_3 numunelerinin tane boyut dağılımları ölçülmüştür. Mikron boyutundaki hammaddelerin tane dağılımları için Mastersizer-2000, 5 µm' nin altındaki tane boyuta sahip numunelerin ölçümleri için ise Zetasizer Nano ZS cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.1' de Mastersizer 2000 ve Şekil 5.2' de Zetasizer Nano ZS cihazı gösterilmiştir.

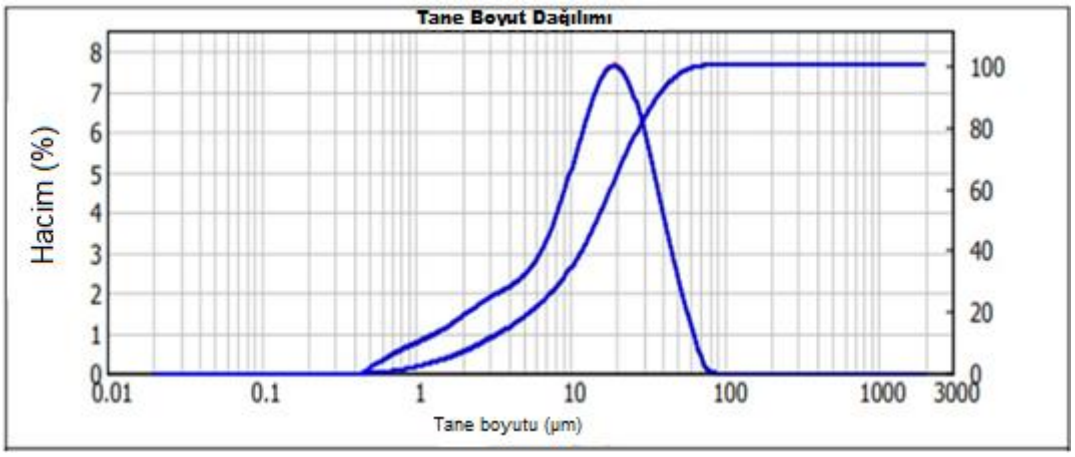
Şekil 5.1: Mastersizer 2000.



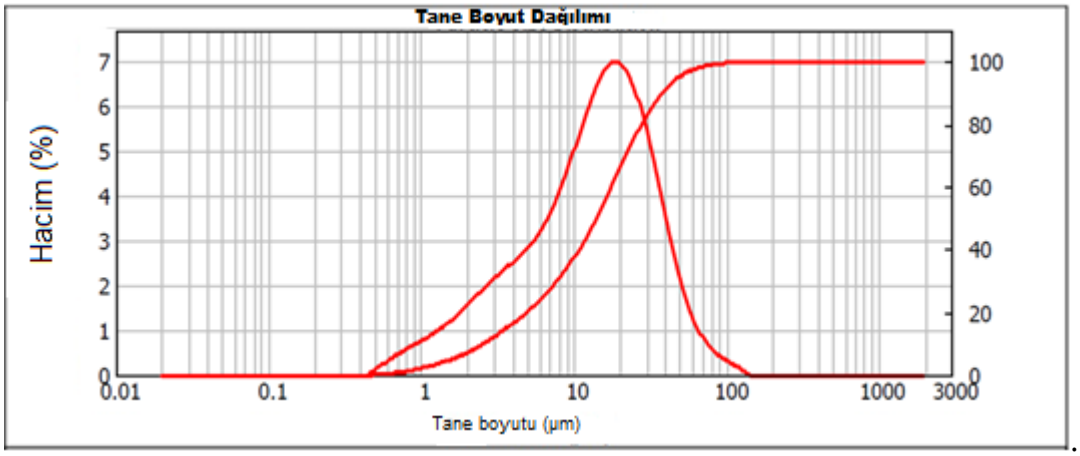
Şekil 5.2: Zetasizer Nano ZS.

Deneysel çalışmalarda 202 nm nano boyutunda SiC köpükleyici ajan kullanılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde hammaddeler % 90 tane boyut sonuçlarına göre ifade edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan öğütülmüş atık camın tane boyut dağılım grafiği Şekil 5.3' te, yeşil renkli düz camın tane boyut

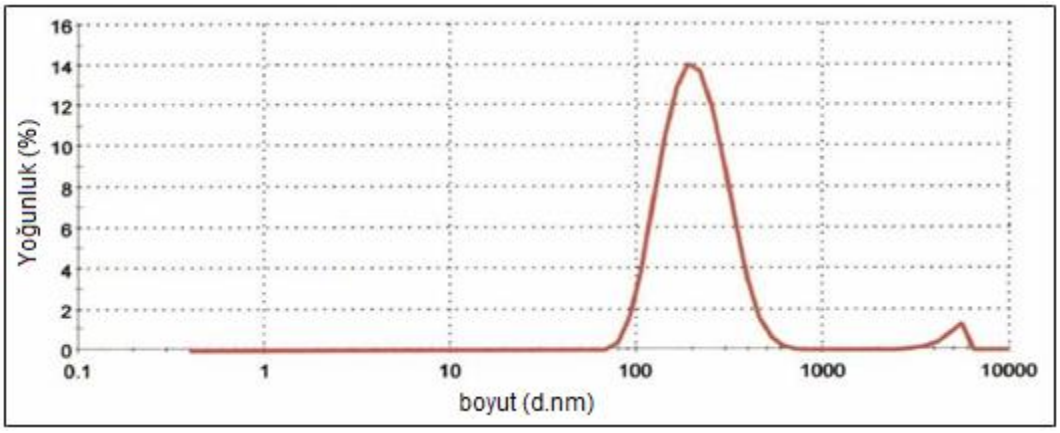
dağılım grafiği Şekil 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.5'te SiC' ün tane boyutu, Şekil 5.6' da ise Alüminanın tane boyutu gösterilmiştir.



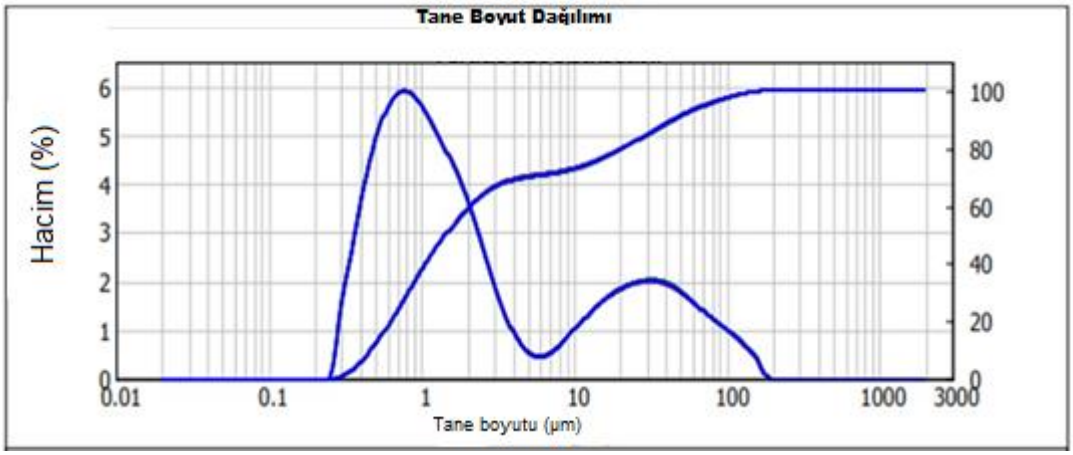
Şekil 5.3: Atık cam (0) tane boyut dağılım grafiği.



Şekil 5.4: Yeşil renkli düz cam tane boyut dağılım grafiği.



Şekil 5.5: SiC tozunun tane boyut dağılım grafiği.



Şekil 5.6: Al_2O_3 tozunun tane boyut dağılım grafiği.

5.2.2. Nem Tayini ve Sonuçları

SiC hammaddesinin nem içeriği Şekil 5.7' de gösterilen Precisa marka HA60 model nem ölçme cihazında 105 ºC sıcaklıkta belirlenmiştir.

Şekil 5.7: Precisa HA60 nem ölçme cihazı.

Cihazın çalışma prensibi, numunenin infrared-radyasyonla kurutulması sonucunda numunede meydana gelen ağırlık kaybını esas alınarak nem içeriğinin belirlenmesine dayanmaktadır. Cihaz otomatik olarak nemi tayin eder ve dijital ekranda 100 üzerinden sonuç verir.

Deneylerde kullanılan SiC (202 nm), hammaddesinin nem içeriği % 0,32 olarak belirlenmiştir.

5.2.3. Yarı Kantitatif Elementel Analiz (XRF) ve Sonuçları

X ışınları floresans (XRF) spektroskopisi, maddelerin element bileşimini belirlemede kullanılan önemli yöntemlerden biridir. XRF cihazının çalışma prensibi şu şekildedir:

Atom X-ışınları gibi yüksek enerjili bir radyasyonla uyarılırsa, bu yüksek enerji girişi yakın yörüngelerdeki elektronları daha yüksek enerji düzeyine çıkarır. Uyarılan elektronlar ilk enerji düzeylerine döndüklerinde kazanmış oldukları fazla enerjiyi dalga boyu 0,1-50 Å olan X- ışınları şeklinde geri verirler. Bu ikincil X-ışınları yayımına flüoresans ışıma adı verilir.

Hammaddelerin XRF cihazı ile yapılmış olan yarı- kantitatif element analiz sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3: Hammaddelerin XRF analiz sonuçları.

Bileşik	Atık Cam (36 µm)	Yeşil Renkli Düz Cam (38 µm)	SiC (nm)	Al_2O_3
O	47.331	47,158	0,436	47,087
C	-	-	29,624	-
Na	6,505	6,553	<<	<<
Mg	3,604	3,754	<<	
Al	1,173	1,630	0,283	52,731
Si	33,836	33,143	69,270	0,151
P	<<	<<	<<	-
S	0,108	0,072	0,031	<<
Cl	0,032	0,024	-	-
K	0,158	0,045	<<	-
Ca	7,095	6,688	0,038	<<
Ti	0,037	0,039	0,029	-
Cr	-	-	0,044	<<
Mn	-	<<	-	-
Fe	0,108	0,886	0,141	0,023
Ga	-	-	-	0,008
Co	-	-	<<	-
Cu	-	<<	-	-
Ni	-	-	0,015	-

Tablo 5.3: Devam.

Sr	0,005	<<	-	-
Zr	0,007	0,008	<<	-
Zn	-	-	-	-
Sn	<<	<<	-	-
Ba	<<	<<	<<	-
Mo	-	-	0,006	-
V	-	-	-	-
W	-	-	0,084	-

Cam hammaddelerin elementel analiz sonuçlarına göre; ana elementler oksijen (O), silisyum (Si), kalsiyum (Ca), sodyum (Na), magnezyum (Mg) ve alünimyum (Al) olup bunların yanı sıra az miktarlarda kükürt (S), potasyum (K), klor (Cl), titanyum (Ti), demir (Fe), zirkonyum (Zr) elementlerine de rastlanmıştır. SiC hammaddelerinin XRF analiz sonuçlarında ise beklenildiği gibi Si ve C'nin yanı sıra az miktarlarda Al, O, Ca, Fe, nikel (Ni) ve S' ye rastlanmıştır.

Değişik sektörlerde hammadde olarak kullanılacak olan atıklarının ağır metal içeriklerinin belirlenmesi önem teşkil etmektedir. Cam atıklarının üretim prosesinden veya kontaminasyondan kaynaklı olarak ağır metal açısından herhangi bir problem oluşturup oluşturmadığının belirlenmesi önemlidir.

Cam hammaddelerinin XRF analiz sonuçlarına göre ağır metal içeriklerine bakıldığında tane boyutu 36 µm atık cam numunesinde sadece baryum (Ba) elementine rastlanmış olup tane boyutu 38 µm olan yeşil renkli düz camda ise Ba ve stronsiyum (Sr) tespit edilmemiştir.

5.2.4. Yaş Kimyasal Analiz ve Sonuçları

Hammaddelerin yaş kimyasal analizi ise yaş metot ile yapılmıştır. Silisyum dioksit (SiO_2), gravimetrik metotla belirlenmiş, diğer tüm oksit bileşikleri ise $Li_2B_4O_7$ ile eritiş yapılarak çözeltiye alınmış ve İndüktif Eşleşmiş Plazma (ICP) cihazında elementel olarak okunup hesap ile okside dönüştürülmüş olup sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir. Yaş kimyasal analiz sonuçlarının XRF analiz sonuçları ile paralel sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 5.4: Hammaddelerin yaş kimyasal analiz sonuçları.

Bileşik	Atık Cam (36 µm)	Yeşil Renkli Düz Cam (38 µm)	SiC (nm)	Al_2O_3
SiO_2	72,387	70,904	-	0,323
Al_2O_3	2,217	3,080	0,535	99,634
BaO	-	-	-	-
CaO	9,928	9,358	0,053	-
Cl	0,032	0,024	-	-
Cr_2O_3	-	-	0,064	-
Fe_2O_3	0,154	1,266	0,202	0,033
Ga_2O_3	-	-	-	0,011
K_2O	0,190	0,054	-	-
MgO	5,977	6,226	-	-
MoO_3	-	-	0,008	-
Na_2O	8,768	8,833	-	-
NiO	-	-	0,019	-
SO_3	0,270	0,179	0,079	-
SrO	0,006	-	-	-
TiO_2	0,061	0,066	0,049	-

5.2.5. Mineralojik Analiz (XRD) ve Sonuçları

Numunelerin mineralojik analizi X ışınları difraksiyonu (XRD) cihazında yapılmıştır. Teorik olarak kısa dalga boyuna sahip X ışınları test edilecek numunenin üzerine gönderilmektedir. Işın demetleri maddenin üç boyutlu kristal kafeslerinden kırınıma uğramaktadır. Her mineralin kristal yapısının farklı kırınımlar vermesi ile karşılaştırıldığında test edilen malzemenin hangi mineralojik yapıya sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

Cam, SiC ve Al_2O_3 numunelerine ait XRD analiz sonuçları Tablo 5.5' te verilmiştir. SiC hammaddesinde moissanite ve silisyum karbür fazlarının yanı sıra üretim prosesinden kaynaklanan serbest Si, C ve SiO_2 fazları da belirlenmiştir. Atık ve yeşil renkli düz camda beklendiği gibi amorf SiO_2 fazları gözlenmiştir.

