

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

**UÇUCU KÜL KATKILI CAMSI KÖPÜK
MALZEMELERİN ÜRETİM İMKÂNLARININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seramik Müh. ANIL ŞAHİN

Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜH.

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şenol YILMAZ

Ortak Tez Danışmanı : Doç. Dr. Volkan GÜNAY

HAZİRAN 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

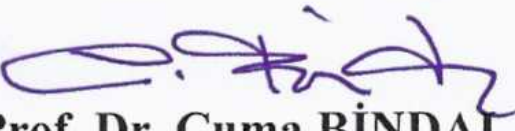
UÇUCU KÜL KATKILI CAMSI KÖPÜK
MALZEMELERİN ÜRETİM İMKÂNLARININ
ARAŞTIRILMASI


YÜKSEK LİSANS TEZİ

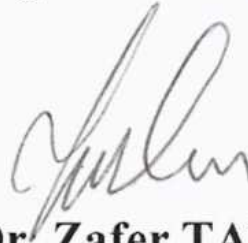
Seramik Müh. ANIL ŞAHİN

Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜH.

Bu tez 07 / 06 / 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Cuma BİNDAL
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Şenol YILMAZ
Üye


Yrd. Doç. Dr. Zafer TATLI
Üye

“Bu tez çalışması SAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje no :FBYLTEZ 2010-50-01-027)”

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinin yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında değerli fikir ve tecrübeleriyle büyük katkı sağlayan, çalışmalarımnda her türlü yardımı gösteren ve beni yönlendiren danışman hocam sayın Doç. Dr. Şenol YILMAZ' a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında yakından ilgilenen, her zaman destek ve yardımlarını gördüğüm, fikir ve önerilerinden faydalandığım ikinci danışman hocam sayın Doç. Dr. Volkan GÜNAY' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında her türlü olanaklarından yararlandığım Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Cuma BİNDAL'a, çalışmalarımıla yakından ilgilenen ve fikirlerinden faydalandığım başta Doç. Dr. Uğur ŞEN olmak üzere Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Öğretim üyelerine, ayrıca çalışmalarım katkılarından dolayı Arş. Gör. Ediz ERCENK'e ve Tekniker Ersan DEMİR'e teşekkür ederim.

Tezin hazırlanmasında, deneysel çalışmaların önemli bir kısmı TÜBİTAK-MAM' da gerçekleştirilmiştir. Gerekli olanakları sağlayan Malzeme Enstitüsü Müdürü Doç. Dr. Tarık BAYKARA'ya teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım sırasında bana her türlü yardımcı olan teknisyenler Yılmaz EMRE ve Aygün GÜNGÖR olmak üzere TÜBİTAK-MAM Malzeme Enstitüsü çalışanlarına teşekkürü bir borç biliyorum. Ayrıca çalışmalarım katkılarından dolayı Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisleri Yasemin TABAK ve Yasemin DEMİRCİ' ye teşekkür ederim.

En önemlisi her zaman yanımda olan kıymetli aileme yürekten teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ VE AMAÇ	1
BÖLÜM 2.	
UÇUCU KÜLLERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI.....	3
2.1. Uçucu Küllerin Tanımı	3
2.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....	6
2.3. Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Yapıları.....	8
2.4. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri.....	11
2.5. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları.....	13
2.5.1. Çimento ve beton üretiminde kullanımı.....	14
2.5.2. Agregada üretiminde kullanımı.....	19
2.5.3. Gaz beton üretiminde kullanımı.....	20
2.5.4. Kerpiç üretiminde kullanımı.....	21
2.5.5. Tuğla üretiminde kullanımı.....	21
2.5.6. Yol inşaatlarında kullanımı.....	23
2.5.7. Geoteknik çalışmalarda kullanımı.....	24
2.5.8. Uçucu küllerin kullanıldığı diğer alanlar.....	24

BÖLÜM 3.

KÖPÜK MALZEMELER.....	26
3.1. Polimer Köpükler.....	26
3.1.1. Polimer köpüklerin sınıflandırılması.....	27
3.1.2. Polistiren köpük.....	29
3.1.3. Polistiren köpük üretimi.....	30
3.1.4. Polistiren köpüğün kullanım alanları.....	30
3.1.5. Polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri.....	31
3.1.6. Polistiren köpüğün kimyasal özellikleri.....	33
3.2. Seramik Köpükler.....	34
3.2.1. Seramik köpük filtreler.....	36
3.2.2. Cam köpükler.....	37
3.2.3. Uçucu kül kullanımıyla cam köpük üretimi.....	38
3.3. Yalıtım Malzemesi Olarak Köpük Kullanımı.....	39

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
4.1. Deney Planı.....	41
4.2. Hammadde Karakterizasyonu.....	41
4.2.1. X-ışınları floresans analizi.....	43
4.2.2. Diferansiyel termal analizi.....	43
4.2.3. Tane boyut analizi.....	44
4.2.4. Taramalı elektron mikroskobu.....	44
4.2.5. X-ışınları difraksiyon analizi.....	44
4.3. Numune Hazırlama.....	44
4.3.1. Harmanlama ve kalıplama.....	45
4.3.2. Şekillendirme.....	45
4.3.3. Sinterleme.....	46
4.4. Deney Numunelerine Uygulanan Testler.....	46
4.4.1. Toplu küçülme ve şekil değişimi.....	47
4.4.2. Gözenek miktarı ve bulk yoğunluk.....	47
4.4.3. Su emme.....	48
4.4.4. Basma mukavemeti testi.....	48

4.4.5. Isıl mikroskop incelemesi.....	49
4.4.6. Isıl iletkenlik ölçümü.....	49
4.4.7. Optik mikroskop incelemesi.....	50
4.4.8. X-ışınları difraksiyon analizi.....	50
4.4.9. Taramalı elektron mikroskobu ve enerji dispersif Spektrometresi analizi.....	50
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ.....	51
5.1. Hammadde Karakterizasyonu.....	51
5.1.1. Uçucu kül.....	51
5.1.2. Cam tozu.....	55
5.2. % Şekil Değişimi, Gözenek Miktarı ve Bulk Yoğunluk.....	59
5.3. Su Emme.....	68
5.4. Basma Mukavemeti.....	70
5.5. Isı Mikroskop İncelemesi.....	72
5.6. Isıl İletkenlik.....	75
5.7. X-ışınları Difraksiyon Analizi.....	77
5.8. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu ile Mikroyapı İncelemesi ve Enerji Dispersif Spektrometresi Analizi Sonuçları.....	78
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	85
6.1. Sonuçlar.....	85
6.2. Öneriler.....	87
KAYNAKLAR.....	88
ÖZGEÇMİŞ.....	93

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

XRF	: X ışınları floresans
EDS	: Enerji dispersif spektrometresi
DTA	: Diferansiyel termal analiz
XRD	: X-Ray difraktometresi
SEM	: Taramalı elektron mikroskop
TS-EN	: Türk standartları
ASTM	: Amerikan test ve malzemeler derneği
F	: Saf uçucu kül numunesi
G	: Saf cam tozu numunesi
F1G	: % 10 uçucu kül-% 90 cam tozu içeren bileşim
F2G	: % 20 uçucu kül-% 80 cam tozu içeren bileşim
F3G	: % 30 uçucu kül-% 70 cam tozu içeren bileşim
F4G	: % 40 uçucu kül-% 60 cam tozu içeren bileşim
F5G	: % 50 uçucu kül-% 50 cam tozu içeren bileşim

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Uçucu küllerin oluşturduğu atık yığını.....	4
Şekil 2.2.	Termik santral atığı uçucu kül yığını.....	5
Şekil 2.3.	Uçucu kül sem görüntüsü.....	9
Şekil 2.4.	Uçucu kül katkılı çimento.....	15
Şekil 2.5.	Uçucu kül katkılı beton kalıbı.....	17
Şekil 2.6.	Uçucu kül katkılı tuğla örnekleri.....	22
Şekil 3.1.	Enjeksiyon köpük yöntemiyle üretilen dallanmış polipropilen köpüğün hücre yapısı.....	26
Şekil 3.2.	Açık ve kapalı hücre yapıları.....	27
Şekil 3.3.	Replikasyon prosesi akım şeması.....	35
Şekil 3.4.	Çeşitli cam köpük malzemeler.....	38
Şekil 3.5.	Uçucu kül katkılı cam köpük malzeme.....	39
Şekil 3.6.	Çeşitli cam köpük yalıtım malzemeleri.....	40
Şekil 4.1.	DeneySEL çalışmalar akım şeması.....	42
Şekil 4.2.	Şekillendirmede kullanılan pres ve kalıp görüntüsü.....	46
Şekil 4.3.	Basma mukavemeti ölçüm cihazı görüntüsü.....	49
Şekil 5.1.	DeneySEL çalışmalarda kullanılan uçucu külün DTA analizi.....	52
Şekil 5.2.	Deneylerde kullanılan uçucu külün tane boyut analizi.....	53
Şekil 5.3.	Kullanılan uçucu kül SEM görüntüleri.....	54
Şekil 5.4.	Kullanılan uçucu kül XRD sonucu.....	55
Şekil 5.5.	DeneySEL çalışmalarda kullanılan cam tozunun DTA analizi.....	57
Şekil 5.6.	Deneylerde kullanılan cam tozunun tane boyut analizi.....	58
Şekil 5.7.	Kullanılan cam tozunun XRD sonucu.....	58
Şekil 5.8.	Numune fotoğrafları (700 °C - 900 °C).....	60
Şekil 5.9.	Numune fotoğrafları (950 °C - 1150 °C).....	61
Şekil 5.10.	Üretilen numunelerin boyutsal değişim – sıcaklık grafiği.....	62
Şekil 5.11.	Üretilen numunelerin porozite – sıcaklık grafiği.....	64