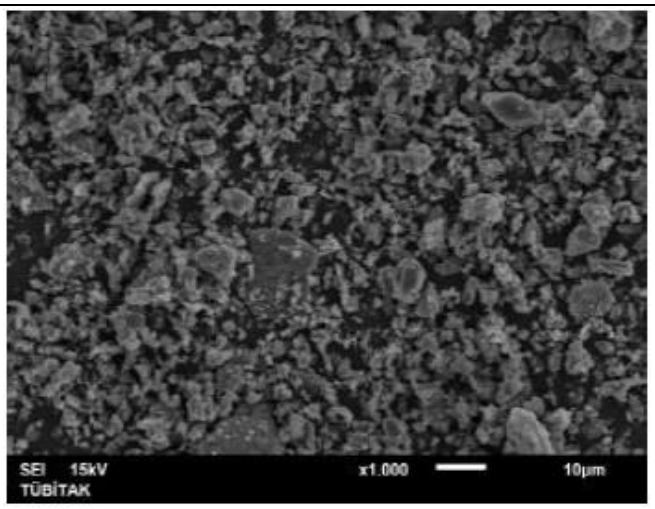
Tablo 5.5: Hammaddelerin XRD analiz sonuçları.

Atık Cam (36 µm)	Yeşil Renkli Düz Cam (38 µm)	SiC (nm)	Al_2O_3
Amorf yapı mevcuttur	Amorf yapı mevcuttur	Moissanite, SiC	Korundum Al_2O_3
		Silicon Carbon, SiC	
		Silicon, Si	
		Graphite, C	
		Ferrihydrite, FeO(OH)	
		Silicon Oxide, SiO_2	
		Aluminum Silicate, $Al_2Si_4O_{10}$	

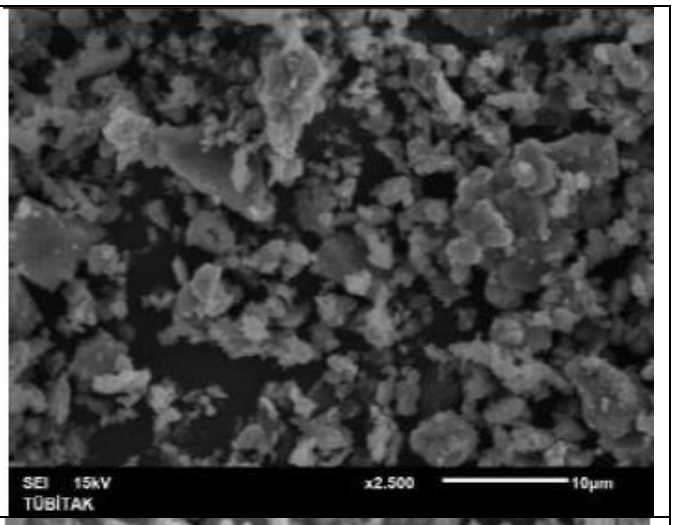
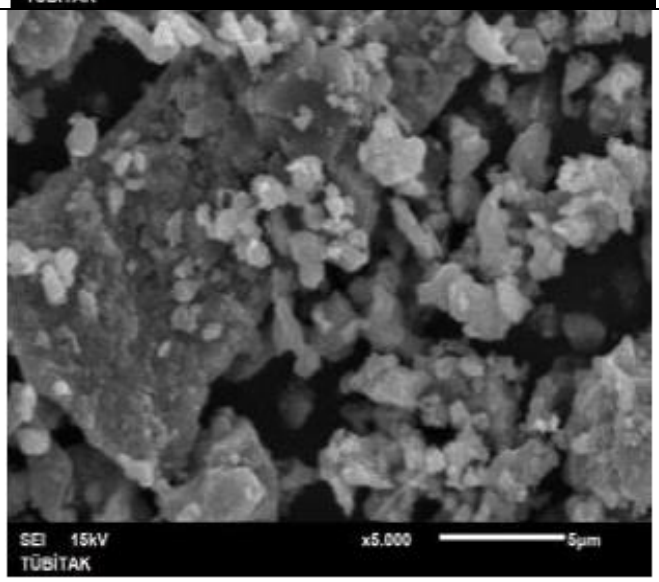
5.2.6. Mikroyapı Analizi (SEM) ve Sonuçları

SiC tozlarının farklı büyütme oranlarına ait mikroyapı incelemeleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6: SiC tozlarının mikroyapı görüntüleri.

Büyütme Oranları	SiC tozları
x 1000	

Tablo 5.6: Devam.

x 2500	
x 5000	

5.2.7. Diferansiyel Termal Analiz (DTA) – Termal Gravimetri (TG) Analizi ve Sonuçları

Diferansiyel Termal Analiz (DTA) termoanalitik bir yöntem olup, bir madde içinde bulunan termik değişimlerin tespiti esasına dayanır. DTA analizleri yardımıyla, minerallerdeki kristalografik dönüşümler, eritme, bileşimsel bozunma, su kaybı gibi özellikler belirlenir. DTA- TG (Termo Gravimetri) analizleri, minerallerin veya farklı türdeki kimyasal maddelerin ısı artışı karşısında göstermiş oldukları ağırlık ve enerji değişimlerini grafiksel olarak belirlemek için kullanılır.

DTA, incelenecek maddeyi sabit bir hızla ısıtırken meydana gelen ekzotermik ve endotermik reaksiyonların görüldüğü sıcaklıkları kaydetmekten ibarettir. DTA analizi, deney maddesi ile standart inert bir maddenin (Al_2O_3) ısıtılmaları sırasında

aralarındaki ısı farklarının oluşturduğu termo-elektrik akımın değerlendirilmesi sonucu T ve dT arasında çizilen grafiğe dayanır.

DTA yöntemi ile genelde katı ve sıvı bir numunenin ısıtılması veya soğutulması sırasında enerjideki değişmeyi içeren prosesler ile tüm reaksiyonlar incelenebilir. Çeşitli mineral ve kayaçlar hakkında DTA yöntemi kullanılarak ısıtma sürecinde endotermik reaksiyonların oluştuğu prosesler ve ısıtma sürecinde ekzotermik reaksiyonların meydana geldiği prosesler incelenebilir.

TG rutin olarak bütün fazların araştırmalarında, kalite kontrolünde ve üretim işlemlerinde kullanılan bir yöntemdir. Kısaca, termo-gravimetrik analiz (TGA), numunenin kütlesindeki değişmeyi sıcaklığın fonksiyonu olarak kaydeden bir tekniktir. Numunenin hangi sıcaklığa kadar kararlılığını koruyabildiği belirlenir. TG eğrisiyle hem ağırlık artışı, hem de ağırlık kayıpları incelenebilir.

TGA yönteminde, kontrollü bir oranda ısıtılan veya soğutulan numunenin sürekli olarak ağırlığında meydana gelen değişim miktarı ölçülür ve bir eğri halinde grafiği alınır. Elde edilen grafikle materyalin bileşimi ve termal duyarlılığının ölçümü mümkün olur. Bu yöntemle;

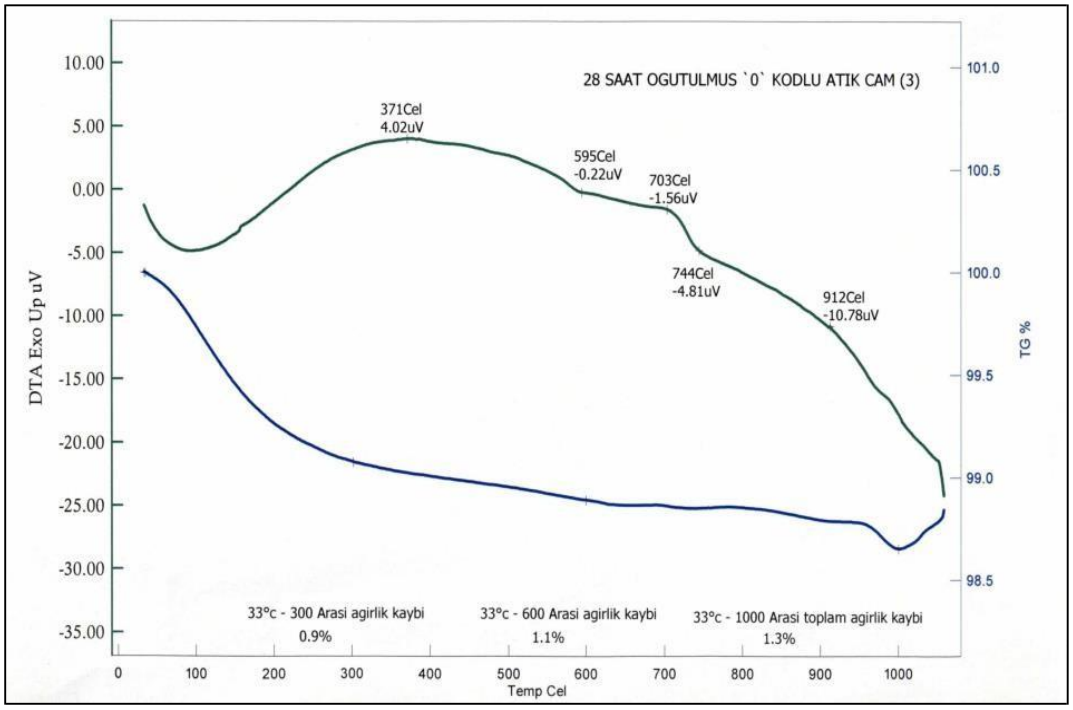
- Ağırlık kaybına sebep olan tepkime ısıları tanımlanır.
- Nem veya organik (polimer katkılar, dolgular) içeriği belirlenir.

TGA eğrilerinde adımları oluşturan kütle kaybına sebep olan birçok farklı neden olabilir.

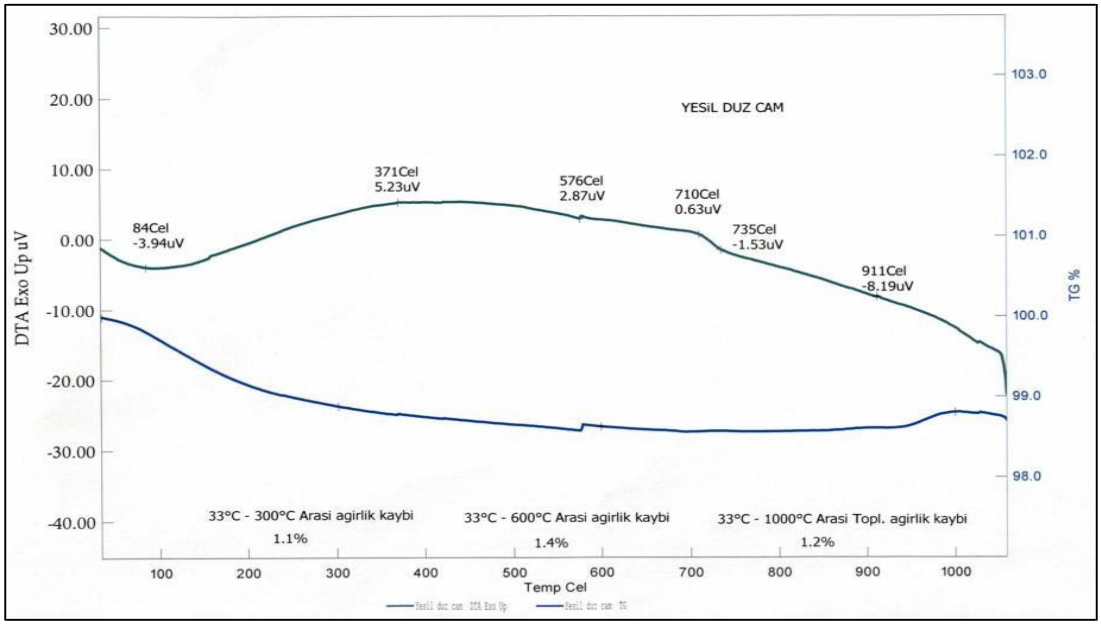
Hammaddelere ait DTA/TG analizi yapılmış ve sıcaklığa bağlı davranışları Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de verilmiştir. Atık cam ve yeşil renkli düz camın camsı geçiş sıcaklığı (Tg), kristalizasyon sıcaklığı (Tc) ve yumuşama sıcaklıkları (Ts) DTA eğrilerinden yararlanılarak belirlenmiş olup Tablo 5.7' de verilmiştir.

Tablo 5.7: Deneylerde kullanılan hammaddelerin DTA/TGA sonuçları.

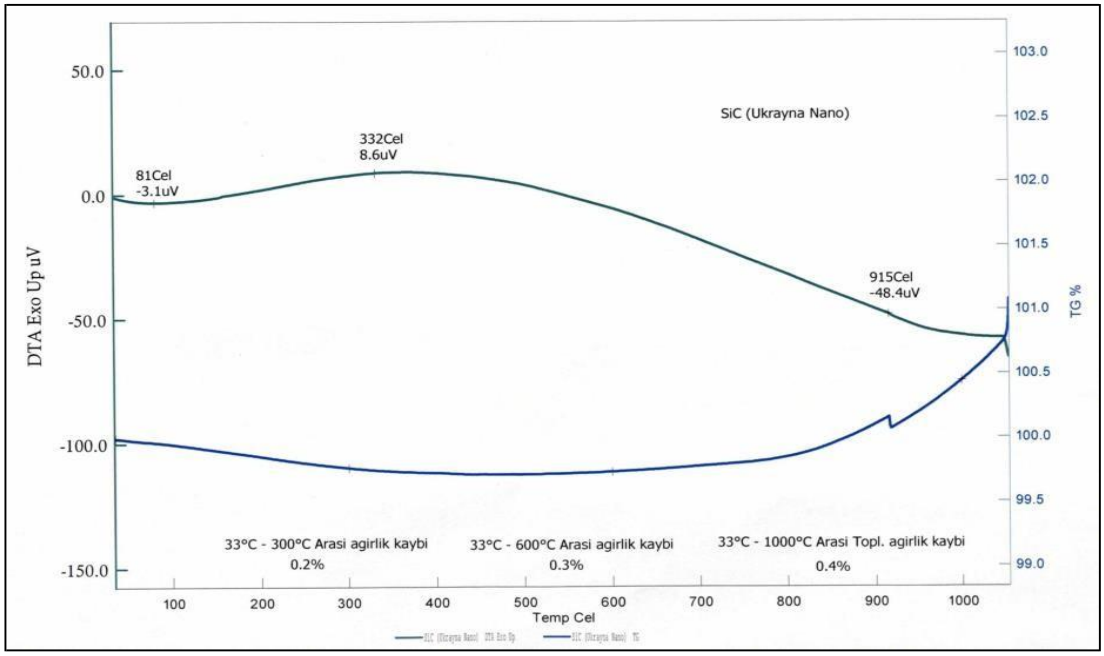
Numune Adı	30 – 1000 °C Arası Ağırlık Kaybı (%)	Tg (ºC)	Tc (ºC)	Ts (ºC)
Atık Cam (36 µm)	1,3	595	703	744
Yeşil Renkli Düz Cam (38 µm)	1,2	576	710	735
SiC (nm)	0,4	-	-	-
Al_2O_3	1,0	-	-	-



Şekil 5.8: Atık cam (36 µm) DTA/TG analizi sonucu.