Şekil 5.12.	Civa porozimetresi analiz sonucu (F1G 800 °C).....	65
Şekil 5.13.	Civa porozimetresi analiz sonucu (F1G 900 °C).....	65
Şekil 5.14.	Üretilen numunelerin yoğunluk – sıcaklık grafiği.....	68
Şekil 5.15.	Üretilen numunelerin % su emme – sıcaklık grafiği.....	70
Şekil 5.16.	Üretilen numunelerin basma mukavemeti – sıcaklık grafiği.....	72
Şekil 5.17.	F1G numunesi Isıl mikroskop görüntüleri (32 °C – 733 °C).....	73
Şekil 5.18.	F1G numunesi Isıl mikroskop görüntüleri (781 °C – 1095 °C).....	74
Şekil 5.19.	F1G numunesinin ısı mikroskobu ile şekil değişimi grafiği.....	75
Şekil 5.20.	F1G numunesinin Isıl iletkenlik – sıcaklık grafiği.....	76
Şekil 5.21.	F1G numunesi XRD sonuçları.....	77
Şekil 5.22.	800 °C’de sinterlenen F1G numunesinin optik mikroskop görüntüsü.....	79
Şekil 5.23.	850 °C’de sinterlenen F1G numunesinin optik mikroskop görüntüsü.....	79
Şekil 5.24.	900 °C’de sinterlenen F1G numunesinin optik mikroskop görüntüsü.....	80
Şekil 5.25.	950 °C’de sinterlenen F1G numunesinin optik mikroskop görüntüsü.....	80
Şekil 5.26.	Farklı sıcaklıklarda sinterlenen F1G numunesinin SEM mikroyapı görüntüleri a)800 °C, b)850°C, c)900°C, d)950°C.....	82
Şekil 5.27.	F1G 800 °C numunesi SEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi.....	83
Şekil 5.28.	F1G 850 °C numunesi SEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi.....	83
Şekil 5.29.	F1G 900 °C numunesi SEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi.....	84
Şekil 5.30.	F1G 950 °C numunesi SEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi.....	84

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Türkiye'deki kömür ile çalışan termik santraller.....	6
Tablo 2.2.	Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları.....	8
Tablo 2.3.	Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları.....	10
Tablo 2.4.	Uçucu kül ile ilgili Türk standartları.....	11
Tablo 2.5.	Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	11
Tablo 2.6.	Uçucu kül içerisindeki farklı yoğunlukta tanecik yüzdesi	12
Tablo 2.7.	Uçucu kül inceliğiyle hacimsel yoğunluk değişimi.....	13
Tablo 2.8.	Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanları.....	14
Tablo 3.1.	Polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri.....	33
Tablo 4.1.	Hazırlanan bileşimler ve kodları.....	45
Tablo 5.1.	Deneylerde kullanılan uçucu külün kimyasal analizi.....	51
Tablo 5.2.	Uçucu kül XRD sonucunda belirlenen fazlar ve kullanılan simgeler.....	55
Tablo 5.3.	Deneylerde kullanılan cam tozunun kimyasal analizi.....	56
Tablo 5.4.	Üretilen numunelerin % şekil değişimi değerleri.....	62
Tablo 5.5.	Üretilen numunelerin % porozite değerleri.....	63
Tablo 5.6.	Üretilen numunelerin yoğunluk değerleri.....	67
Tablo 5.7.	Üretilen numunelerin % su emme değerleri.....	69
Tablo 5.8.	Üretilen numunelerin basma mukavemeti değerleri (MPa).....	71
Tablo 5.9.	F1G bileşimine ait ısı iletkenlik değerleri (W/mk).....	76
Tablo 5.10.	Sinterlenen F1G XRD sonucunda belirlenen fazlar ve kullanılan simgeleri.....	78

ÖZET

Anahtar kelimeler: Uçucu kül, Cam köpük, Yalıtım malzemesi.

Bu çalışmada, endüstriyel olarak ortaya çıkan iki temel atık uçucu kül ve cam kırığı kullanarak köpük yapıcı ilavesi olmaksızın cam köpük malzemelerin üretim imkânları araştırılmıştır. Böylece, atıkların yeniden üretime kazandırılması hedeflenmiştir.

Deneysel çalışmada Seyitömer Termik Santrali uçucu külü ve atık pencere camı kullanılmıştır. Kullanılan hammaddelerin x-ışınları difraksiyon (XRD), x-ışınları floresans (XRF) ve diferansiyel termal analizleri (DTA) ile karakterizasyonları yapılmıştır. Ayrıca her iki hammaddenin de tane boyutları ölçülmüş ve uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile tane yapısı incelenmiştir. .

Uçucu kül içerisine ağırlıkça %50-60-70-80-90 oranlarında atık pencere cam tozu ilave edilip homojen karışım sağlamak amacı ile silindirik döner karıştırıcıda kuru olarak 60 dakikada karıştırılmıştır. Karışımlar ağırlıkça %10 oranında nemlendirilerek 500 µm boyutunda elekten geçirilerek granül hale getirilmiştir. Hazırlanan granüller kuru preste 800 kg/cm² basınç altında şekillendirilmiştir. Kurutmayı takiben şekillendirilen numuneler 700-1150 °C sıcaklık aralıklarında 1 saat süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme işlemlerinde 5 °C/dakika ısıtma hızı kullanılmış ve sıcaklıklarda 50 °C artışlar uygulanmıştır. Sinterlenen numunelerde gözenek miktarı, bulk yoğunluk, su emme ve basma mukavemeti ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, XRD ile faz analizi, optik mikroskop ve SEM ile mikroyapı analizi, ısıl iletkenlik katsayısı ölçümü ve ısı mikroskobunda şekil değişimi incelemeleri de gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, %90 oranında atık pencere camı ve % 10 uçucu kül içeren bileşimlerde köpük yapıcı ilavesi olmadan camsı köpük malzemelerin üretilebileceğini göstermiştir. 900 °C'de sinterlenen numunelerde % 44 porozite değeri elde edilmiştir.

THE INVESTIGATION OF PRODUCTION POSSIBILITIES OF FLY ASH ADDED GLASS-FOAMS

SUMMARY

Key words: Fly ash, Glass foam, Izolation materials.

In this study, the production possibilities of glass foam materials without foam agents additions were investigated by using two different type industrial waste such as fly ash and waste glass. Consequently, the waste recycle aimed.

The Seyitomer thermal power plant fly ash and waste window glass were used in experimental procedure. The raw materials were analysed by using x-ray difraction (XRD), x-ray flouresans (XRF) and differantial thermal analysis (DTA). The grain size of both of raw materials were also measured and grain structure of fly ash was checked by using scanning electron microscopy (SEM).

The powder mixtures were made by addition of 50, 60, 70, 80 and 90 wt.% waste glass powder to fly ash, respectively. Cyclindirical dry roller mixer was used to obtain homogeneous mixtures for 60 min. The mixtures were moisturized 10 wt.%. and the granulation was carried out by using sieve (500 μm). Prepared powders under pressure of 800 kg/cm^2 were shaped by uniaxial dry pressing. The sintering procedure at 700-1150 $^{\circ}\text{C}$ for 1 h was carried out. Heating rate of 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. was selected in sintering. Porosity, bulk density, water absorbsion and compression strength tests were realized in sintered samples. Moreover, the examinations of XRD for phase analysis, optical microscopy and SEM for microstructural analysis, coefficient of thermal conductivity measurement and shape changing by thermal microscope were performed.

The results showed that composition of 90% waste window glass and 10% fly ash could be made without any foam agent additions. The porosity of sintered samples at 900 $^{\circ}\text{C}$ was 44%.

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Bu çalışma kapsamında endüstriyel olarak ortaya çıkan iki temel atık uçucu kül ve cam kırığı kullanılmıştır. Böylece, atıkların yeniden üretime kazandırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda atıkların değerlendirilebileceği yeni bir malzeme üretimi araştırılmıştır. Hedeflenen malzeme uçucu kül esaslı camsı köpük malzemedir.

Ülkelerin ekonomik ölçekte büyüme eğilimi göstermesi enerji tüketimlerinin de artmasına sebep olmaktadır. Enerji tüketimindeki artışlar ve endüstriyel gelişim beraberinde atıkların sebep olduğu çevre kirliliğini meydana getirmektedir. Bunun yanında küresel ısınma ile ilgili problemlerin çözümü için fosil kaynaklı enerjiler yerine yenilenebilir kaynakların kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişmiş ülkelerde geri dönüşüm konusu büyük önem kazanmış ve bu hammaddelerin kullanımına ilişkin araştırma çalışmaları giderek artan bir ivme kazanmıştır. Türkiye’de de güncelliğini koruyan en önemli konulardan biri enerjiden ve kullanılan hammaddeden tasarruftur [1].

Ülkemizdeki elektrik enerjisinin halen büyük bir bölümü kömüre dayalı termik santrallerde üretilmektedir. Elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül adı verilmektedir. Ülkemiz termik santralleri, her yıl 16 milyon tonun üzerinde uçucu kül ortaya çıkarmakta ve bu da işletmeler için önemli stok ve çevre problemleri meydana getirmektedir [2,3].

Çok geniş miktarlarda depolama alanlarında biriken uçucu kül tarım alanları, su kaynakları ve doğal çevreye önemli zararlar vermektedir. Uçucu külün çok az miktarı çimento üretiminde ve beton üretiminde agreganın yerine ya da katkı olarak kullanılabilir. Uçucu külün çevreye duyarlı ve ekonomik şartlarda kullanılması konusunda günümüzde araştırma çalışmaları yoğun biçimde

yapılmaktadır. Ucuz maliyetli, çevre dostu ve istenen mekanik özellikleri sağlayan yapı malzemesi üretimi günümüzde malzeme bilimi ile ilgili araştırma yapan araştırmacıların temel hedefi olmuştur [4].