Şekil 5.9: Yeşil renkli düz cam (38 µm) DTA/TG analizi sonucu.



Şekil 5.10: SiC (202 nm) DTA/TG analizi sonucu.

5.2.8. Yüzey Alanı Tayini (BET) ve Sonuçları

Deneylerde kullanılan hammaddelerinin BET yüzey alanı tayini Quantachrome Nova 4000E BET Yüzey Alanı Cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Yüzey alanı sonuçları Tablo 5.8' de verilmiştir.

Tablo 5.8: Deneylerde kullanılan hammaddelerinin yüzey alanı (BET) sonuçları.

Atık Cam (0 Kodlu)	Yeşil Renkli Düz Cam	SiC (nm)	Al_2O_3
1,286 m^2/gr	2,707 m^2/gr	2,676 m^2/gr	9,934 m^2/gr

6. KÖPÜK CAM ÜRETİM ÇALIŞMALARI VE NUMUNELERİN KARAKTERİZASYONU

Tane boyutu 36 µm olan atık cam ve tane boyutu 38 µm olan yeşil renkli düz cama tane boyutu 202 nm olan % 3 oranında SiC eklenerek 4 farklı reçete hazırlanmıştır. Hammaddeler dakikada 155 devirle çalışan Şekil 6.1' de gösterilen bilyalı değirmende 3 saat süresince homojen olarak karıştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda Tablo 6.1' de verilen optimum kompozisyonlar kullanılmıştır.

Şekil 6.1: Karıştırma işleminde kullanılan bilyalı değirmen.

Tablo 6.1: Köpük cam üretiminde kullanılan optimum kompozisyonlar.

Numune Kodu	Kompozisyon
A1	% 3 SiC (202 nm) + % 97 Atık Cam (36 µm)
A2	% 1 Al_2O_3 + % 3 SiC (202 nm) + % 96 Atık Cam (36 µm)
Y1	% 3 SiC (202 nm) + % 97 Yeşil Renkli Düz Cam (38 µm)
Y2	% 1 Al_2O_3 + % 3 SiC (202 nm) + % 96 Yeşil Renkli Düz Cam (38 µm)

Hazırlanmış olan karışımlara ağırlıkça % 7 oranında CMC bağlayıcı ilave edilerek granül yapılmış ve 800 µm' lik elekten geçirilmiştir. Yapılan karıştırma işlemi Şekil 6.2' de gösterilmiştir. Granül sonrası 23 mm çapında silindirik ve 74 mm x 74 mm boyutlarında kare kalıplar kullanılarak Tablo 6.2'de belirtilen pres koşullarında basılmış olup pres basıncının etkisi araştırılmıştır. Silindirik numuneler 500 kg/cm^2'lik

basınç uygulanarak preslenmiştir. Kare plakalara ise; 500 kg/cm^2, 250 kg/cm^2, 100 kg/ cm^2 ve 50 kg/ cm^2 basınç altında üretilmiştir. Pres çalışmalarında kullanılan hidrolik pres cihazı Şekil 6.3'de sunulmuştur.

Şekil 6.2: Granülleme çalışma görüntüsü.

Şekil 6.3: Deneysel çalışmalarda kullanılan hidrolik pres cihazı.

Tablo 6.2: Silindirik ve kare şekilli cam köpük numunelerin pres koşulları.

Numune Kodu	Silindirik Numune (Ø 23 mm)	Kare Plaka (74 mm x 74 mm)			
	Basınç (kg/cm^2)	Basınç (kg/cm^2)	Basınç (kg/cm^2)	Basınç (kg/cm^2)	Basınç (kg/cm^2)
A1	500	500	250	100	50
A2	500	500	250	100	50
Y1	500	500	250	100	50
Y2	500	500	250	100	50

Yapılan literatür araştıması neticesinde sinterleme rejimi belirlenmiş ve silindirik numunelerin sinterlenmesi için Şekil 6.4' te gösterilen PROTHERM marka PLF 120/45 model fırın, kare plakaların sinterlenmesi için Şekil 6.5' te gösterilen Nabertherm marka N500/85A model hava sirkulasyonlu fırın kullanılmıştır. PROTHERM marka fırında ısıtma elementleri fırının sağ ve sol kısımlarında bulunmakta olup hava sirkülasyonu bulunmamaktadır. Silindirik numuneler için PROTHERM marka fırının kullanımı ideal olmakla birlikte kare plakalarda yeterli ısı aktarımı sağlanamadığından, kare plakaların sinterlenmesinde NABERTHERM marka N500/85A model hava sirkulasyonlu fırın kullanımı tercih edilmiştir.

Şekil 6.4: PROTHERM marka PLF 120/45 model fırın.

Şekil 6.5: NABERTHERM marka N500/85A model hava sirkulasyonlu fırın.

Tablo 6.3: Belirlenen kompozisyonlara ait sinterleme rejimi.

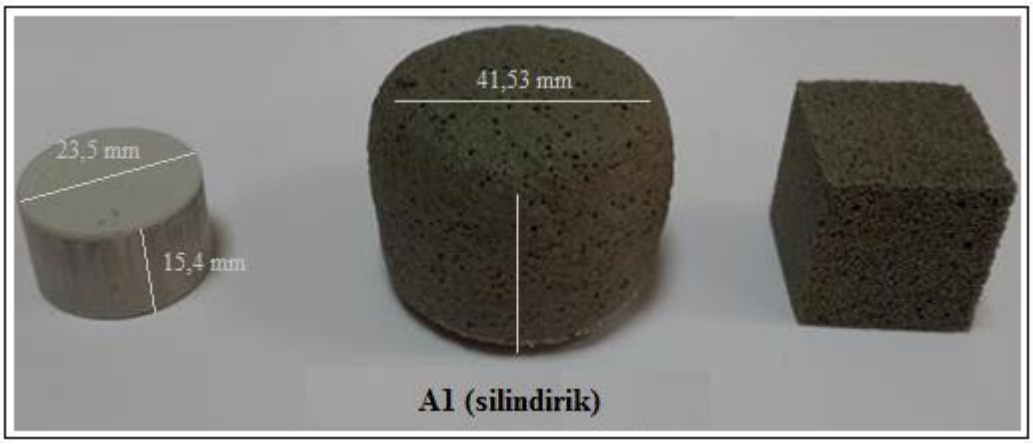
Numune Kodu	Kompozisyon	Sinter Rejimi
A1	% 3 SiC (202 nm) + % 97 Atık Cam (36 µm) + % 7 CMC	25 – 850 ºC, 2 saatte çıkış, 2 saat bekleme, 850 – 25 ºC kendiliğinden soğuma
A2	% 1 Al_2O_3 + % 3 SiC (202 nm) + % 96 Atık Cam (36 µm) + % 7 CMC	
Y1	% 3 SiC (202 nm) + % 97 Yeşil Renkli Düz Cam (38 µm) + % 7 CMC	
Y2	% 1 Al_2O_3 + % 3 SiC (202 nm) + % 96 Yeşil Renkli Düz Cam (38 µm) + % 7 CMC	

6.1. Cam Köpüğü Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sinterleme Sonrası Görüntüleri

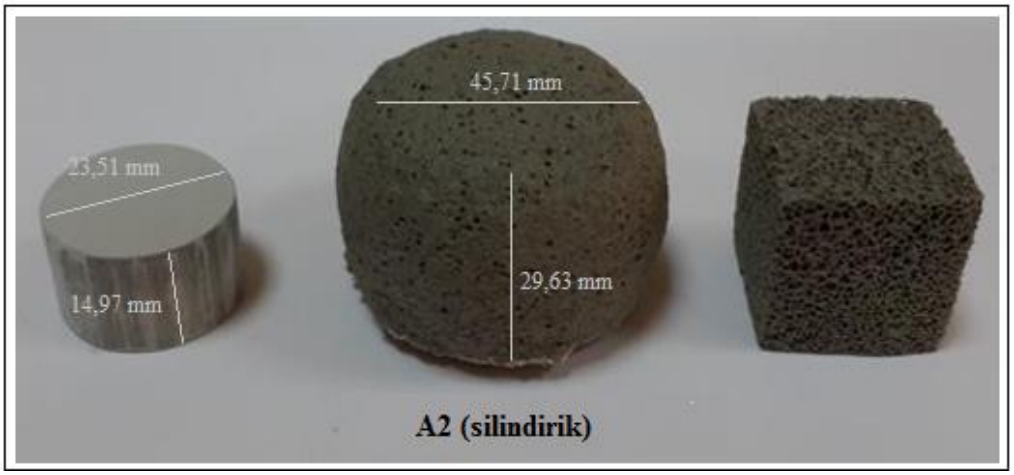
Silindirik ve kare numunelere ait sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası görüntüler gösterilmiştir.

6.1.1. Silindirik Numunelere Ait Görüntüler

Silindirik numunelere ait sinterleme öncesi, sinterleme sonrası görüntüler ve ara kesit görüntüleri Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9' da gösterilmiştir.

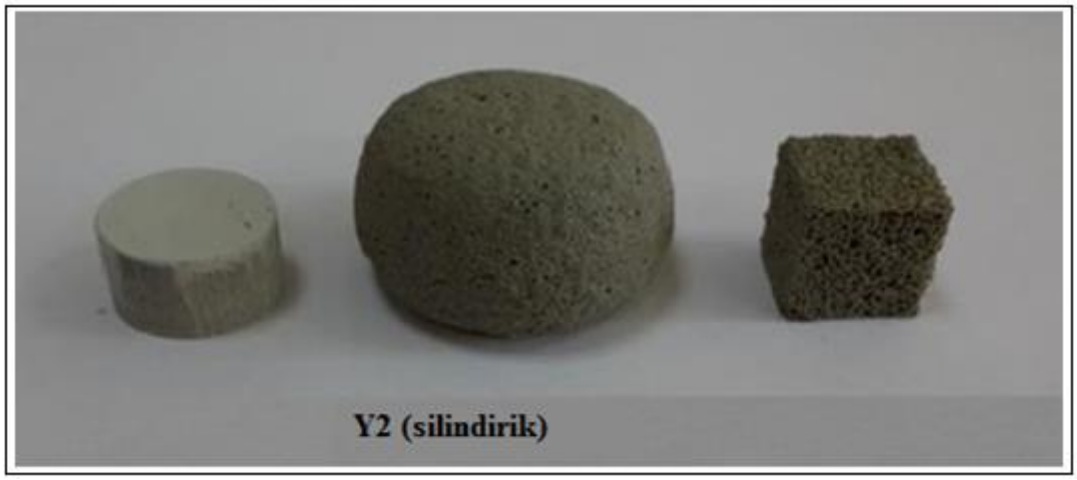


Şekil 6.6: A1 silindirik numunesinin sinter öncesi, sinter sonrası ve kenarları kesilerek elde edilmiş köşeli ürününün görüntüsü.



Şekil 6.7: A2 silindirik numunesinin sinter öncesi, sinter sonrası ve kenarları kesilerek elde edilmiş köşeli ürününün görüntüsü.

Şekil 6.8: Y1 silindirik numunesinin sinter öncesi, sinter sonrası ve kenarları kesilerek elde edilmiş köşeli ürününün görüntüsü.



Şekil 6.9: Y2 silindirik numunesinin sinter öncesi, sinter sonrası ve kenarları kesilerek elde edilmiş köşeli ürününün görüntüsü.

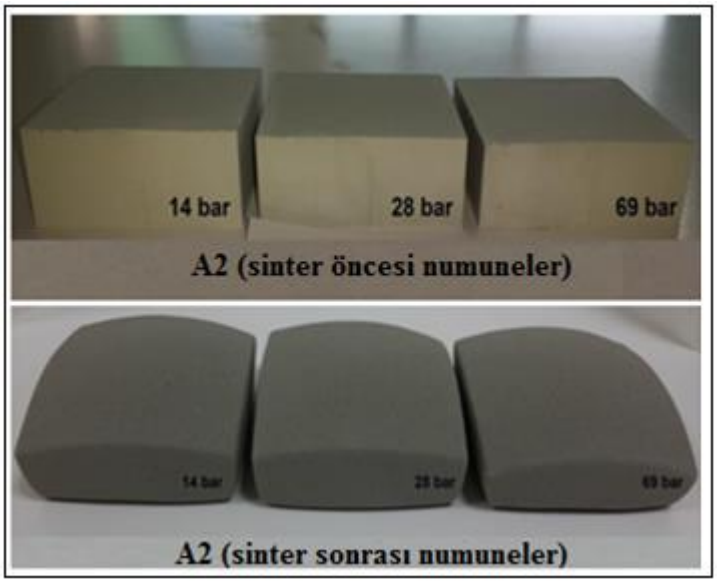
Tablo 6.4: Silindirik cam köpüğü numunelerinin sinterleme öncesi ve sonrası boyut ve ağırlıkları.

	Sinterleme Öncesi Boyut - Ağırlık				Sinterleme Sonrası Boyut - Ağırlık		
	Numune No	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (gr)	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (gr)
500 kg/m^2	A1	23,5	15,405	9,993	41,53	32,07	9,5252
	A2	23,51	14,97	18,94	45,71	29,63	9,35
	Y1	23,52	15,31	9,72	44,83	30,15	9,648
	Y2	23,49	15,13	9,78	44,905	28,605	9,447

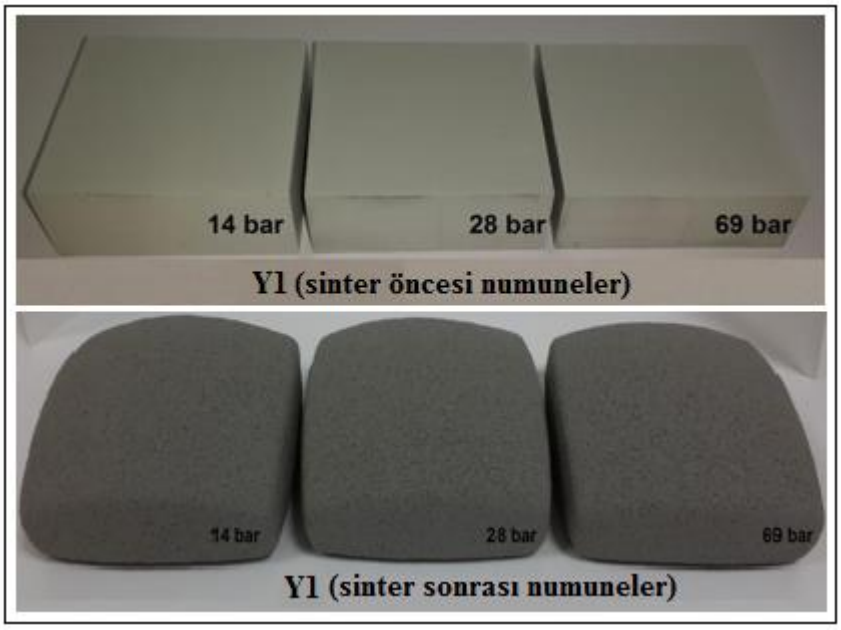
6.1.2. Kare Numunelere Ait Görüntüler

Kare numunelere ait sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası görüntüler Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Şekil 6.14' te 500 kg/cm^2 basınç ile preslenmiş numunelerin yan yana görüntüsü alınmıştır.

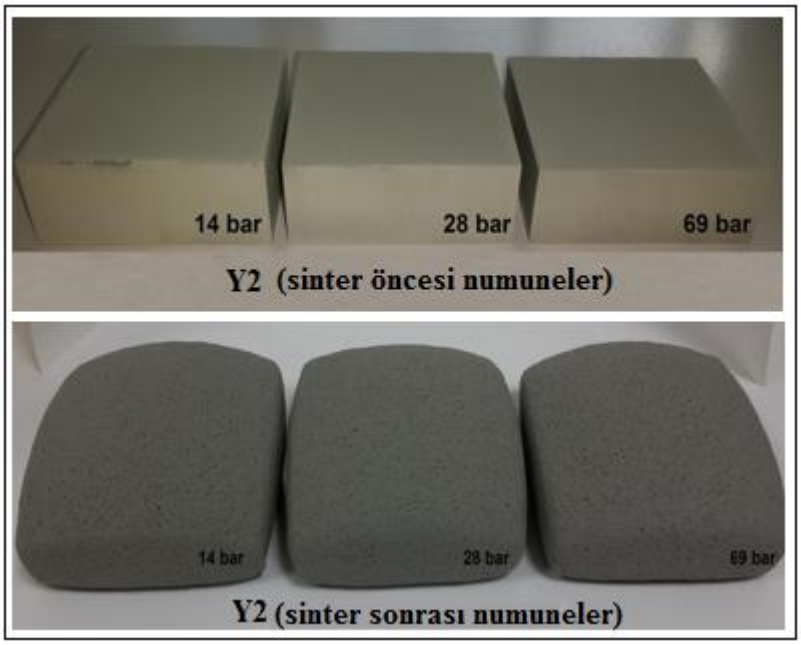
Şekil 6.10: A1 kare plakanın sinter öncesi ve sonrası görüntüsü.



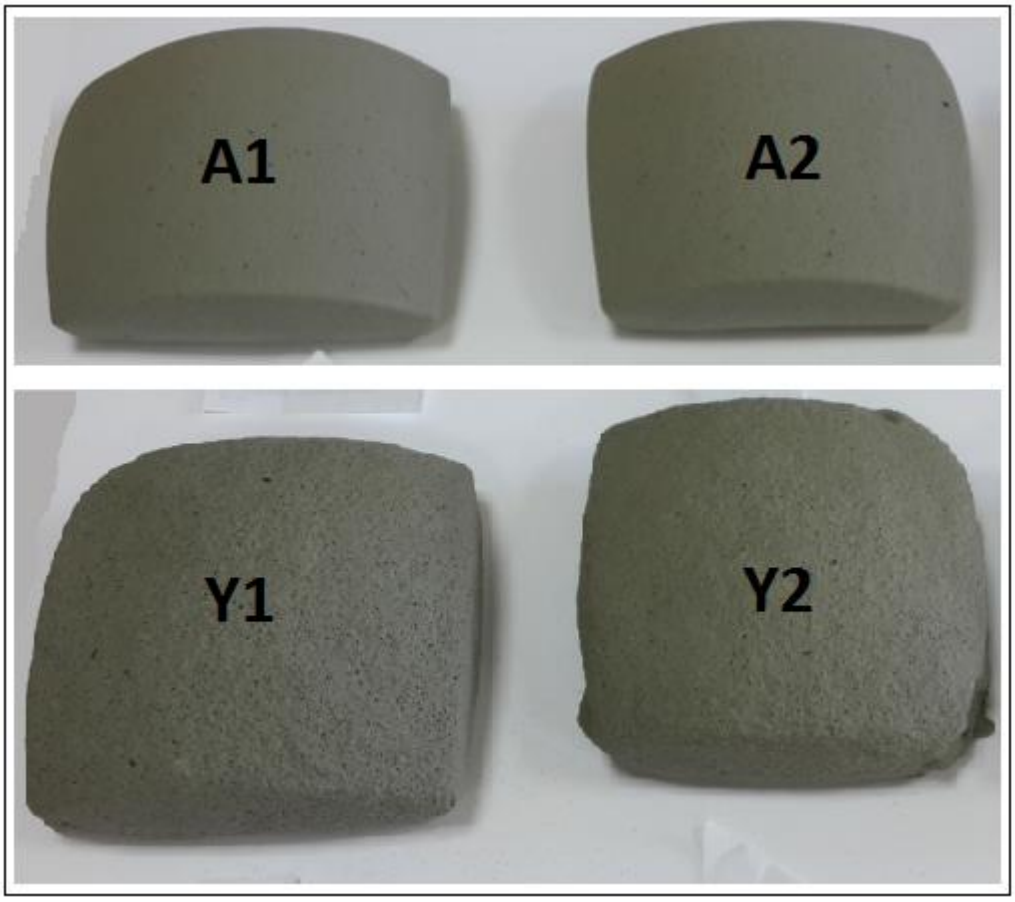
Şekil 6.11: A2 kare plakanın sinter öncesi ve sonrası görüntüsü.



Şekil 6.12: Y1 kare plakanın sinter öncesi ve sonrası görüntüsü.



Şekil 6.13: Y2 kare plakanın sinter öncesi ve sonrası görüntüsü.



Şekil 6.14: 500 kg/cm^2 basınç ile preslenmiş numunelerin yan yana görüntüsü.

Tablo 6.5: Kare cam köpüğü numunelerinin sinterleme öncesi ve sonrası boyut ve ağırlıkları.

Numune No:	Sinterleme Öncesi Boyut - Ağırlık				Sinterleme Sonrası Boyut - Ağırlık			
	En (mm)	Boy (mm)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (gr)	En (mm)	Boy (mm)	Yükseklik (mm)	Ağırlık (gr)
A1 (50 kg/cm^2)	74,19	74,21	29,32	199,769	119,01	119,83	50,65	193,008
A1 (100 kg/cm^2)	74,25	74,26	28,7	200,037	119,48	119,42	48,42	191,446
A1 (250 kg/cm^2)	74,34	74,34	26,47	199,436	121,59	121,48	46,28	189,224
A1 (500 kg/cm^2)	74,4	74,4	25,38	200,637	125,1	125,87	49,04	190,265
A2 (50 kg/cm^2)	74,16	74,17	29,64	198,396	120,12	120,36	48,51	189,335
A2 (100 kg/cm^2)	74,24	74,25	28,45	200,102	121,22	121,76	47,92	191,193
A2 (250 kg/cm^2)	74,34	74,35	26,51	200,421	124,78	125,23	48,22	191,843
A2 (500 kg/cm^2)	74,38	74,4	25,22	200,593	128,05	127,69	48,44	191,691

Tablo 6.5: Devam.

Y1 (50 kg/cm^2)	74,18	74,18	29,31	201,462	140,54	140,14	54,27	192,214
Y1 (100 kg/cm^2)	74,25	74,25	27,55	199,704	142,72	142,35	51,22	191,661
Y1 (250 kg/cm^2)	74,32	74,32	26,08	201,036	144,62	144,41	50,3	194,141
Y1 (500 kg/cm^2)	74,41	74,42	25,69	206,992	136,97	135,78	54,06	196,903
Y2 (50 kg/cm^2)	74,17	74,18	28,98	200,861	142,04	142,28	51,61	190,825
Y2 (100 kg/cm^2)	74,23	74,24	27,56	202,272	142,52	143,77	51,73	193,95
Y2 (250 kg/cm^2)	74,33	74,33	25,8	201,107	144,19	143,69	51,66	192,554
Y2 (500 kg/cm^2)	74,4	74,39	25,58	207,321	140,33	137,86	51,75	197,829

6.2. Cam Köpük Numunelerinin Karakterizasyonu

Laboratuvar ölçekli silindirik ve kare şekilli cam köpük malzemelerine hacim artışı, ağırlık kaybı, mineralojik analiz (XRD), mikroyapı incelemesi (SEM), basınç dayanımı, görünür yoğunluk tayini, porozite, termal iletkenlik tayini gibi testler yapılmıştır.

6.2.1. Hacim ve Ağırlık Değişimi Tayini

Silindirik ve kare plakaların sinter öncesi ve sonrası çap, kalınlık, ağırlık değerleri ölçülerek hacim artışı ve ağırlık kaybı değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar 6.6‘ da verilmiştir.

Tablo 6.6: Cam köpük numunelerin hacim artışı ve ağırlık kaybı değerleri.

Numune Kodu	Silindirik (Ø 23 mm)		Kare Plaka (74 mm x 74 mm)							
	Hacim Artışı (%)	Ağırlık Kaybı (%)	Hacim Artışı (%)				Ağırlık Kaybı (%)			
	500 kg/cm²	500 kg/cm²	50 kg/cm²	100 kg/cm²	250 kg/cm²	500 kg/cm²	50 kg/cm²	100 kg/cm²	250 kg/cm²	500 kg/cm²
A1	550,0	4,6	347,4	336,5	367,3	449,6	3,4	4,2	5,1	5,2
A2	649,0	1,2	330,0	351,0	414,0	467,6	4,6	4,5	4,3	4,4
Y1	615,0	0,8	562,7	585,1	629,2	606,7	4,5	4,0	3,4	4,8
Y2	590,7	5,1	554,1	597,4	650,9	607,2	4,9	4,1	4,2	4,5

Sonuçta; 500 kg/cm^2 basınçta preslenen silindirik numuneler içerisinde en fazla hacim artışı A2 ve Y1 kodlu numunelerde en az hacim artışı da A1 kodlu numunede elde edilmiştir. Atık cam kullanılan A reçetesine % 1 Al_2O_3 ilavesi ile hazırlanan kompozisyonda daha fazla hacim artışı görülmüştür. Al_2O_3 ilavesinin hacim artışı üzerinde olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan; A reçetesinde kullanılan atık cam yerine yeşil renkli düz cam kullanılan Y reçetesinde daha fazla hacim artışı meydana gelmiştir. Bu durumun; XRF analiz sonuçları incelendiğinde; yeşil renkli düz cam içeriğinde atık cama göre daha fazla Fe_2O_3 bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Fe_2O_3 silikat camlar için ana oksijen kaynağıdır. Fe_2O_3 cam köpük sinterleme prosesinde gaz çıkış hızını artırdığı için potansiyel oksitleyici ajan olarak kullanılabilmektedir.

Genel olarak; kare plakalarda pres basıncı artıkça hacim değerleri artmıştır. Kare plakalarda tüm pres basınçları için en fazla hacim artışı A1 ve A2 numunelerinde gözlemlenmiştir. Silindirik numunelerde olduğu gibi yeşil renkli düz camın kullanıldığı reçetelerde hacim artışı fazla olmuştur.

6.2.2. Mineralojik Analiz (XRD) ve Sonuçları

Cam köpük numunelerin mineralojik analiz sonuçları Tablo 6.7' de verilmiştir. Mineralojik analiz sonuçlarına göre; cam köpük numunelerinde cam yapısından kaynaklanan SiO_2 ile tepkimeye girmemiş SiC fazına rastlanmıştır. Ayrıca, camın yapısından kaynaklanan sodyum kalsiyum silikat, kristobalit ve kalsiyum magnezyum

silikat fazları da belirlenmiştir. Farklı cam kaynağı ve pres basıncına sahip numunelerin mineralojik fazları aynı görülmektedir.

Tablo 6.7: Cam köpük numunelerin XRD analiz sonuçları.

<table>
<tr><td rowspan="2">Numune Kodu</td><td>Silindirik Numune (Ø 23 mm)</td><td colspan="4">Kare plaka (74 mm x 74 mm)</td></tr>
<tr><td>500 kg/cm^2</td><td>50 kg/cm^2</td><td>100 kg/cm^2</td><td>250 kg/cm^2</td><td>500 kg/cm^2</td></tr>
<tr><td>A1</td><td colspan="5" rowspan="4">1. Kristobalit, SiO_2, PDF No: 4-8-7642
2. Moissanite, SiC, PDF No: 29-1129
3. Sodium Calcium Silicate, $Na_2Ca_3Si_6O_{16}$, PDF No: 23-671
4. Amorf bir yapı vardır.
5. Calcium Magnesium Silicate, $Ca_3Mg(SiO_4)_2$, PDF No: 4-11-6738</td></tr>
<tr><td>A2</td></tr>
<tr><td>Y1</td></tr>
<tr><td>Y2</td></tr>
</table>

6.2.3. Yoğunluk, Su Emme, Porozite Tayini ve Sonuçları

Cam köpük malzemelerin yoğunluk, su emme, porozite tayini Arşimet Prensibi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Arşimet prensibine göre bir kaba çözelti doldurularak numuneler çözeltiye daldırılır. Numuneler tabana değmemeli ve çözeltinin üzerine çıkmamalıdır. Literatür taraması sonucunda elde edilen bilgiye göre çözelti olarak destile su yerine % 10‘ luk Polietilen Glikol 2000 çözeltisi kullanılmıştır. Cam köpük malzemesinin yoğunluğunun sudan daha az olmasından dolayı PEG çözeltisi kullanılması tercih edilmiştir. Numuneler kaba yerleştirildikten sonra Şekil 6.15’ de gösterildiği gibi 4 saat süre ile kaynatılır. Bu süre sonunda numuneler aynı kabın içinde soğumaya bırakılır. Her bir numune kaynatma kabının içinden teker teker çıkarılarak asma tellerinden ayrılır ve destile su içinde gömülü olarak tartımı alınır (sudaki ağırlık). Islak bir bezle etrafındaki su damlacıkları alınır ve tartılır (yaş ağırlık). Daha sonra numuneler 110 ºC’ de 10 - 15 saat kadar kurumaya bırakılır.