Cam atıklar, ülkemizde tüm dünyada olduğu gibi katı atıkların içerisinde en büyük oranı oluşturmaktadır. Günümüzde cam, çok değişik alanda kullanılmakla beraber inşaat, oto ve mutfak eşyası alanlarında yoğunlaşmıştır. Cam sektörü ürünleriyle inşaat, otomotiv, beyaz eşya, gıda, ilaç, kozmetik, mobilya, boru, elektrik ve elektronik gibi birçok sektöre girdi vermektedir. Gerek kullanım sırasında gerekse değişik nedenlerle sanayide ve evlerde çok miktarda kullanılmayan cam atık madde olarak atılmaktadır. Cam, büyük çoğunluğu kuvars olmak üzere, feldspat, dolomit, kireçtaşı ve sodanın belirli oranlarda karışımından meydana gelir. Bu maddelerin eritilerek ani soğutulması sonucunda cam oluşur. Ergimiş halde yüksek viskozite değerine sahip olan bu karışım, ani soğutma sonucunda sıvı haldeki molekül yapısını koruyarak katılaşır. Bu sırada yüksek viskozite ve ağır molekül hareketleri nedeniyle yeni bir molekül yapı oluşturacak zaman bulamayan cam molekülleri, katı halin düzgün kristalli yapısına gelemmez. Dolayısı ile pek çok maddeden sert olan ve katı gibi görünen camın yapısı, bir sıvınıninki gibi düzensizdir [5].

Bu çalışmada yaklaşık 100 µm boyutunda uçucu kül ve yaklaşık 75 µm boyutunda atık cam kullanılmıştır. Kullanılan hammaddelerin x-ışınları analizi (XRD), tane boyut analizi ve diferansiyel termal analizi (DTA) yapılarak karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra % 10-50 uçucu kül içeren uçucu kül-cam tozu karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar kuru pres ile şekillendirilmiş ve 700-1050 °C sıcaklık aralığında sinterlenmiştir. Sıcaklığın ve uçucu kül-cam tozu bileşimlerinin etkileri incelenerek camsı köpük malzeme üretimine uygulanabilirliği araştırılmıştır. Sinterlenen numuneler üzerinde çeşitli karakterizasyonlar yapılarak, cam ilavesinin ve sinterleme sıcaklığının, camsı köpük malzeme özelliklerine etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2. UÇUCU KÜLLERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

2.1. Uçucu Küllerin Tanımı

Uçucu küller, endüstride kullanılmayan düşük kaliteli kömürlerin termik santrallerde yakılarak elektrik enerjisi üretimi sırasında yan ürün olarak büyük miktarlarda ortaya çıkan atık malzemelerdir [2,6-12].

Uçucu küller, depolama, taşıma, çevre ve hava kirliliği bakımından ciddi problemlere yol açmaktadır. Dolayısıyla, uçucu küllerin bu etkilerini ortadan kaldırmak ve çözmek için ekonomik ve güvenilir yöntemlere gereksinim vardır [6,7,13]. Şekil 2.1’de uçucu küllerin oluşturduğu bir atık yığını görülmektedir [13].

Termik güç santrallerinde düşük kalorili kömür 0.09 m inceliğe kadar öğütülmekte ve su ile yanma fırınına püskürtülmektedir. Fırın içinde ortalama 1100-1600 °C sıcaklıkta yanan kömür tanecikleri, kısmen adi kül (cüruf) şeklinde kazan altında toplanmakta ve su ile uzaklaştırılmaktadır. Bu kazan altı cürufu $20 \cdot 10^{-6}$ - $3 \cdot 10^{-3}$ m büyüklüğündeki taneciklerden ibarettir. Külün geri kalan ve daha ince yapıları kısmı baca gazları ile sürüklenerek önce siklonlar daha sonra da elektro filtrelerde tutulur. Baca gazları ile sürüklenen ve hava ile temas ederek, ani soğuma sonucu puzolanik özellik kazanan bu küllere hafif olmaları nedeniyle uçucu kül (fly-ash) adı verilir [14].

Türkiye’de halen yılda 16 milyon tondan fazla uçucu kül açığa çıkmaktadır. Endüstriyel bir atık olan uçucu kül miktarının artması çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Türkiye’de ve dünyada uçucu kül geri dönüşümü ve kullanım alanları konusunda çok sayıda çalışma yapılmaktadır [1].



Şekil 2.1. Uçucu küllerin oluşturduğu atık yığını [13]

Türkiye’de halen sadece kömür ile çalışan 15 tane termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallere ait bilgiler, alfabetik olarak Tablo 2.1’ de verilmiştir. Tablo 2.1’ de görüldüğü gibi; Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü-İskenderun termik santrali haricindeki bütün santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır. Türkiye’de elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl uçucu kül elde edilmektedir. Bu miktar, A.B.D.’de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan’da 50 milyon ton/yıl dolayındadır. Bütün Dünyada bir yılda üretilen toplam uçucu kül’ün ancak % 25’den daha azı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte Almanya, Hollanda ve Belçika’da üretilen toplam uçucu kül’ün % 95’den fazlası, İngiltere’de ise yaklaşık % 50’si kullanılmaktadır. Diğer taraftan büyük miktarlarda uçucu kül üretilen A.B.D. ve Çin’de sırasıyla yaklaşık % 32 ve % 40 oranında uçucu kül kullanıldığı görülmektedir. 1990 yılı verilerine göre Türkiye’de uçucu kül kullanım oranı % 1’den daha azdır. Son yıllara ait yeni veriler ise elde edilememiştir. Uçucu kül’lerin bacalarda tutulması ile günümüzün çok önemli problemlerinden biri olan hava ve toprak dolayısıyla çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Öte yandan uçucu kül’lerin biriktirilmesi veya atılması, önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. Uçucu kül’lerin neden olduğu çevre problemleri arasında, tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgâr erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksik madde taşınması ve radyasyon

sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr erozyonu ve tozlanma, uçucu kül'lerin havuzlarda çökeltilmesi veya ıslatılarak taşınması sayesinde önlenmektedir [2].

Yukarıda sayılan sorunların çözümlenmesi, uçucu kül'lerin çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması ile mümkün görünmektedir. Uçucu kül'lerin değerlendirildiği sektörlerin başında ağırlıklı olarak inşaat sektörü gelmektedir. Bundan başka uçucu kül, kimya, seramik, cam, cam-seramik, döküm-metal sanayi, tarım sektöründe zemin ıslahı, çevre, sondaj çalışmaları, buzlanmanın önlenmesi, inşaatlarda ve maden ocaklarında dolgu malzemesi olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [2]. Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.2.) inşaat çalışmalarında dolgu olarak uçucu külün kullanılması gösterilmiştir [15].



Şekil 2.2. Termik santral atığı uçucu kül yığını [15]

Tablo 2.1. Türkiye'deki kömür ile çalışan termik santraller [2]

No	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)	Bulunduğu il
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
6	Çoklakoğlu 2	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü – İskenderun	İthal kömür	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

2.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küller, elde edildikleri kömürün tipine göre de linyit uçucu külü ve taş kömürü uçucu külü şeklinde de ikiye ayrılır [14].

Uçucu külleri kimyasal yapılarına göre 4 ana sınıfa ayırmak mümkündür.

1) Silikat-alümina esash uçucu küller Yapılarının büyük bir kısmını kuvars (SiO_2) ve bir miktar alümina (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Genellikle taş kömürü uçucu külleridir.

2)Silikat-kalsit esaslı uçucu küller Yapılarındaki oksitler kuvars (SiO_2) ve kalsit'tir(CaCO_3). Fakat kalsit miktarı oldukça yüksektir.

3)Sülfür-kalsit esaslı uçucu küller Yapılarının büyük bir bölümü kükürt trioksit (SO_3) ve kalsit'ten (CaCO_3) meydana gelmiştir. Bu sınıfa genellikle linyit kömürü uçucu külleri girmektedir.

4)Sınıflandırılmayan uçucu küller Termik santrallerdeki yakma sisteminin homojen olmamasından kaynaklanan ve belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir. Kimyasal yapıları sürekli değişebilmektedir [10].

Uçucu küller ASTM C618' e göre F ve C olmak üzere iki genel sınıfa ayrılırlar [2-3].

F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürlerden (taş kömürünün yakılması sonucu) elde edilir ve $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) toplamı % 70'in üzerindedir. F sınıfı uçucu küller %10'dan daha az CaO içerdikleri için düşük kireç külü olarak da isimlendirilirler. Bu küllerin bünyesinde serbest kireç (CaO) bulunmadığından kendi kendine sertleşme özelliğine sahip değildirler ve ancak sulu ortamda kireçle reaksiyona girerek sertleşme gösterirler. Puzolanik reaksiyonlar (çimentolaşma) normal koşullarda çok yavaştır. Silikat–alümina esaslı uçucu kül F sınıfı uçucu küller arasındadır [2-3].

Genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan C sınıfı uçucu kül'lerdir. C sınıfı uçucu küller, bünyesinde %10'dan daha fazla CaO bulundurlar ve bundan dolayı da yüksek kireçli uçucu kül olarak da tanımlanmaktadır. C sınıfı uçucu küller serbest kireç nedeniyle kendi kendine çimentolaşma özelliğine sahiptirler [2-3].

Diğer bir sınıflandırma, ENV 197-1' e göre yapılmakta ve uçucu kül, iki kategoriye ayrılmaktadır. Buna göre uçucu kül, çimentolarda kullanılacak olan uçucu küller, silisli ve kalkerli uçucu küller olarak sınıflandırılmıştır [2].

2.3. Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Yapıları

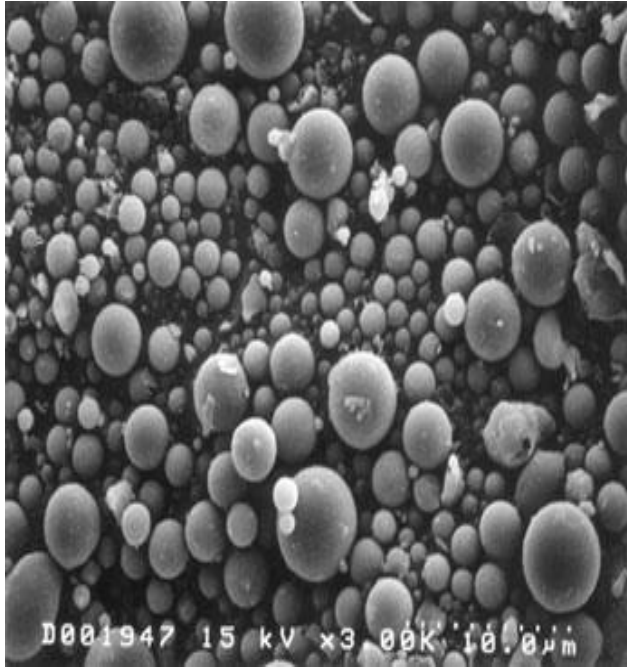
Uçucu kül'lerde S+A+F toplamının, genellikle % 70 değerinden fazla olduğu ve ASTM C 618'deki şartın sağlandığı görülmektedir. Kullanılan kömür cinsine bağlı olarak bazı uçucu kül'lerde önemli oranda CaO bulunmaktadır. CaO miktarı % 10'un altında olan uçucu kül'ler, düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, % 10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.

Türkiye'de elde edilen bazı uçucu kül'lerin kimyasal kompozisyonları, TS 639 ve ASTM C 618 sınır değerleri ile birlikte Tablo 2.2' de verilmiştir. Afşin-Elbistan uçucu kül'ü dışında diğerlerinin genel olarak TS 639'da belirtilen sınır değerlere uygun olduğu, ASTM C 618'e göre ise Afşin-Elbistan uçucu kül'ünün C sınıfı, diğer uçucu kül'lerin F sınıfı olduğu görülmektedir.

Tablo 2.2. Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları [2]

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Seyit ömer	Çatalağzı	Tunç bilek	Çayırhan	TS639 sınırları	ASTM C 618 sınırları	
							F	C
SiO ₂	27.4	56.9	56.8	58.59	49.13	-	-	-
Al ₂ O ₃	12.8	17.25	24.1	21.89	15.04	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5.5	10.63	6.8	9.31	8.25	-	-	-
S+A+F	45.7	84.78	87.7	89.79	72.42	>70	>70	>50
CaO	47.0	4.32	1.4	4.43	13.2	-	-	-
MgO	2.5	5.14	2.4	1.41	4.76	<5	<5	<5
Na ₂ O	(N+K) 0.3	0.31	(N+K) 3.0	0.24	2.2	-	<1.5	
K ₂ O	-	1.55	-	1.81	1.76	-	-	-
SO ₃	6.2	2.40	2.9	0.41	3.84	<5	<5	<5
K.K	2.4	1.5	0.6	1.39	0.72	<10	<12	<6

Uçucu kül'lerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Düşük kireçli uçucu kül'lerin ana aktif bileşeni, silis ve alüminadan oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu kül'ler, rutubetli ortamda sönmüş kireç (CaOH_2) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu kül'ler ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum, alüminat, amorf silis ve alümina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler. Uçucu kül tanecikleri Şekil 2.3'te görüldüğü gibi yuvarlak bir şekle sahiptir [2].



Şekil 2.3. Uçucu kül sem görüntüsü [16]

Uçucu küller amorf(camsı) yapıda içi boşluklu veya dolu yapıda kürecikler ile mineral parçacıklardan ve yanmamış taneciklerden meydana gelir. Mineralojik olarak, uçucu küldeki silikanın bir kısmı kuvars kristalleri halinde, bir kısmı mullit ve geriye kalanı da camsı fazda bulunur. Uçucu külün içerisindeki karbon miktarları çok değişmektedir. İyi yanma olan termik santrallerde karbon yüzdesi çok düşük olmaktadır [14].

Düşük kireçli uçucu kül'lerdeki camsı faz miktarı, yüksek kireçli uçucu kül'lerden daha fazladır. Düşük kireçli uçucu kül'lerde mineral faz olarak; camsı faz, mullit, hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_2O_4), kuvars (SiO_2) var iken yüksek kireçli uçucu kül'lerde sayılanlara ek olarak serbest kireç (CaO), anhidrit(CaSO_4), trikalsiyum alüminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), plajiyoklaz, gehlenit, feldspat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır. Türkiye'deki bazı uçucu kül'lerin mineralojik kompozisyonları Tablo 2.3'te verilmiştir [2].

Tablo 2.3. Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları [2]

Mineral %	Termik Santral					
	Afşin Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1,0	18,1	1,2	4,3	8,8	6,0
Kuvars	4,5	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Manyetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,9
Hematit	4,0	0,1	6,0	2,0	3,0	7,0
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Serbest CaO	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1,0
Plajiyoklaz	≈29	-	≈15	≈20	-	≈25
Amaorf ve camsı faz	≈30	≈70	≈50	≈50	≈70	≈35

Kömür kaynaklarının bölgesel olarak farklılık göstermesinden dolayı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri sabit olmamakla birlikte, hepsinin ana bileşenleri silika ve alüminadır. Uçucu küller kimyasal olarak SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , MgO ve TiO_2 oksitlerinin bir karışımı olup, kuvars, mullit, hematit, manyetit ve gipsit mineral fazlarını içermektedir [7,10,11,13].

Türk Standartları Enstitüsü, uçucu kül ile ilgili olarak beş tane standart yayınlamıştır. Bunlar sırasıyla, TS 639, TS 640, TS EN 450, TS EN 451-1 ve TS EN 451-2

standartlarıdır. Bu standartlara ait bilgiler, Tablo 2.4’te sunulmuştur. TS 640, AB’ye uyum çerçevesinde yürürlükten kaldırılmış ve yerine TS EN 197-1 “Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar” standardı uygulamaya konulmuştur [2].

Tablo 2.4. Uçucu kül ile ilgili Türk standartları [2].

Standart no	Standardın adı	Açıklama
TS 639	Uçucu küller – çimentoda kullanılan	Tarifi, sınıflandırılması, özellikleri, deney metodları ve kalite kontrolü
TS 640	Uçucu küllü çimento	Fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve deney metodları
TS EN 450	Uçucu kül – betonda kullanılan	Özellik ve kalite kontrolü
TS EN 451-1	Uçucu kül – deney metodu-bölüm 1	Serbest kalsiyum oksit tayini
TS EN 451-2	Uçucu kül – deney metodu-bölüm 2	Islak eleme ile incelik tayini

2.4. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu külün fiziksel özellikleri, genel olarak termik santralde yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sistemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uçucu kül genellikle gri renktedir. Rengi, içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça daha koyu bir hal almaktadır. Uçucu kül % 60-90 camsı bileşen ihtiva eden çok ince taneciklerden meydana gelmektedir. Uçucu külün tane şekli, yuvarlaktır ve çapları, 1-200 μm arasında değişir. Taneciklerin yaklaşık % 75’inin çapı 45 μm ’den, % 50’den çoğu ise 20 μm ’den daha küçüktür. Uçucu kül’ün yoğunluğu, 2,2- 2,7 gr/cm^3 dolayındadır. Uçucu kül’ün özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakın olup öğütme yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir. Uçucu kül’lerin fiziksel özellikleri Tablo 2.5’de özetlenmiştir [2].

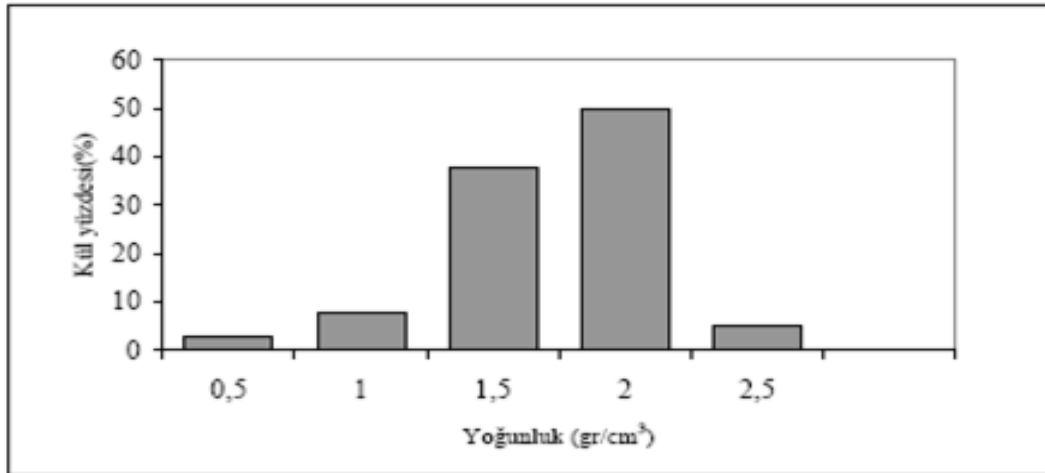
Tablo 2.5. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri [2]

Çap (μm)	Şekil	Renk	Yoğunluk(g/cm^3)	İncelik
1-200	Yuvarlak	Gri	2,2-2,7	Çimento inceliği

Uçucu kül çimentodan daha koyu gri renkte, çok küçük taneli, akıcı, yumuşak bir malzemedir. Çeşitli şekil ve büyüklükte, genellikle küresel, şeffaf, bazen açık renkli, bir kısmı siyah, çok az esmer kırmızı renkte taneciklerden meydana gelir. Uçucu külün inceliği özellikle termik santrale verilen kömürün öğütülme derecesine bağlıdır. İnceliğe etkili olan ikinci faktör de ince küllerin mümkün olabildiğince bacada tutulmasıdır. Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar. Ayrıca incelik külün elde edildiği kömüre de bağlıdır. Genellikle taşkömürü uçucu külü linyit uçucu külünden, elektrofitrelerde toplanan uçucu küller ise siklonlarda toplanandan daha incedir.