Şekil 6.15: Yoğunluk tayini görüntüsü.

Kuruma işlemi sonunda etüv içinde oda sıcaklığına gelmesi beklenilir. Tekrar terazide tartılır (kuru ağırlık). Aşağıdaki (6.1), (6.2) ve (6.3) numaralı formüllere göre yoğunluk, su emme ve porozite değerleri hesaplanır.

- M_1 = D = Kuru ağırlık (gr)
- M_2 = S = Su içindeki ağırlık (gr)
- M_3 = M = Doymuş yaş ağırlık (gr)

% Porozite (görünür gözeneklilik):

$$P(a) = \frac{(M_3 - M_1)}{(M_3 - M_2)} x100 \quad (6.1)$$

% Su emme:

$$\% A = \frac{(M_3 - M_1)}{(M_1)} x100 \quad (6.2)$$

Yoğunluk:

$$B(D) = \frac{(M_1)}{(M_3 - M_2)} \tag{6.3}$$

Cam köpük numunelerinin yoğunluk, su emme ve porozite değerleri Tablo 6. 8'de verilmiştir. Kare plakalar için pres basıncının artmasıyla malzemelerin yoğunluklarının arttığı, su emme ve porozite değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Numunelerde kullanılan atık cam ve yeşil renkli düz cam hammaddelerinin hacimce genleşme ve buna bağlı olarak gözeneklilik üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Yeşil renkli düz camın kullanıldığı Y1 ve Y2 kodlu numunelerde köpüklenme reaksiyonları sonucunda genel olarak daha az sayıda ancak daha büyük gözenekler meydana gelmiştir. Atık camın kullanıldığı A1 ve A2 numunelerinde ise daha çok sayıda ve daha küçük gözenekler oluşmuştur. Gözenek boyutunun büyümesi doğal olarak numune yoğunluğunu düşürmüş, genel olarak en düşük yoğunluk değerleri yeşil renkli düz camın kullanıldığı numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 6.8: Cam köpük numunelere ait yoğunluk, porozite ve su emme değerleri.

	Numune Kodu	Pres Basıncı (kg/cm^2)	Yoğunluk (gr/cm^3)	Su Emme (%)	Porozite (%)
Silindirik Numuneler (Ø)	A1	500	0,38	192,64	74,01
	A2		0,37	183,82	67,51
	Y1		0,40	195,77	77,97
	Y2		0,36	207,01	75,33
Kare Plaka (74 mm x 74 mm)	A1	50	0,42	186,78	78,49
	A2		0,41	194,75	79,25
	Y1		0,33	242,39	81,07
	Y2		0,32	249,65	81,12
	A1	100	0,43	179,61	77,65
	A2		0,41	195,00	79,11
	Y1		0,34	236,73	80,66
	Y2		0,33	247,04	80,71

Tablo 6.8: Devam.

Kare Plaka (74 mm x 74 mm)	A1	250	0,43	180,42	77,71
	A2		0,40	197,24	79,26
	Y1		0,34	241,35	81,05
	Y2		0,33	247,58	80,91
	A1	500	0,48	156,35	75,07
	A2		0,46	163,33	75,42
	Y1		0,39	198,08	77,68
	Y2		0,39	183,69	72,20

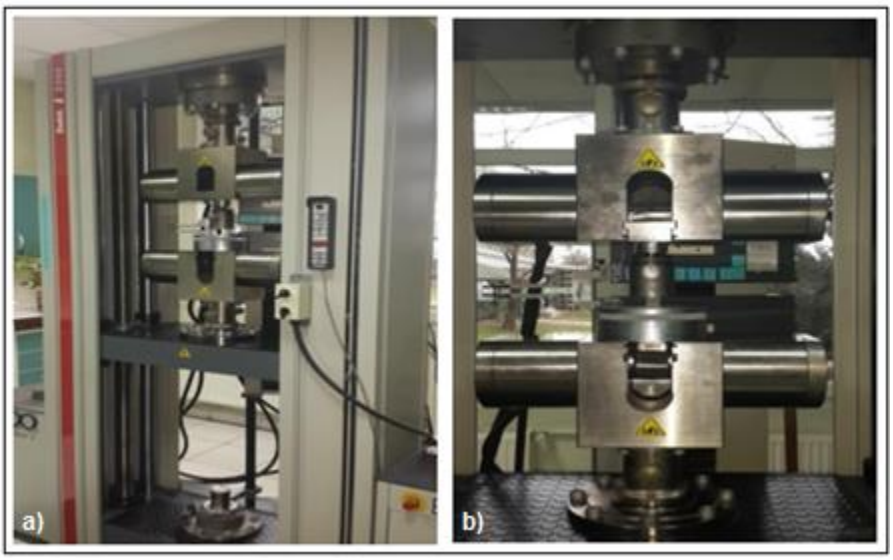
6.2.4. Basınç Dayanımı Tayini ve Sonuçları

Seramik malzemelerde gözenekli yapının varlığı, hem elastik özelliklerde hem de mukavemet değerlerinde olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. Bazı seramik malzemelerde E elastiklik modülünün büyüklüğü, gözenek hacim oranı P ile azalmaktadır. Bu değişim (6.4) numaralı denklemde gösterilmiştir, "E_0" gözeneksiz malzemenin elastiklik modülünü temsil etmektedir [40].

Elastiklik modülü bir malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür ve birim kesit alanına (1 mm^2) sahip bir malzemede birim boyu bir kat arttırmak için uygulanması gerekli kuvveti gösterir.

$$E = E_0(1 - 1{,}9P + 0{,}9\,P^2) \tag{6.4}$$

Numunelerin basma mukavemet deneyleri Şekil 6.16' da gösterilen Zwick Z250SN5A cihazında yapılmıştır.



Şekil 6.16: Basma cihazının a) yandan görünümü, b) önden görünümü.

Cam köpük numunelerinin basma mukavemeti ve elastiklik modülü sonuçları Tablo 6.9' da verilmiştir. Basma mukavemet değerleri incelendiğinde pres basıncı artışının numunelerin basma mukavemeti üzerinde önemli bir etki oluşturmadığı görülmektedir. Hacim artışının en az olduğu A1 kodlu numunede en yüksek basma mukavemeti, hacim artışının en fazla olduğu Y1 ve Y2 kodlu numunelerinin mukavemetleri daha düşük çıkmıştır.

Tablo 6.9: Silindirik ve kare cam köpük numunelerin basma mukavemeti ve elastiklik modülü sonuçları.

Numune Kodu	Silindirik (Ø 23 mm)		Kare Plaka (74 mm x 74 mm)							
	Basma Mukavemeti (MPa)	Elastik Modülü (MPa)	Basma Mukavemeti (MPa)				Elastik Modülü (MPa)			
	500 kg/cm²	500 kg/cm²	50 kg/cm²	100 kg/cm²	250 kg/cm²	500 kg/cm²	50 kg/cm²	100 kg/cm²	250 kg/cm²	500 kg/cm²
A1	3,64	384	7,19	6,99	7,75	7,84	266	198	421	239
A2	2,44	172	7,95	7,57	7,37	7,73	433	380	371	258
Y1	3,38	444	2,03	1,63	1,62	2,27	162	140	163	103
Y2	2,41	152	1,87	1,98	1,73	1,21	148	125	146	59

6.2.5. Isıl İletkenlik Analizi ve Sonuçları

Isı iletimi; bir katı malzeme veya durgun akışkan içerisindeki sıcak bir bölgeden daha soğuk bir bölgeye doğru ısının geçmesidir. Bir katı cisim içinde sıcaklık farkları

varsa yüksek sıcaklık bölgesinden düşük sıcaklık bölgesine ısı, iletim yolu ile geçer. Cam köpük numuneleri ısıl iletkenlik katsayıları (λ) C Therm Technologies marka TH89-05- 00400 model ısı iletkenlik cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Test edilen numuneler Şekil 6.17' te ısıl iletkenlik sonuçları ise Tablo 6.10' te verilmiştir.

Şekil 6.17: Isıl iletkenlik analizi için 500 kg/cm^2 basınçta preslenmiş numunelerin görüntüsü.

Tablo 6.10: Cam köpük numunelerin ısıl iletkenlik analiz sonuçları.

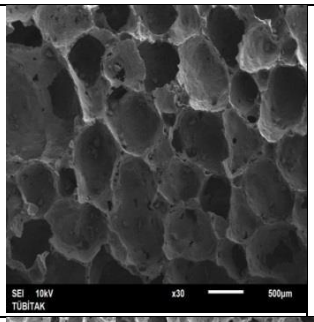
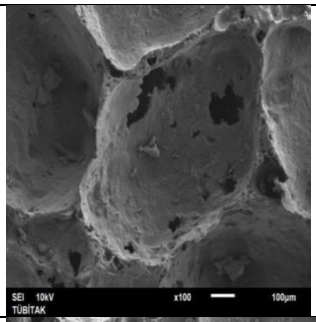
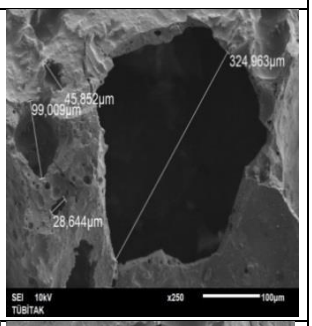
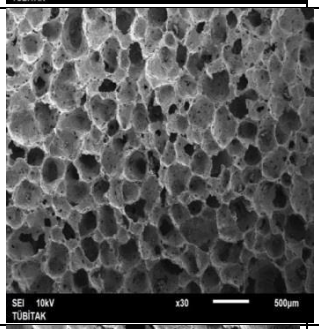
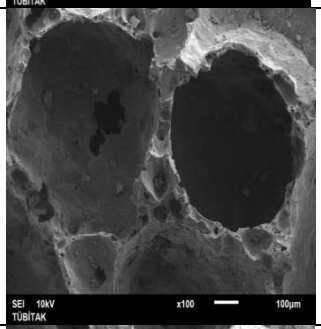
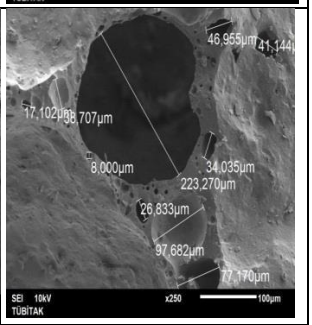
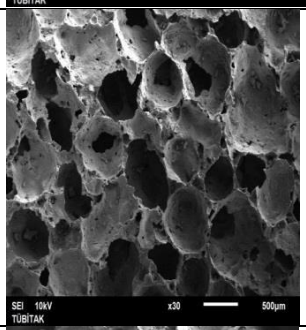
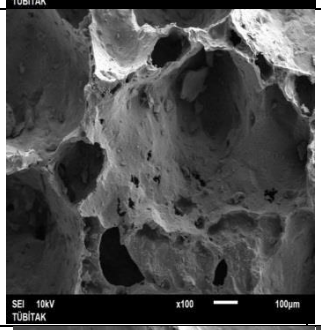
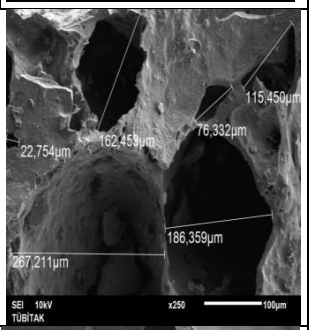
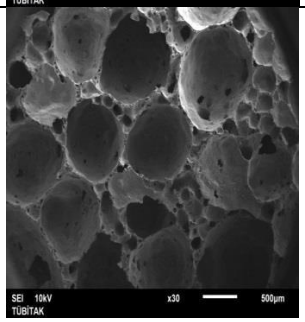
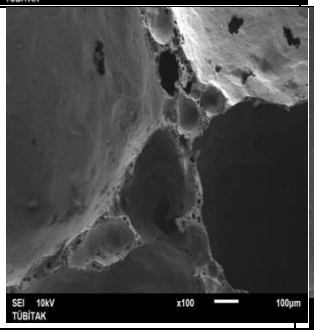
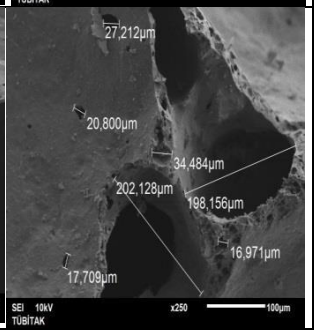
Numune Kodu	Silindirik Numune (Ø 23 mm)	Kare Plaka (74 mm x 74 mm)			
	λ (W/mK)	λ (W/mK)			
	500 kg/cm^2	50 kg/cm^2	100 kg/cm^2	250 kg/cm^2	500 kg/cm^2
A1	0,064	0,062	0,063	0,065	0,061
A2	0,053	0,061	0,064	0,061	0,061
Y1	0,057	0,048	0,046	0,046	0,043
Y2	0,049	0,045	0,047	0,048	0,043