Uçucu kül içerisinde, farklı yoğunlukta kül vardır. Bunların miktarları da birbirinden farklıdır. Şekil 2.4'de uçucu kül içerisindeki farklı yoğunlukta bulunan uçucu küllerin yüzdeleri görülmektedir [14].

Tablo 2.6. Uçucu kül içerisindeki farklı yoğunlukta tanecik yüzdesi [14]



Uçucu küllerin incelikleri arttıkça yoğunlukları da artmaktadır. Tablo 2.7' de inceliğe göre yoğunluk değişimi görülmektedir [14].

Tablo 2.7. Uçucu kül inceliğiyle hacimsel yoğunluk değişimi [14].

Spesifik Yüzey (cm ² /g)	Yoğunluk (g/cm ³)
690	1.64
740	1.74
1080	1.77
1110	1.82
1180	1.83
2690	2.08
3720	2.19
3990	2.28
4740	2.33
5280	2.42

Uçucu külün mekanik dayanımı; içerisindeki boşluklu malzeme yüzdesine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple uçucu külün puzolanik aktivitesi önemlidir. Puzolanlar tek başına bağlayıcı özeliği bulunmayan veya çok az bulunan ancak öğütüldüklerinde oda sıcaklığında ve sulu ortamlarda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bağlayıcı özeliği bulunan bileşikler verebilen maddelerdir. Puzolanlar çimento gibi hidrolik özellik göstererek dayanım kazandıklarından, çimento ve harca katılarak beton yapımında kullanılırlar. Puzolanik özelliğe sahip olan uçucu kül, sulu ortamda kireçle Ca(OH)₂ reaksiyona girerek çimentolaşabilir ve bağlayıcı özellik kazanır [14].

2.5. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları

Uçucu küllerden katma değeri yüksek ürünler elde etmeye yönelik yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu ürünlerin en önemlileri inşaat sektöründe olup, tuğla, çimento, beton bloklar ve kiremit şeklindedir. Ayrıca, inşaat sektörünün dışında da uçucu kül kullanımı ile ilgili; jeoteknik uygulamalar, cam ve aşınmaya dirençli malzemeler, döküm kumu, müllit üretimi, refrakter, kompozit üretimi, nem tutucu, malzeme geri kazanımı, sondaj çalışmaları, buzlanmanın önlenmesi, maden ocaklarında dolgu ve tarım sektöründe zemin ıslahında kullanımına yönelik birçok araştırma yapılmaktadır [2,6,7,8,9,12].

Uçucu küllerin yapı, elektronik ve geleneksel seramik sanayinde hammadde olarak kullanılabilirliğine dair çalışmalarda sürdürülmektedir [7].

Dünyada 1970'li yıllarda başlayan petrol krizinin ardından enerji kullanımını azaltmaya ve alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir. Uçucu kül'lerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabilceği ve dolayısıyla bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da mümkün görülmektedir. Türkiye ve Dünya' da uçucu kül'lerin kullanıldığı alanlar Tablo 2.8' de özetlenmiştir. Türkiye'de uçucu kül kullanımına ait detaylı veriler bulunmamakla birlikte genellikle çimento ve tuğla üretimi ile baraj yapımında kullanıldığı görülmektedir [2].

Tablo 2.8. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanları [2]

Malzeme	Kullanım amacı / yeri
Çimento	Hammadde, katkı ve ikame malzemesi olarak
Agrega	İnce agrega, iri agrega ve hafif agrega olarak
Beton	Katkı ve ikame malzemesi olarak
Tuğla, ateş tuğlası	Katkı malzemesi olarak
Kerpiç	Bağlayıcı malzeme olarak
Yapı malzemeleri	Blok, panel, duvar, gaz beton, beton boru, cam, boya, seramik, plastik, harç.
Çeşitli yapılar / uygulamalar	Baraj, otoyol, nükleer santral, geoteknik uygulamalar

2.5.1. Çimento ve beton üretiminde kullanımı

Beton özelliklerini geliştirmek ve çimentodan tasarruf etmek amacıyla çimentoya ikame edilen birçok malzeme türü bulunmaktadır. Mineral malzemeler elde edildikleri kaynaklara göre; doğal, yapay ve ısı işlem görmüş malzemeler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar. çimento ve beton üretiminde kullanılan yapay puzolanlardan biri de uçucu küllerdir.

Betonda ve çimentoda mineral katkı olarak kullanılan puzolanik malzemelerin puzolanik aktiviteleri temelde puzolandaki reaktif silis içeriğine bağlıdır. Bu yüzden puzolanlarda silisli ve alüminli minerallerin türü ve miktarı puzolanik aktivite üzerinde çok önemlidir. Puzolanik aktivite, çimentolu üretimlerde kalsiyum hidroksit ve puzolandaki alümina silikatlar arasındaki reaksiyonun hızı ve kapasitesi olarak tanımlanır. Aynı zamanda mineraller, aynı kompozisyonla farklı aktivite gösterebildikleri için puzolanik aktivite sadece kimyasal bileşim ile ilgili değildir. Uçucu kül gibi puzolanik malzemelerin yeterli puzolanik aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis+alümin+demir oksit” içermesi gerekmektedir [1].

1980'li yıllardan itibaren Türkiye’de katkılı çimentoların çimento üretimindeki payı, % 90'ların üstüne çıkmıştır. Şekil 2.4’te uçucu kül katkılı çimento görülmektedir. Uçucu kül’lerin çimentoda;

- 1) hammadde,
- 2) katkı maddesi,
- 3) ikame malzemesi, olarak kullanıldığı görülmektedir [2].



Şekil 2.4. Uçucu kül katkılı çimento [17]

Uçucu kül, çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalkere hammadde olarak karıştırılarak klinker üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu kül çimentoda katkı olarak kullanıldığında enerji tasarrufu sağlanmakta ve daha ucuz çimento elde edilmektedir. [2].

Yine uçucu kül'ün, ikame malzemesi olarak çimentoda kullanılması durumunda da ekonomi sağlanmaktadır. Türkiye'deki uçucu kül'ler ile ilgili olarak yapılan deneysel bir çalışmada, Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Orhaneli, Soma ve Tunçbilek uçucu kül'lerine ait özgül yüzey değerleri, çimento standartlarında aranan en az 2800 cm²/gr değerinden büyük veya yaklaşık eşit olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, uçucu kül'lerin öğütme işlemi yapılmadan doğrudan çimento üretiminde veya üretim sonrası ikame metodu ile çimentonun bir bölümü yerine kullanılabileceğini göstermektedir.

Öte yandan çimento üretimi sırasında çok büyük miktarda doğal hammadde ve enerji tüketimi yapılmakta ve atmosfere CO₂ gazı çıkmaktadır. Bu da sera etkisi yaparak iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Bu yüzden çimento üretiminde uçucu kül kullanılması ile doğal çevrenin bozulması ve enerji tüketimi azalacağı gibi havadaki CO₂ miktarı da azalacağı için küresel ısınmanın en aza indirilmesi mümkün görülmektedir. Bu durumda enerji tasarrufu sağlandığından çimento maliyetinin de azalması söz konusudur. Türkiye'de ve Dünyada uçucu kül'lü çimentolar ve bu çimentoların özellikleri ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Türkiye'de 1980 yılına kadar çimento üretiminde kullanılan toplam uçucu kül miktarı, yaklaşık olarak 40.000 tondur. İtalya'da elde edilen uçucu kül'ün ancak % 1'i çimento üretiminde kullanılırken, Fransa'da 4 milyon ton/yıl dolayında uçucu kül elde edilmekte ve bunun % 25'i çimento üretiminde kullanılmaktadır. A.B.D.'de ise üretilen uçucu kül'ün yaklaşık % 25'i çimento ve betonda değerlendirilmektedir. Çin'de uçucu kül-kireç karışımları, yaklaşık 50 yıldan beri duvar çimentosu olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Öte yandan deneysel bir çalışma ile uçucu kül'ün, çimento şerbeti içinde yüksek miktarda ek bağlayıcı madde olarak kullanılabileceği belirlenmiştir [2].

Uçucu külün çimento ile birlikte inşaat sektöründe en çok kullanıldığı diğer bir alan, beton üretimidir (Şekil 2.5). Uçucu kül hem normal ve hafif betonda hem de giderek kullanımı yaygınlaşan hazır beton üretiminde gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır [2].



Şekil 2.5. Uçucu kül katkılı beton kalıbı [18]

Betonlarda genellikle düşük kireçli uçucu kül kullanılmaktadır. Yüksek kireçli uçucu küllerin betonlarda kullanılması durumunda yüksek CaO oranı betonların durabilitesini ve betonun stabilitesini bozabilmektedir. Uçucu küller içerisinde bulundukları karbon ve sülfürden dolayı çimentoyla reaksiyona girdiklerinde beton içerisinde alkali oranını arttırmakta ve bunun neticesinde korozyonu hızlandırmaktadır. Ayrıca uçucu kül içerisinde bulunan yanmamış karbonların miktarına göre betonun elektrik iletkenliği artar ve beton siyah bir renk alır. Uçucu kül içerisinde bulunan karbon miktarının artması betonun su ihtiyacını da arttırmaktadır. Bunun yanında yapılan bir dizi çalışma sonunda ise, % 20-30 oranında uçucu kül kullanımının korozyon direnci ve beton dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Çimento, ince öğütülmüş uçucu kül ikamesi ile üretilen betonların olumlu kimyasal reaksiyon gerçekleştirerek geçirimsizliklerinin arttığı ve klor geçirimsizliğinin önemli oranda azaldığı saptanmıştır. Uçucu küllü betonların kısa süreli dayanımları olumsuz etkilenmektedir. Bunun yanında düşük oranlarda uçucu kül kullanılması durumunda ise uçucu kül bulunmayan şahit betonlara göre uzun süreli dayanımları artış göstermekte ve betonlarda kılcal su geçirimsizliği azaltmaktadır. Uçucu küllü puzolanik çimentoların öğütülme süreleri, normal çimentolara göre daha kısa sürmekte ve bu çimentoların 28 gün sonundaki dayanım değerleri, uçucu kül ikameli çimento harçlarına göre daha yüksek olmaktadır [1].

Portland çimentosuna uçucu külün ikame edilmesiyle çimentonun hidratasyonu gecikmekte böylelikle çimentonun priz başlama suresi artarak betonun erken dayanımı düşmektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla Na_2SO_4 ve CaCl_2 gibi kimyasal aktivatörler kullanılabilen ve bu kimyasallar puzolanik reaksiyonu hızlandırarak uçucu kül ile serbest kirecin arasındaki reaksiyonu değiştirmektedir. Yapılan bir çalışmada, % 40-60'a kadar değişen oranlarda uçucu kül içeren çimentoya, % 3'lük Na_2SO_4 katkısı yapılarak hidratasyonun hızlandırıldığı belirtilmiştir. Kendiliğinden yerleşen betonlarda % 30-40 oranlarında F sınıfı uçucu kül ikameli çimentoların kullanılması ile daha iyi dayanım özellikleri elde edilmektedir. Yüksek miktarda (% 50) uçucu kül kullanılarak ekonomik ve aynı zamanda 35 MPa'dan daha yüksek dayanıma sahip kendiliğinden yerleşen betonlar da üretilmiştir [1].

Dünyada uçucu külün inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili çalışmalar, genellikle beton üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Yüksek miktarda C sınıfı uçucu külün kullanıldığı bir çalışmada, daha iyi kalitede ve düşük maliyetli beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Dördüncü eleman olarak yüksek miktarda uçucu külün betondaki performansının uzun süreli olarak incelendiği diğer bir çalışma, uçucu külün taşıyıcı beton uygulamaları ile sülfat ve klorür etkisine maruz kalan ortamlarda kullanılabileceğini göstermiştir. Öte yandan yapılan deneysel bir araştırma sonucunda uçucu külün polimer beton üretiminde de kullanılabileceği tespit edilmiştir. Uçucu külün olumlu bir etkisi de betonarme çeliği üzerindedir. Beton karışımında uçucu kül kullanılması durumunda betonarmede donatı korozyonunun azaldığı deneysel olarak belirlenmiştir. Uçucu külün kullanıldığı diğer bir beton çeşidi lifli betondur. Deneysel olarak yapılan araştırmalarda otoklav uygulanmış lifli beton üretiminde ve kendiliğinden yerleşen lifli beton yapımında yüksek oranda uçucu kül kullanılabileceği önerilmektedir.

Diğer taraftan uçucu kül, betonun hidratasyon ısını düşürmek amacıyla Türkiye'de ve Dünyada birçok barajın yapımında da kullanılmıştır. A.B.D.'de 1953 yılında tamamlanan Hungry Horse barajının kütle betonunda 120.000 ton uçucu kül kullanıldığı bildirilmektedir. Bundan başka silindirle sıkıştırılmış beton (rolkrit) çok

sayıda baraj, beton karışımlarına uçucu kül katılarak inşa edilmiştir. İngiltere’de nükleer bir enerji santrali inşaatında kullanılan betonda yaklaşık olarak 100.000 ton uçucu külün katkı malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir [2].

2.5.2. Agreganın üretiminde kullanımı

Uçucu külden üretilen hafif agregalar kullanılarak, hafif beton tasarımı ve üretimiyle daha ekonomik ve daha çevre dostu beton üretmek mümkündür. Hafif uçucu kül agregaları, uçucu küllerin değişik bileşimlere sahip olmasından dolayı farklı davranışlar gösterebilmektedir. Beton üretiminde ince agrega yerine F sınıfı uçucu kül kullanılabilir. Uçucu küllü betonların kontrol betonlarına göre işlenebilirlikleri, basınç dayanımları ve elastisite modülü değerleri olumlu yönde gelişmiştir. Betonda ince agrega olarak % 40’a kadar değişen oranlarda uçucu kül kullanıldığında betonların aşınma direnci kontrol betonlarına göre de artmaktadır [1].

Ülkemizde yapılan bir çalışmada, sinterlenmiş uçucu kül hafif agregası üretimi laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiş ve bu malzemenin inşaat sektöründe başta agrega olmak üzere birçok alanda kullanılabileceği önerilmiştir. Sinterlenmiş uçucu kül hafif agregasının geleneksel agrega yerine betonda içi dolu veya boş blok üretimi için kullanılabileceği ve çok katlı binalarda ölü yükü azaltacağı belirtilmektedir. Uçucu külün agrega olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar, özellikle son yıllarda hız kazanmıştır. Beton karışımına ince agreganın bir kısmı yerine uçucu kül kullanılarak yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiş ve uçucu külün ince agreganın bir bölümü yerine kullanılabileceği tespit edilmiştir. Uçucu külden elde edilen hafif agregalarla ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Yapılan bu çalışmalarda, yüksek sıcaklıkta sinterlenerek yapay iri hafif agrega olarak üretilen uçucu kül, hafif beton yapımında kullanılmış ve beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Başka bir çalışmada uçucu kül, kil ile birlikte yapay agrega olarak üretilmiş ve betonda, yıkıntı atığı ile birlikte başarıyla kullanılmıştır. Diğer yandan uçucu külün bir dizi işlem sonrası beton içinde tekrar kullanılan agrega olarak kullanıldığı bir çalışmada, doğal agrega kullanılarak üretilen beton ile atık agrega içeren betonda benzer sonuçlar elde edilmiştir. İngiltere’de inşa edilen nükleer bir santral inşaatında 1.300 ton sinterlenmiş uçucu kül, hafif agrega olarak beton içinde kullanılmıştır [2].

2.5.3. Gazbeton üretiminde kullanımı

Gazbetonda, uçucu kül çimentodan çok, ince kum yerine kullanılır. Amerikan gazbeton üreticileri birliği uçucu külün gazbetonda %75 oranına kadar kullanılmasını önermektedir. Uçucu kül agrega olarak yeterli ince tane boyutuna sahip olduğundan ilave bir öğütme işlemi gerektirmez. Uçucu kül ile üretilen gazbetonun kuvars kumu ile üretilen gazbetona göre daha iyi ısı yalıtım ve mukavemet özelliklerine sahip olduğu savunulmaktadır. Burada muhtemelen uçucu kül puzolanik özelliğe sahip olması nedeniyle kireç ile reaksiyona girerek mikro yapıyı güçlendirici yeni bağlar üretir. Koyu gri veya siyaha yakın atığın gazbeton üretimine katılması nihai ürün rengini koyulaştırır ya da gri renge çevirir.

Yapıları itibari ile kum ve uçucu kül malzemeli gazbetonlar zamanla gelişen hidrasyon derecelerine bağlı olarak dikkate değer farklılıklar göstermektedir. Başlangıçta sadece çimento hidrata olurken, arkasından nispeten daha yavaş biçimde uçucu külde hidrata olmaktadır. Gazbetonda, belirli bir yoğunluk için kumun uçucu kül ile yer değiştirmesi (uçucu kül ikamesi) mukavemette artış sağlamaktadır. Çimento-kum karışımına göre, çimento-uçucu kül karışımı örnekler nispeten daha yüksek su emme oranına sahiptirler.

Köpük beton karışımında çimento yerine %75'e kadar uçucu kül ikamesi ile bir çalışma yapılmıştır. Buna göre porozite, kullanılan uçucu kül tipine veya miktarına bağlı olmayıp, büyük oranda örneğin kuru yoğunluğuna bağlı olmaktadır. Su emme değerinin kütlelerin yüzdesi olarak (ağırlıkça) verilmesi yanıltıcı olmaktadır. Çünkü köpük betonun birim ağırlığı karışım oranlarına bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Köpük betona, ince kum yerine uçucu külün katılması ile daha homojen bir gözenek dağılımı sağlanır. Daha ince taneli olması nedeniyle uçucu kül her bir kabarcığı bir duvarla kaplayarak, kabarcıkların birleşmelerini ve üst üste gelmelerini engelleyerek uniform bir gözenek dağılımı sağlar. Gözenek dağılımında gözeneğin tane boyutu küçüldükçe köpük betonun mukavemetinde artış gerçekleşmiştir. Gözeneklerin birleşmesi ile gözenek hacminin büyümesi sonucu daha büyük boşluklar oluşup daha büyük gözenek dağılımı meydana gelerek mukavemette düşme gerçekleşir. Gözeneğin şekli köpük betonun özelliklerini

etkilemez. Araştırmalar göstermiştir ki çimentonun %60'a kadar uçucu kül ile ikamesi imento pastasının özelliklerini geliştirmektedir. Uçucu külün imento ile yüksek oranlarda (%75'e kadar) yer değiştirmesi sonucu köpük betonun basınc mukavemetinde dikkate değer artış elde edilmiştir [1].