6.2.6. Mikroyapı (SEM) Analizi ve Sonuçları

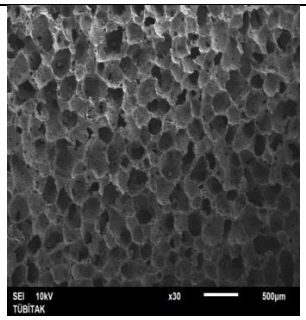
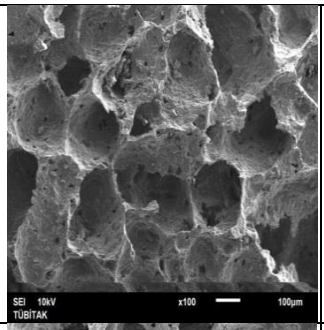
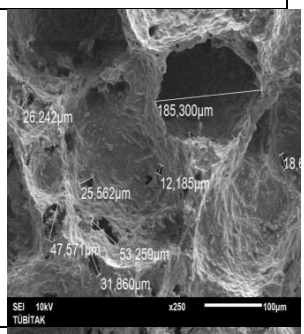
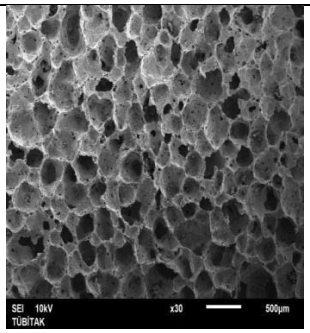
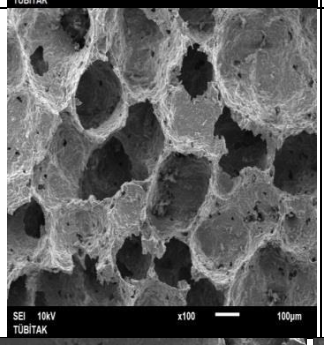
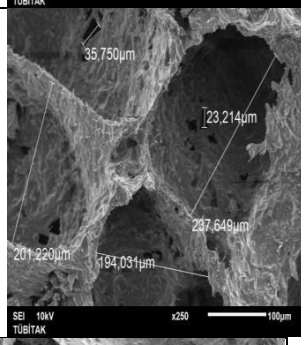
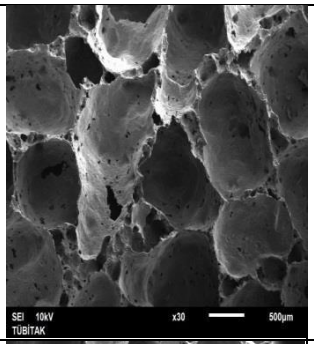
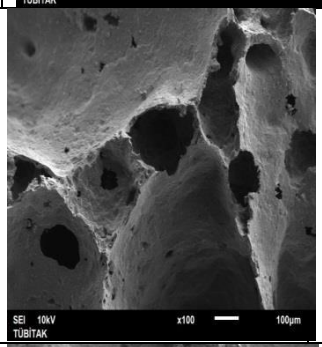
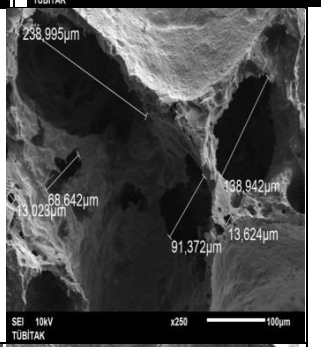
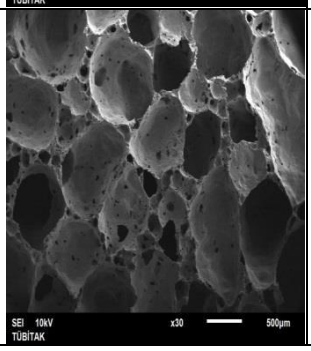
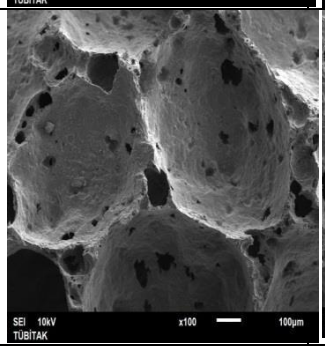
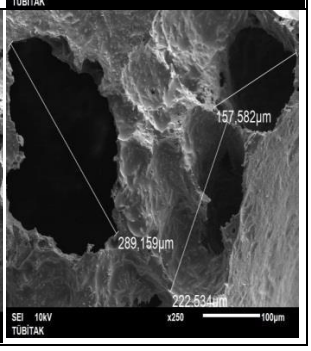
Deneysel çalışma kapsamında üretilen silindirik ve kare cam köpük numunelere ait mikroyapı görüntüleri Jeol 6335F model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 6.11 ve 6.12' de gösterilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde genel olarak kapalı gözeneklerin küresel şekilli homojen olarak dağılım gösterdiği görülmüştür.

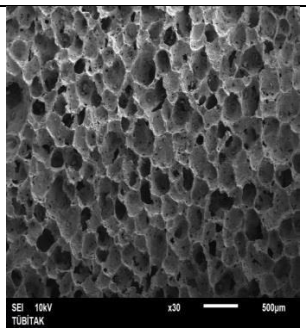
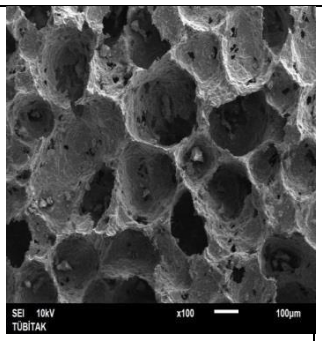
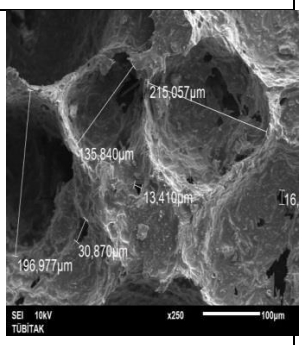
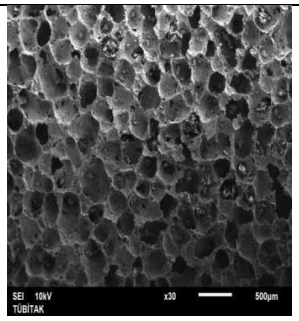
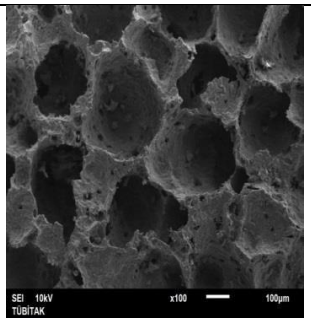
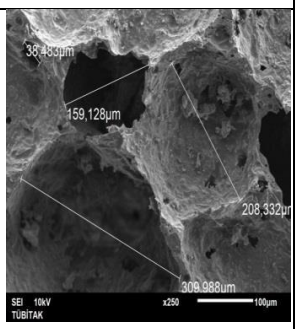
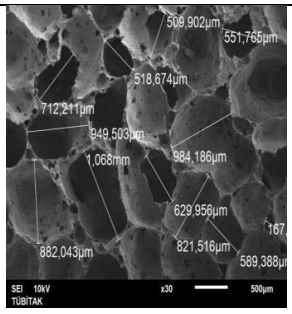
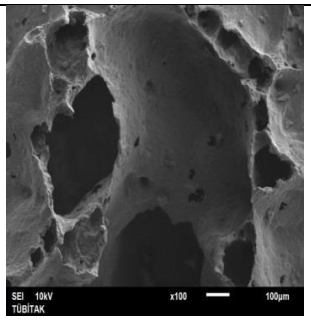
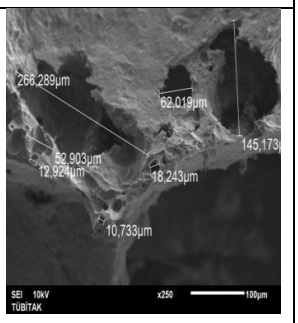
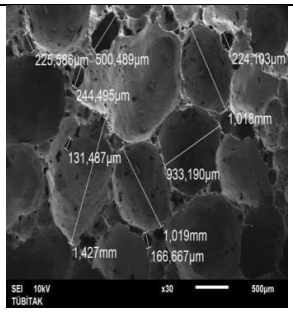
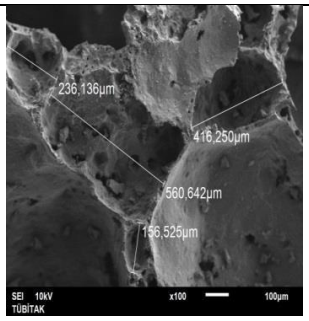
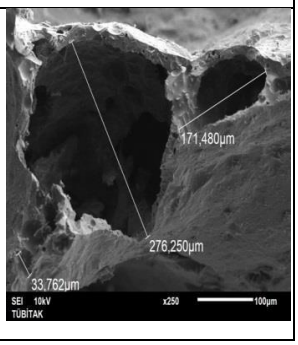
Tablo 6.11: Silindirik cam köpük numunelerin mikroyapı görüntüleri.

Silindirik Numune (Ø 23 mm)			
Numune Kodu	Büyütme Oranları		
	x 30	x 100	x 250
	500 kg/m^2		
A1			
A2			
Y1			
Y2			

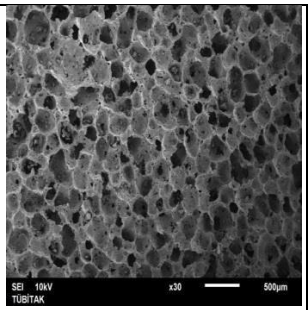
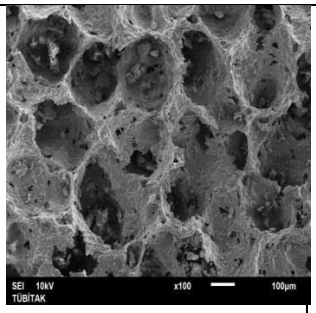
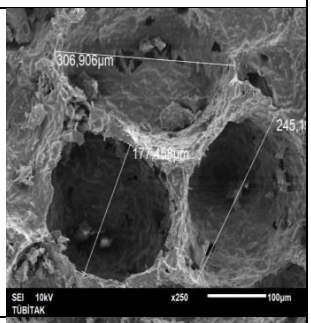
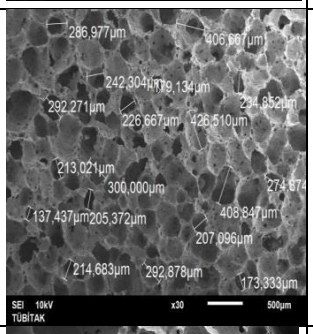
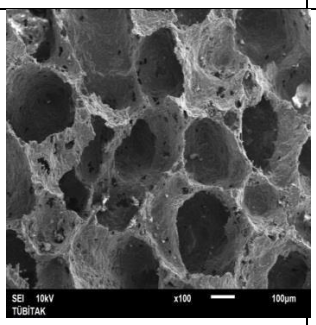
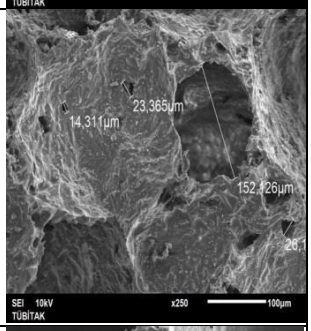
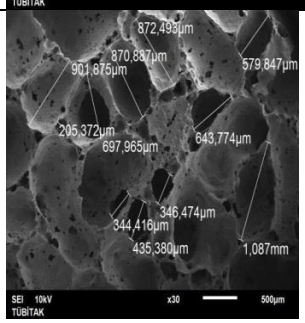
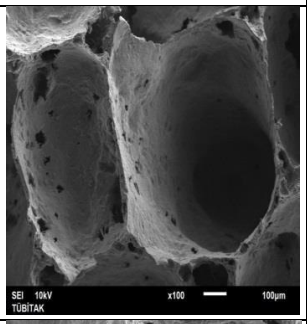
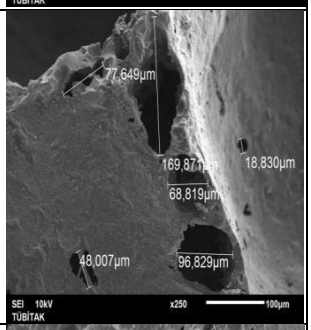
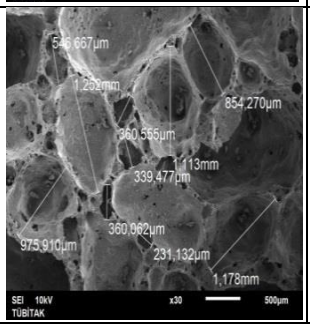
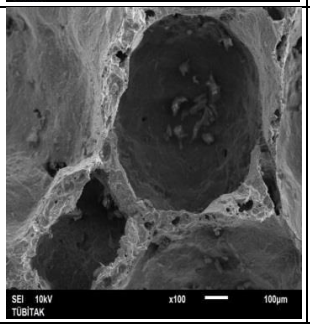
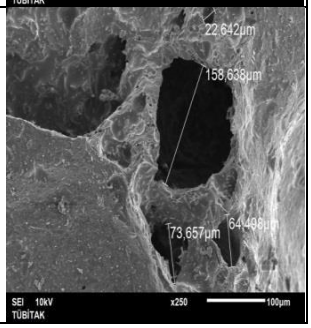
Tablo 6.12: .Kare cam köpük numunelerin mikroyapı görüntüleri.