2.5.4. Kerpiç üretiminde kullanımı

Bilindiği gibi kerpiç yapımında, killi toprak ile lif olarak saman kullanılmaktadır. Kerpiç, dayanımı düşük ve suya karşı da dayanıksız olan geleneksel bir yapı malzemesidir. Kerpicein dayanımını ve dayanıklılığını artırmaya yönelik çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Kerpice bağlayıcı olarak alçı katılmış ve elde edilen bu malzemeye alker adı verilmiştir. Alçı, alkerin fiziksel ve mekanik özelliklerini, normal kerpice göre önemli lde iyileştirmiştir. Bundan başka, kerpiç üretiminde uçucu külün kullanıldığı bazı araştırmalar da yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, uçucu külün kerpiç özelliklerini olumlu yönde etkilediğini, dolayısıyla kerpiç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak uçucu külün kullanılabileceğini göstermektedir [2].

2.5.5. Tuğla üretiminde kullanımı

Tuğla üretiminde uçucu küller iki farklı amaca yönelik olarak kullanılırlar. Bunlardan ilki uçucu küllerin, kilin fazla suyunu emerek plastik killerin çatlamasını, şişmesini ve ieklenmesini önlemek amacıyla yardımcı ve düzeltme malzemesi olarak, ikincisi ise külün puzolanik özelliği ve inceliği nedeniyle pişmiş malzemede mukavemetin arttırılması ve plastik özelliği olmadığı için bağlayıcı görevi görmesi amacıyla ana malzemede kullanılmasıdır. Ayrıca uçucu küllerin pişme sırasında enerji tasarrufu sağladığı bildirilmektedir [3,10]. şekil 2.6' da uçucu kül katkısı ile üretilen tuğlalar görülmektedir.



Şekil 2.6. Uçucu kül katkılı tuğla örnekleri [19-22]

Uçucu kül beton ve çimentoda kullanıldığı gibi tuğla sektöründe çok yaygın kullanım imkânı bulamamıştır. Bunun yanında bazı çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalardan birinde, tuğla üretiminde uçucu kül kullanılmış ve üretilen uçucu kül katkılı örneklerle referans tuğla örneklerinin tekstürünün birbirine çok benzediği belirtilmiştir. Küresel ve tane boyutu 0,1 ile 10 mikron arasında değişen uçucu kül bulunan örneklerin durabiliteleri önemli oranlarda gelişmiştir. Bu taneleri içeren örneklerin mikro gözenekleri azalmış ve bu sayede tuz kristalleşmesinden kaynaklanan bozulmaları azalmıştır. Seyitömer termik santrali uçucu külü ile yapılan tuğlalarda, referans tuğlaya göre uçucu kül ilavesi birim hacim ağırlığını çok az miktarda arttırırken, kuruma, pişme ve toplam küçülmede belirgin bir değişime neden olmamıştır. Uçucu kül ilavesi ile üretilen tüm tuğlalarda su emme miktarı

referans tuğlaya göre azalmış, buna karşılık tuğlaların hiçbirinde referans tuğlada elde edilen dayanım değerine ulaşamamıştır. Seyitömer uçucu külünün kullanıldığı bir çalışmada tuğla için en iyi kompozisyonun; uçucu kül (% 65), kum (% 20) ve hidrat kireç (% 12) kullanılarak yapılacağı belirtilmiştir.

Tuğla üretiminde Seyitömer ve Tunçbilek uçucu külü ana hammadde olarak kullanılmış ve bünyede % 70-100 oranlarda uçucu kül kullanılarak tuğla örnekler üretilmiştir. Çalışmada uçucu kül kullanılarak üretilen tuğla örneklerin kilden üretilen tuğlalara göre daha düşük birim ağırlık ve ısı iletkenlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Deneysel örneklerinin ısı iletim katsayısı değerlerinin gazbeton sınıflarına yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir [1].

Uçucu külün belirli oranlarda çeşitli malzemelerle birlikte tuğla üretiminde kullanılabileceği yapılan çalışmalarla belirlenmiştir. Elle çalıştırılan tuğla makinesinin kullanıldığı bir araştırmada uçucu kül, kireç ve kum birlikte tuğla üretiminde kullanılmıştır. Başka bir çalışmada uçucu kül, tuf ve kireç birlikte kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Uçucu külün kireç ile birlikte değişik oranlarda karıştırılarak tuğla yapımında kullanılabileceği, deneysel olarak yapılan bir çalışma ile önerilmiştir. Hindistan'da yapılan inşaatlarda uçucu kül tuğlası kullanılması uygun görülmektedir. Türkiye'de tuğla üretiminde uçucu kül kullanımı, 1967 yılında başladığı halde daha sonra kesintiye uğramıştır. Ayrıca 1973 ve 1979 yıllarında ateş tuğlası üretiminde uçucu kül kullanıldığı görülmektedir [2].

2.5.6. Yol İnşaatlarında Kullanımı

Uçucu kül, inşaat sektöründe yol yapım çalışmalarında da kullanılmaktadır. Kaplama olarak hem beton hem de asfalt kullanılan otoyolların yapımında uçucu kül kullanılmaktadır. Konu ile ilgili çalışmaların A.B.D.'de 1930'lu yıllarda başladığı görülmektedir. İlk defa uçucu kül, 1938 yılında A.B.D.'nin Chicago şehrinde bir yol inşaatında çimentoya karıştırılarak kullanılmıştır. Uçucu külün, yol yapımında temel malzemesi ve asfalt karışımı içinde de mineral filler olarak kullanıldığı görülmektedir. Öte yandan uçucu kül, yolun temel ve alt temelinin yapımında kum veya çimentonun bir kısmı yerine de kullanılabilir. Deneysel bir çalışma ile

uçucu külün asfalt karışımında ince malzemenin bir kısmı yerine kullanılabilceği belirlenmiştir. Bağlayıcı başka bir malzeme kullanılmadan uçucu kül ve kum karışımından iyi ve ucuz stabilizasyonun elde edilebileceği belirtilmektedir. Afşin-Elbistan uçucu külünün kullanıldığı deneysel olarak yapılan çalışmalarda, bu külün kireç ile birlikte yol stabilizasyonunda ve bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılabilceği belirtilmektedir [2].

2.5.7. Geoteknik çalışmalarda kullanımı

Geoteknik uygulamalarda uçucu kül, dolgu yapmak, zemin stabilizasyonu sağlamak ve bent yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra uçucu külün, sızdırmazlık sağlamak amacıyla atık depolama sahalarında, yol kaplaması altındaki dolgu tabakası yapımında, donatılı zemin duvarlarda duvarın arka dolgusu olarak ve ayrıca çöp atık sahaları üzerinde yapılan beton kaplama veya döşemelerdeki farklı oturma hasarlarının onarımı için kireç ile birlikte enjeksiyon uygulamasında kullanılmaktadır. Deneysel bir araştırma, yol dolgularının yapımında uçucu külün çimento ile birlikte pratik olarak kullanılabilceğini göstermiştir [2].

2.5.8. Uçucu külün diğer uygulamalarda kullanılması

Diğer kullanım alanları arasında: endüstriyel seramik ve refrakterlerin üretiminde, boyaların üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda ve bitki yetiştirilmesinde kullanımları sayılabilir. Yapılan bir çalışmada; kompozitlerin mekanik özelliklerine kullanılan bağlayıcının davranışının etkisinin incelenmesi amacıyla, kloroplen kauçuk ve uçucu kül kullanılarak test edilmiş ve %1'lik bağlayıcı olarak uçucu kül kullanımı ile kompozit bir malzeme üretilebilmiştir. Başka bir kompozit malzeme üretiminde ise; farklı uçucu kül ağırlık yüzdelerine sahip epoksi reçine kompoziti yoğunluk, sertlik ve elektriksel özellikleri merkezkaç kuvveti altında hazırlanarak elde edilmiş ve uçucu külün ağırlık yüzdesi arttırılarak, malzemenin alternatif iletkenliğini ve izolatör sabitliği arttırılmıştır. Lateks harçlarının basınç dayanımları uçucu kül oranının artmasıyla azalma göstermektedir. F ve C sınıfı uçucu kül ile çimento kullanılarak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre C sınıfı uçucu kül kullanılan kompozitler F sınıfına göre daha düşük

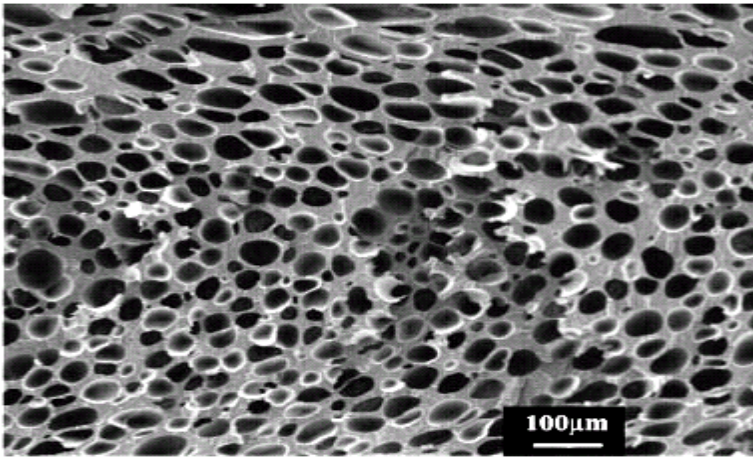
elastisite modülü değerleri vermiştir. F tipi uçucu kl ve ęimento kompozitinin akışkanlığının, uçucu külün tane dağılımla yakından ilişkili olduğu da belirtilmiştir [1].