Kare Plaka (74 mm x 74 mm)			
Numune Kodu	Büyütme Oranları		
	x 30	x 100	x 250
50 kg/cm^2			
A1			
A2			
Y1			
Y2			

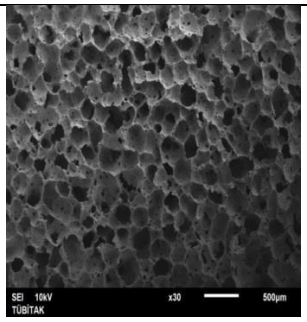
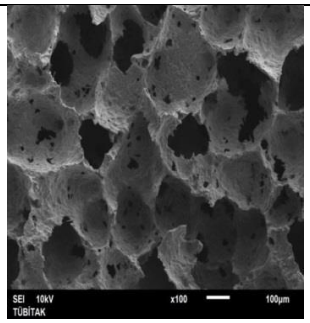
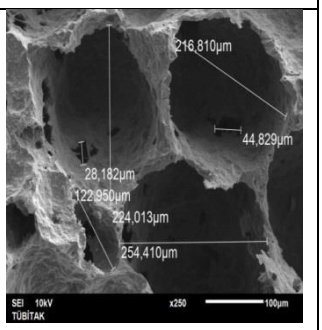
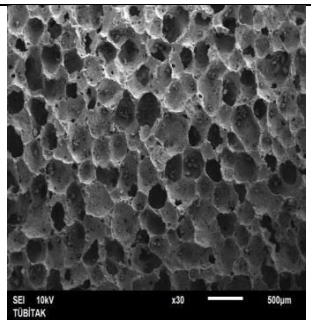
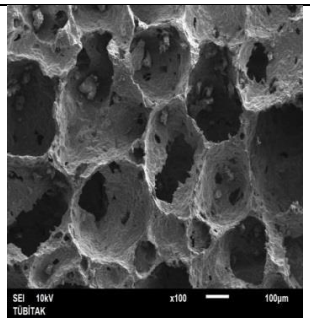
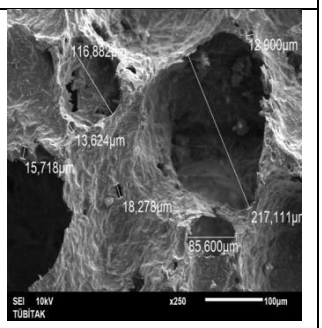
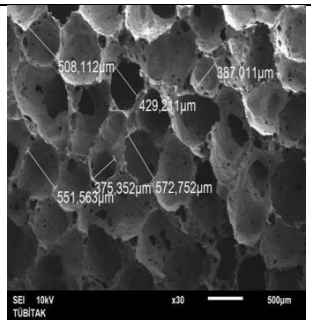
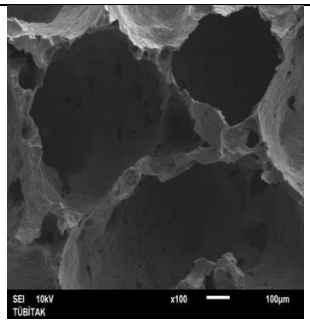
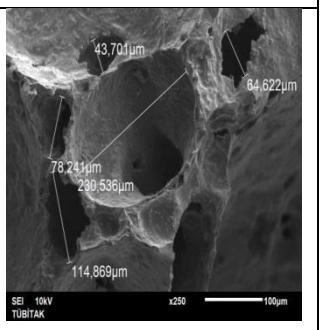
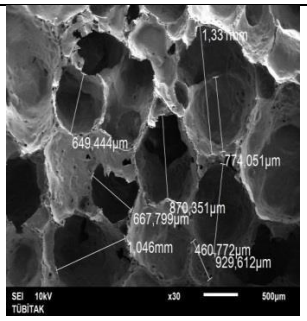
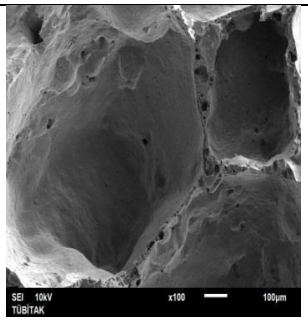
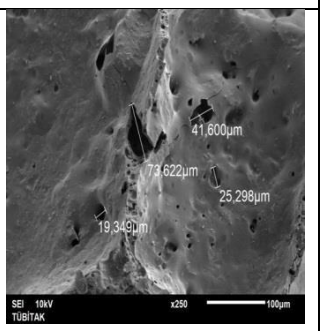
Tablo 6.12: Devam.

100 kg/m^2			
A1			
A2			
Y1			
Y2			

Tablo 6.12: Devam.

250 kg/m^2			
A1			
A2			
Y1			
Y2			

Tablo 6.12: Devam.

500 kg/m^2			
A1			
A2			
Y1			
Y2			

Cam köpük ürünlerinin köpüklenme prosesi başlangıcında küçük ve küresel gözenekler oluşmaktadır. Köpüklenme reaksiyonları devam ettikçe gözenekler büyüyerek küresel şekilden polihedral şekle dönüşmektedir. Mikroyapıda görülen büyük gözenekler, köpüklenme reaksiyonları sırasında CO_2 gazının açığa çıkmasına bağlı olarak oluşmaktadır. Ayrıca, atık cam ve yeşil camın köpüklenme

reaksiyonu sonucu oluşan gözeneklilik üzerinde de etkisinin olduğu düşünülmektedir. Yeşil renkli düz camla üretilen Y1 ve Y2 kodlu numunelerdeki gözeneklerin az sayıda ve büyük, atık camla üretilen A1 ve A2 kodlu numunelerin gözeneklerinin ise çok sayıda ve küçük olduğu görülmektedir. Kullanılan camların kimyasal bileşimlerindeki farklılığa bağlı olarak köpükleşme dereceleri, gözenek yapısı ve boyutundaki değişiklik mikroyapılarına da yansımıştır.

SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere;

- Y1 kodlu numunenin hücre duvarlarında görülen irili ufaklı gözeneklerin numunenin mukavemet özelliği üzerinde olumsuz etkisi yaratacağı düşünülmüştür. Bu durum basma mukavemeti sonuçları ile de örtüşmektedir.
- Atık camın kullanıldığı A1 ve A2 kodlu numuneler kendi içinde karşılaştırıldığında, en fazla hacim artışı ve buna bağlı olarak meydana gelen daha fazla gözeneklilik % 1 oranında Al_2O_3 kullanılan A2 numunesinde gözlenmiştir.
- Benzer şekilde, yeşil renkli düz camın kullanıldığı Y1 ve Y2 numunelerinde de hacim artışı ve gözeneklilik değerleri yine % 1 oranında Al_2O_3 kullanılan Y2 numunesinde meydana gelmiştir. Bu değerleri etkileyen faktörün numunelere yapılan Al_2O_3 ilavesi olduğu düşünülmektedir.

6.2.7. Görünür Yoğunluk Tayini ve Sonuçları

Görünür yoğunluk tayini BS EN 1602:2013 standardına göre belirlenmiştir. [41]. Standarda göre numune kütlesinin hacmine göre oranından görünür yoğunluk değeri hesaplanmıştır.

Standarda göre hesaplanan görünür yoğunluk değerleri Tablo 6.13' de gösterilmiştir. Ayrıca, pres basıncı artışının cam köpük numuneleri yoğunluğu üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 6.13: Cam köpük numunelere ait görünür yoğunluk değerleri.

Numune Kodu	Silindirik Numune (Ø 23 mm)	Kare Plaka (74 mm x 74 mm)			
	Yoğunluk (g/cm^3)	Yoğunluk (g/cm^3)			
Basınç Değeri	500 kg/m^2	50 kg/m^2	100 kg/m^2	250 kg/m^2	500 kg/m^2
A1	0,2212	0,3119	0,3099	0,3174	0,3130
A2	0,2004	0,3006	0,3032	0,2990	0,3062
Y1	0,2028	0,2075	0,2075	0,2105	0,2206
Y2	0,2137	0,2130	0,2095	0,2096	0,1869

7. GENEL SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, köpükleyici malzeme olarak nano boyutlu SiC kullanılarak üretilen cam köpüğü numunelerinin yalıtım sektörü ve yapı sektörüne uygun olarak üretilmesi ve karakterize edilmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla yapılan testlerin belirlenmiş olan cam köpüğü standartlarına uygunluğu araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda iki farklı cam kaynağı kullanılmış ve bu camların cam köpük ürünleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca çalışmalarda, belirlenen reçetelere camın ergimesi sırasında taneler arasında aglomerasyonu engellemek amacıyla alümina (Al_2O_3) eklenerek cam köpüğü üretiminde Al_2O_3 etkisi incelenmiştir.

Çalışmalarda, çapı 23 mm olan silindirik kalıp ve bir kenarı 74 mm olan kare kalıp kullanılarak, farklı basınçlarda numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Silindirik numuneler 500 kg/cm^2 basınçla, kare numuneler ise 50 kg/cm^2, 100 kg/cm^2, 250 kg/cm^2 ve 500 kg/cm^2 basınçlarda preslenmiştir. Numuneler ilk olarak kamara tipi fırında sinterlenmiştir. Ancak kare numunelerin boyutlarının silindirik numunelerden büyük olmasından dolayı fırın içerisine konduğunda, kenarlar numunenin merkezine göre ısıtma elemanlarına daha yakın olmuş ve buda kare numunelerde homojen olmayan bir köpüklenmeye sebep olmuştur. Yapılan araştırmalarda, köpüklenme reaksiyonunun malzemenin üst yüzeyinden başladığı ve yüzeyde oluşan köpüklenmenin numunenin iç kısımlarına izolasyon uyguladığı tespit edilmiştir. Numunenin kendi kendine izolasyon uygulaması yüzeyde çöküntülere neden olabilmektedir. Tüm bu değerlendirmeler göz önüne alındığında ısıtmanın her yönde homojen olması için daha büyük numunelerde hava sirkülasyonlu fırın kullanılmıştır.

Silindirik numunelerde en fazla hacim artışı A2 kodlu numunede, kare numunelerde ise 250 kg/m^2 basınçla basılan Y2 numunesinde gözlenmiştir. Bu durum beklenenden faklı gerçekleşmiştir. Basınç artışı ile birlikte hacim artışının azalması beklenirken tam tersi bir durum gerçekleşmiştir. Atık camlarda basıncın artmasıyla birlikte hacimde artış gözlenirken, yeşil renkli düz cam kullanılan malzemelerde hacim artışı 250 kg/m^2 basınçta maksimuma ulaşmıştır. Ancak her iki sonuçtan anlaşıldığı üzere cam köpüğüne Al_2O_3 katkısı hacim artışına sebep olmuştur. Özellikle yüksek pres basınçlarında basılan cam köpük numunelerinde Al_2O_3 ilavesinin hacim artışı üzerindeki etkisi daha fazla olmuştur.

Cam kaynağı olarak atık cam yerine yeşil renkli düz pencere camı kullanımı ile daha fazla hacim artışı sağlanmıştır. Bu durumun ise camların elementel analizindeki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yeşil cam içerisinde atık cama göre daha fazla Fe_2O_3 bulunmaktadır. Fe_2O_3 silikat camlar için ana oksijen kaynağıdır. Cam köpüğünün sinterleme aşamasında Fe_2O_3 gaz çıkış hızını artırdığı için potansiyel oksitleyici ajan olarak kullanılabilmektedir.

Mineralojik analiz sonuçlarına göre; cam kaynaklarının ve pres koşullarının farklılığı son oluşan ürünün mineralojik özelliklerini etkilememiştir. Elde edilen tüm ürünlerde bulunan fazlar aynıdır.

Kare plakalar için pres basıncının artmasıyla numune yoğunluklarının arttığı, su emme ve porozite değerlerlerinin ise azaldığı belirlenmiştir.

Pres basıncı artışının basma mukavemeti üzerindeki etkisi çok etkili olmamıştır. Ancak, hacim artışının fazla olduğu numunelerde gözeneklilik fazla olduğu için daha düşük basma mukavemetleri elde edilmiştir.

Kare numunelerde, basınç arttıkça hacim artışının artması beklendiği gibi olmamıştır. Ancak bu durum, gazların basıncın etkisiyle numune içerisinde hapsolduğu için rahatça dışarı çıkamadığı şeklinde yorumlanabilir. Numune içerisindeki gaz miktarı ile hacim artışı doğru orantılıdır.

Hammadde olarak kullanılan atık cam, yeşil cam, nano boyutlu SiC, ve Al_2O_3'ün cam köpük ürünleri üzerindeki farklı etkileri numunelerin mikroyapılarından da görülmektedir. Atık cam ve yeşil renkli düz cam hammaddeleri karşılaştırıldığında, yeşil düz cam kullanılan numunelerde daha az sayıda ancak daha büyük gözeneklerin oluştuğu, atık cam kullanılan numunelerde ise daha çok sayıda ve daha küçük gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Mikroyapı görüntülerinden de anlaşılacağı üzere Y1 kodlu numunenin hücre duvarlarında görülen irili ufaklı gözeneklerin numunenin mukavemet özelliği üzerinde olumsuz etkisi yaratacağı düşünülmüş olup, bu durum basma mukavemeti sonuçları ile de örtüşmüştür.

Numunelerin kütle ve hacim değerleri belirlendikten sonra hesaplanmış olan görünür yoğunluk hesaplamasında numunelerin kabaca hacim artışı dikkate alındığından hassas bir sonuç elde edilememiştir.

Bir malzemenin ısıl iletkenliği gözenekliliğiyle doğrudan orantılır. Genel olarak; yeşil renkli düz camın kullanıldığı numunelerde daha fazla hacim artışı ve gözeneklilik elde edilmiş, buna bağlı olarak da yoğunluklarında düşüş meydana gelmiştir. Cam köpük numunelerin ısı iletkenlik katsayıları karşılaştırıldığında, en düşük ısı iletim

katsayısına sahip, yoğunluğu en düşük ve gözenekliliği en fazla olan numunenin Y2 kodlu numune olduğu tespit edilmiştir. ISO ve CEN Standartlarına göre bir malzemenin yalıtım malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için ısı iletim katsayısının < 0,065 W/mK olması gerekmektedir. Tablo 7.5 incelendiğinde proje kapsamında üretilmiş olan tüm cam köpük numuneleri ısı yalıtım malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir.

Atık cam ve yeşil renkli düz cam hammaddesi dışındaki tüm parametreler sabit tutularak şu sonuçlara ulaşılmıştır:

A1 (atık cam + nano SiC) ve Y1 (yeşil düz cam + nano SiC) numuneleri karşılaştırıldığında, yeşil düz cam hammaddesinin cam köpük üzerinde köpüklenme derecesi ısı iletkenlik katsayısı ve yoğunluk özellikleri bakımından daha olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

Tüm farklı pres basınçlarında Y1 kodlu numunelerin hacimce genleşmesi A1 kodlu numunelere göre çok daha yüksek olmuştur. Gözenekliliğin daha fazla olduğu Y1 numunelerinin yoğunluk ve basma mukavemeti değerleri de daha düşük çıkmıştır. Yoğunluk değerlerinin düşük olması cam köpük ürünlerinde istenen bir özelliktir, ancak yoğunluğun düşmesi mukavemeti de olumsuz yönde etkilemektedir.

Yeşil renkli düz camın cam köpük ürünlerinin üzerinde en etkili olduğu özelliklerden birisi de, ısıl iletkenlik katsayısı değeridir. Yeşil düz cam kullanılan tüm numunelerin ısıl iletkenlik katsayısı değerleri atık cam kullanılan numunelerden daha düşük çıkmıştır. Bu sonuç, gözeneklilik ve hacimce genleşme oranlarıyla da örtüşmektedir.

A1 (atık cam + nano SiC) ve A2 (atık cam + nano SiC + Al_2O_3) numuneleri karşılaştırıldığında, alümina ilavesinin köpüklenme reaksiyonu ve hacim artışını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. A2 numuneleri, A1 numunelerine göre daha fazla köpüklenmiş; buna bağlı olarak daha düşük yoğunluk ve daha düşük ısıl iletkenlik katsayısı değerleri elde edilmiştir. Gözenekliliğin artışı ve yoğunluğun düşmesi sonucunda, beklenildiği gibi A2 numunelerinin basma mukavemeti ve elastiklik modülü değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Yine de A2 numunelerinde elde edilen mukavemet değerleri cam köpük ürünlerinden istenilen sınır değerleri içindedir.

Yeşil cam kullanılarak A1 numunesi ile A2 numunesine alternatif olarak üretilen Y1 (yeşil cam + nano SiC) ve Y2 (yeşil cam + nano SiC + Al_2O_3) kodlu cam köpük numuneleri karşılaştırıldığında, Al_2O_3 ilavesi genel olarak hacim artışı ve köpüklenme

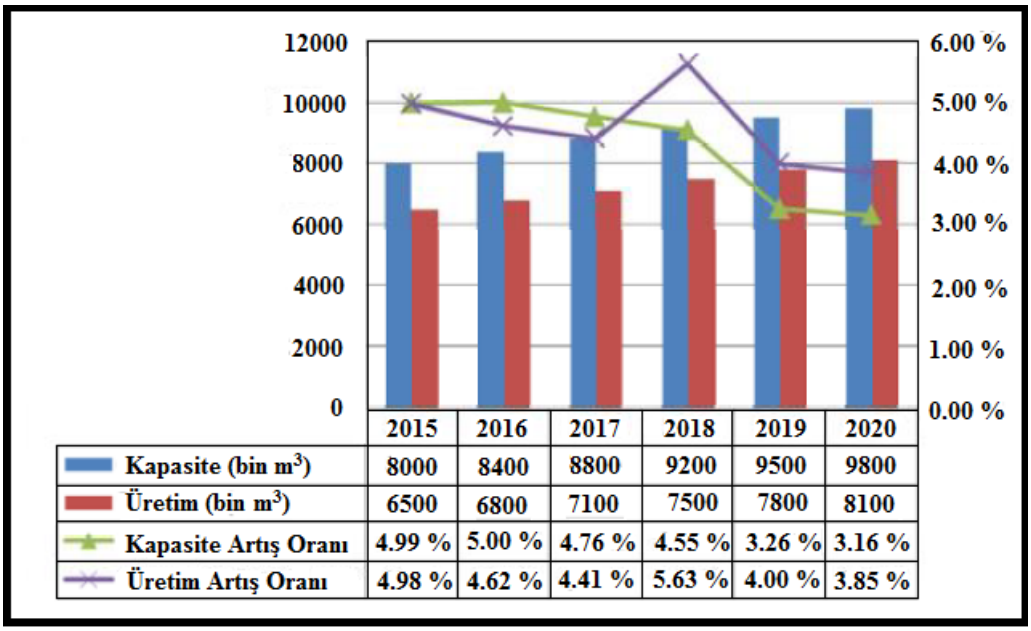
miktarını artırmıştır. Gözenekliliğin artmasıyla genel olarak yoğunluk, ısıl iletkenlik katsayısı ve mukavemet değerlerinde düşüş meydana gelmiştir.

Sonuç olarak, üretilen cam köpüğü numunelerinin basınç dayanımları ve ısı iletim katsayıları dikkate alındığında üretilen tüm kompozisyonlar ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Ancak cam köpüğü üretiminde yeşil renkli düz cam kullanılmasının, atık cam kullanımına göre ısı yalıtım değerini artırdığı tespit edilmiştir. Ancak atık cam ile üretilen cam köpüklerde standartlar dahilindedir ve cam köpüğü üretiminde atık cam kullanımı maliyet açısından uygun olacaktır.

Cam köpüğü üretiminde Al_2O_3' ün kullanımının izolasyon açısından iyi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Fakat Al_2O_3 poroziteyi artırarak izolasyonu iyileştirirken, porozitenin artmasına bağlı olarak mekanik dayanım düşmüştür. Daha yüksek mekanik dayanıma sahip cam köpüğü üretilmek istendiğinde Al_2O_3 miktarı azaltılmalıdır. Cam köpüğü numuneleri yapı malzemesi olarak değerlendirildiğinde, elde edilen numunelerin basınç dayanımının, mekanik mukavemeti 2,5 MPa olan gaz beton numunelerine denk olduğu Tablo 6.9' dan anlaşılmaktadır.

Isı iletim katsayısı en düşük gaz betonun, ısı iletkenlik katsayısının 0,11 W/m.K olduğu göz önünde bulundurulduğunda üretilmiş olan cam köpüklerinin hem ısı yalıtım malzemesi hem de yapı malzemesi olarak kullanılması uygundur.

Binaların dış duvarlarında cam köpüğü malzemenin kullanılmasıyla CO_2 emisyonu ciddi oranlarda azalacak, ilave yalıtım malzemelerinin kullanımının önüne geçilerek daha ince duvar ile daha iyi yalıtım sağlanacaktır. Ayrıca, cam köpüğünün hafifliği ve kolay işlenebilirliği ile de işçilik önemli ölçüde azalacak, bina yapım süreleri kısalacak ve cam köpüğünün kullanımı yaygınlaşacaktır. Bu bağlamda, Çin Pazarı ve küresel pazarları araştırmak için kurulmuş bir grup olan QYResearch Cam Köpüğü Araştırma Merkezi'nin Mart 2015' te yapmış olduğu araştırmalar neticesinde 2015 - 2020 yılları arasında cam köpüğünün küresel üretim ve büyüme kapasitesinin tahmini oranı Şekil 7.1' de gösterilmektedir [42].



Şekil 7.1: Global pazarda 2015 - 2020 yılları arasında cam köpüğünün küresel üretim ve büyüme kapasitesinin tahmini oranı.

Şekil 7.1' den de anlaşılacağı üzere cam köpüğü üretimi ve büyüme oranlarına bakılarak son 5 yıl içerisinde cam köpüğünün kullanımının atacağını da söylemek mümkündür. Cam köpüğünün kullanımında en büyük engel ise ''Global Cam Köpüğü Sektör Raporu 2105'' te de belirtildiği gibi metreküp fiyatının diğer muadillerinden yüksek olmasıdır. Tablo 7.1' de 2009 – 2014 yılları arasında cam köpüğünün metreküp fiyatı gösterilmiştir [42].

Tablo 7.1: ABD ve EU' da satılan cam köpüğü fiyatları.

	2009	2010	2011	2012	2013	2014
ABD için fiyat (USD/m^3)	358	344	333	324	316	309
EU için fiyat (USD/m^3)	336	324	307	298	291	285

Cam köpüğünün metreküp maliyetinin, fiyatı 35 – 70 USD/m^3 arasında değişen gaz betona göre bu denli yüksek olmasının sebebi hammadde ve enerji maliyetlerinin yüksek olması sebebidir. Hammaddede olarak faklı köpükleyici ajanlar ve atık cam kullanılarak maliyet azaltılabilse de enerji maliyetlerini azaltmak açısından çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Öneri olarak; yapılacak yeni çalışmalarda en yüksek enerji maliyeti olan sinterleme sıcaklığının azaltılmasına yönelik araştırmaların yapılması ve farklı üretim

proseslerinin geliştirilmeye çalışılması cam köpüğünün kullanılabilirliğini daha da artıracaktır.

KAYNAKLAR

[1] Web 1, (2016), http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-42.pdf, (Erişim Tarihi: 08/03/2016)

[2] Bozsaky D., (2010), The historical development of thermal insulation materials, periodica polytechnica, Architecture, 41 (2), 49–56.

[3] Alkaya E., Bögürcü M., Ulutas F., (2012), Yaşam Döngüsü Analizi ve Bina IsıYalıtım Malzemeleri İçin Uygulamalar, Çevre Bilim & Teknoloji, 3 (4), 261-274.

[4] İzoder, (2010) Dünya'da Binalarda Enerji Verimliliği Stratejileri ve Türkiye'de Yapılması Gerekenler, 2010-2023 Isı Yalıtım Planlama Raporu, Haziran.

[5] Kulaksızoglu, Z., (2006), Isı Yalıtım Sektör Araştırması, İstatistik Şubesi, Eylül.

[6] Web 2, (2016), http://www.madehow.com/Volume-1/Expanded-polystyrene-Foam-EPF.html, (Erişim Tarihi: 10/03/2016)

[7] Web 3, (2016), http://www.foambymail.com/EPS/polystyrene-foam-single.html, (Erişim Tarihi: 10/03/2016)

[8] Web 4, (2016), http://iwi-gmbh.com/iwi/pdf/IWI_XPS_en.pdf, (Erişim Tarihi: 10/03/2016)

[9] Web 5, (2016), http://www.urfakocdem.com/urun-22-7-xps-kopuk.html, (Erişim Tarihi: 21/03/2016)

[10] Web 6, (2016), http://www.bauder.eu/en/flachdach-eu/flat-roof-products/thermal-insulation-materials/flat-roof/bauderpir-t.html, (Erişim Tarihi: 10/03/2016)

[11] Web 7, (2016) http://www.krbyapi.com.tr/urun/Camyünü-Duvar-Levhası/186, (Erişim Tarihi: 10/03/2016)

[12] Web 8, (2016), http://izomarket.com.tr/portfolio/wooler-dokme-tasyunu/, (Erişim Tarihi: 10/03/2016)

[13] Web 9, (2016), http://www.trapezsac.com.tr/tr/uygulamalar/tas-yunu.html, (Erişim Tarihi: 10/03/2016)

[14] Mineral Strategies Pty Ltd., (2005), The Development of Cellular (Foam) Glass Products Utilizing Wasteglass and Specific Industrial Waste Materials - Commercial In Confidence, 9.

[15] Hurley J., (2003) Research and Development Final Report, GLA-0015, A UK Market Survey For Foam Glass, The Waste and Resources Action Programme., England

[16] Ducman, W., Kovacevic, M., (1997) Key Eng. Mater., 132 (136), 2264-2267.

[17] Onitsuka, K., Shen, J., Hara, Y., Sato, M., (2001), Utilization of Foaming Waste Glass as Construction Materials, Recycling and Reuse of Glass Cullet, Tomas Telford Publishing, London, 197.

[18] Saeed T.M., Saadet M., Bhatty B.M., Khan M.A., Late A.D., (2010), Development of Foam Glass as a New Insulating Building Material, Glass&Ceramic Research Centre, 38, 13-19.

[19] Kelly, M., (2014), Trade of Industrial Insulation, Phase 2, Module 4, Insulation-2-Materials, Science and Application Unit:6, Cellular Glass or Foamed Glass.

[20] Web 10, (2016), http://www.tidl.ie/files/Foamglas_Pipe_Sections_&_Supports.pdf, (Erişim Tarihi: 30/03/2016)

[21] Web 11, (2016), http:// industry.foamglas.com//frontend/handler/document.php?id =1066&type=118,Erişim Tarihi: 30/03/2016)

[22] Web 12, (2016), http://www.yalitim.net/?pid=9031, (Erişim Tarihi: 25/02/2016)

[23] Web 13, (2016), https://www.youtube.com/watch?v=lummv_v5zi0, (Erişim Tarihi: 25/02/2016)

[24] Scheffler M., Colombo P., (2005), Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications, 4th Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinham

[25] Solomon, D., Rossetti M., (1996), ‘’Foamed Glass Manufacture’’, U.S. Patent 5, 516, 351.

[26] Lakov, L., Toncheva, K., Staneva, A., Simeonova, T., Ilcheva, Z, (2013), Composition, Synthesis and Properties of Insulation Foam Glass Obtained From Packing Glass Waste, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 48 (2), 125-129.

[27] Vancea, C., Lazau, I., (2014), Glass Foam From Window Panes and Bottle Glass Wastes, Central European Journal of Chemistry, 12, (7), 804-811.

[28] Bayer G., (1980), Foaming of Borosilicate Glasses By Chemical Reactions in the Temperature Range 950 - 1150°C, Journal of Non-Crystalline Solids, 38 (39), 855-860.

[29] Mukesh C. Limbachiya, John J.Roberts, (2004), Glass Waste, 1st Edition, Thomas Telford Publishing.

[30] Dongsheng L., Xiiuhua L., Wang L., Du J., Zhang, J., (2010), Effect of Carbon as Foaming Agent on Pore Structure of Foam Glass, Advanced Materials Research, 105 (106), 765-768.

[31] Koese V.S,., Bayer, G., Glastechn, B., (1982), Schaumbildung Im System Altglas-SiC und Die Eigenschaften Deratiget Schaumglases, Glastech., 55,. 151-160.

[32] Mackenzie, J.D., (1974), ‘’Method of making foamed glass products with excreta and glass batch’’, U.S. Patent 3, 811, 851.

[33] Ford, (1954), W.D., ‘’Nodulated cellular glass and method of forming’’ U.S. Patent 2, 691, 248.

[34] Brusatin, G., Scarinci, G., Zampieri, L., Colombo, P., (2001), Proceed. 19th Int.C.ongress on Glass, Edinburgh, Scotland, .2, 17-18.

[35] Web 13, (2016), http://www.foamglass.cn/Index/newsview/id/935.shtml, (Erişim Tarihi: 06/02/2016)

[36] Yu. A. Spiridonov and L. A. Orlova, (2003), Problems of Foam Glass Production, Glass and Ceramics, 60, 9 – 10

[37] Méar F., Yot P., Viennois R., Ribes M., (2007), Mechanical behaviour and thermal and electrical properties of foam glass, Ceramics International 33, 543–550.

[38] Bernardo E., Cedro R., Florean M., Hreglich S., (2007), Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams, Ceramics International 33, 963–968.

[39] Méar F., Yot P., Viennois R., Ribes M., (2005), The changes in lead silicate glasses induced by the addition of a reducing agent (TiN or SiC), Journal of Non-Crystalline Solids 351, 3314–3319.

[40] Callister W. D., Rethwisch D. G.,(2013), Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 8. Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık

[41] BS EN 1602:2013” Thermal Insulation Products for Building Applications-Determination of The Apparent Density”

[42] Global Foamglass Industry Report, (2015), Beijing Hengzhou International Information Consulting Co., Ltd.(QY Research), March 2015

ÖZGEÇMİŞ

Abdulkadir SARI 1988 yılında İstanbul, Kadıköy' de doğdu. 2006 yılında başladığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Temel Bilimler Fakültesi Fizik Bölümünü 2012 yılında tamamlayarak 2013 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2014 yılından bu yana VEFA HOLDİNG bünyesinde bulunan VEKNO İleri Teknoloji ve İnovasyon A.Ş' de Teknoloji ve Proje Geliştirme Uzmanı olarak çalışmaktadır aynı zamanda 2 tane TÜBİTAK TEYDEB projesinde proje yürütücülüğü yapmaktadır.