Yapılan ęalıřmalar, uçucu küllerin hammadde olarak cam-seramik malzemelerin üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Genellikle uçucu kl esaslı cam seramikler yer ve duvar karosu şeklinde inşaat sektöründe kullanılmaktadır [2,23-27].

BÖLÜM 3. KÖPÜK MALZEMELER

3.1. Polimer Köpükler

Polimer köpükler, uçucu gaza dönüşebilen gaz veya sıvı haldeki köpük yapıcıların genişlemesiyle üretilen, yoğun polimer matris ile çevrilmiş, gaz boşlukları içeren malzemeler olarak tanımlanır. Polimer köpükler genellikle, minimum iki fazdan oluşur. Bunlardan birincisi katı polimerik matris, diğeri ise köpük yapıcı ile elde edilen gaz fazıdır. Polimer içindeki boşluklar malzemenin yoğunluğunu azaltırken daha az hammadde kullanımı sağlarlar. Köpük uygulamalarında en çok tercih edilen polimer tipleri poliüretan, polistiren, polietilen, polipropilen, polivinil klorür ve polikarbonat' dır. Toplam polimer köpük üretiminin yaklaşık %70–80'i poliüretan, polistiren ve polivinil-klorür esaslıdır. Bu pay içerisinde toplam poliüretan köpük tüketimi ise %50'den fazladır. Son yıllarda ise polietilen ve polistiren polimerlerine göre polipropilen köpük malzemesinin kullanımı artmaktadır. Bu malzemeler daha yüksek darbe direnci, yüksek ergime sıcaklığı ve daha iyi termal kararlılık göstermektedir [28]. Şekil 3.1'de polipropilen köpüğün hücre yapısı görülmektedir.



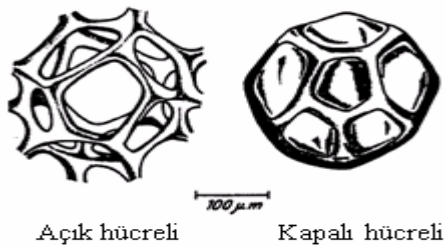
Şekil 3.1. Enjeksiyon köpük yöntemiyle üretilen dallanmış polipropilen köpüğün hücre yapısı [28]

3.1.1. Polimer köpüklerin sınıflandırılması

Polimerik köpükler, polimer matris malzemesine, hücre morfolojisine, camsı geçiş sıcaklığına, genleşme oranına ve köpük hücre boyutuna bağlı olarak 5 farklı grup altında sınıflandırılabilir. Polimer matris malzemesine göre, polimer köpükler termoplastikler ve termoset esaslı köpükler olmak üzere iki grupta incelenebilir.

Polistiren, polietilen ve polipropilen gibi poliolefinler, termoplastik köpük yapımında kullanılacak bazı termoplastik esaslı polimerlerdir. Poliüretan, fenol formaldehit, üre formaldehit ve epoksi ise termoset köpük yapımında kullanılacak termoset esaslı polimerlerdir [28].

Diğer sınıflandırma yolu ise, hücre geometrisini, hücre boyutunu ve hücre şeklini içeren köpüğün hücre morfolojisidir. Hücre morfolojisine göre polimerik köpükler, kapalı hücreli veya açık hücreli köpükler olmak üzere ikiye ayrılır. Köpüklenecek malzeme cinsi ve uygun köpüklenme işlemi ile açık hücreli veya kapalı hücreli yapının oluşumu kontrol edilebilir. Kapalı hücreli köpüklerde, her bir hücre komşu hücrelerden bağımsızdır. Açık hücreli köpüklerde ise, tüm hücreler birbirleri ile temas halindedir ve hücre duvarları bulunmaz. Şekil 3.2' de açık ve kapalı hücre yapıları görülmektedir. Kapalı hücreli köpük yapısı, paketlenme, ambalajlama ve destekleme malzemesi olarak kullanılır ve önemli derecede darbe kuvvetlerini sönmeme kabiliyetine sahiptir. Açık hücreli köpük yapısı ise çok etkileyici ses emme karakteristiğine sahiptir. Bununla birlikte, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında polimer esaslı köpük malzemelerin nem ve su tutma eğilimi vardır ve yüksek geçirgenliğe sahiptirler [28].



Şekil 3.2. Açık ve kapalı hücre yapıları [28]

Polimer köpükler, köpüğün kimyasal bileşenine, kristallenme derecesine ve çapraz bağlanma derecesine göre değişen camsı geçiş sıcaklığına bağlı olarak rijit, esnek veya yarı-rijit (yarı-esnek) olarak da sınıflandırılabilirler.

Camsı geçiş sıcaklığı, oda sıcaklığının altında ise esnek köpükler, camsı geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının üstünde ise rijit köpükler olarak adlandırılır. Hem yoğunluk hem de fonksiyonellik açısından bu iki sınıf arasında yer alan köpüklere de yarı rijit köpükler adı verilir. Rijit köpükler, oldukça yüksek mekanik dayanım istenen yapısal uygulamalarda kullanılır ve bu yüzden yüksek hacimsel yoğunluk istenir. Esnek köpükler, düşük hacimsel yoğunluğuna sahiptirler ve termal, ses yalıtımı, mobilya, paketleme, araç koltuklarında, destekleme malzemesi olarak değişik alanlarda kullanılırlar.

Polimerik köpükler, genişleme oranı esas alınarak üç farklı şekilde sınıflandırılabilir;

- a) Yüksek yoğunluklu köpükler,
- b) Orta yoğunluklu köpükler,
- c) Düşük yoğunluklu köpükler,

Bu üç farklı yoğunlukla köpüklenen plastikler yaklaşık $1,6 \text{ kg/m}^3$ den 833 kg/m^3 ' e kadar geniş bir aralıkta hacimsel yoğunluğuna sahiptirler. Yüksek yoğunluklu köpük malzemelerde yoğunluk 240 kg/m^3 civarında kabul edilirken, düşük yoğunluklu köpük malzemelerde yoğunluk 240 kg/m^3 den daha düşük olduğu kabul edilir. Yüksek yoğunluklu köpük malzemeler, orijinal köpüksüz polimerlere göre yaklaşık %75-%90 yoğunluğa sahip köpükler olarak tanımlanır. Yani orijinal polimer malzemenin ağırlığını %10 ile %25 oranında azaltmaktadır.

Düşük yoğunluklu köpük malzemeler ise, orijinal köpüksüz polimerlere göre yaklaşık olarak %10-%20 yoğunluğa sahip köpükler olarak tanımlanır. Yani düşük yoğunluklu polimer köpükler, orijinal malzemenin ağırlığını %80 ile %90 oranında azaltmaktadır. Ayrıca, köpük yoğunluğuna ek olarak, hücrelerin boyutu ve dağılımı bitmiş köpük ürünün son özelliklerini de etkilemektedir.

Son olarak polimer köpükler; köpük hücre boyutlarına göre 4 farklı şekilde sınıflandırılabilir.

- a) Makro-hücreli (geleneksel) ($>100\mu\text{m}$),
- b) Mikro-hücreli ($1-100\mu\text{m}$),
- c) Mikro-hücreli ($0,1-10\mu\text{m}$),
- d) Nano-hücreli ($0,1-100\text{nm}$),

Geleneksel ekstrüzyon prosesi ile üretilen köpükler, 100 mikrondan daha geniş hücrelere ve 10^6 hücre/ cm^3 den daha düşük hücre yoğunluğuna ve geniş hücre boyutu dağılımına sahiptirler. Geniş hücre boyutu ve homojen olmayan hücre yapısı nedeniyle geleneksel polimer köpükler oldukça zayıf mekaniksel özelliklere sahiptirler. Ancak, geleneksel köpüklerin bir üstünlüğü, genişleme oranının yüksek olmasıdır. Mikro-hücreli köpük malzemeler 10^9-10^{15} hücre/ cm^3 hücre yoğunluğuna sahiptirler. Orijinal polimer malzeme ile karşılaştırıldığında; yüksek dayanım/ağırlık oranına, yüksek darbe dayanımına, artan tokluğa, uzun süreli yorulma ömrüne, artan ısı kararlılığına ve azalan elektriksel ve ısısal yalıtım özellikleri gibi üstün özelliklere sahiptirler [28].

3.1.2. Polistiren köpük

Polimer köpük malzemeler arasında polistiren köpük en yaygın olarak kullanılanıdır. Polistiren, mühendislik dolgusu olarak ilk defa, 1965 yılında Norveç'te kaldırım inşaatı sırasında yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu tecrübeden polistirenin kalın küteller halinde yol dolgusu inşaatında kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır. Genleşmiş polistiren ilk kez Oslo yakınındaki Flonn'da (Norveç), 1,5 m yüksekliğinde olan ve üzerinde oturmaların 30 yılı aşkın süredir devam ettiği yolun tekrar yapımında kullanılmıştır. 1980'e kadar, Norveç'te yapılan 25 dolgu inşaatında 35000 m^3 polistiren malzeme kullanılmıştır. Polistiren, Norveç ve İsveç'te bu şekilde kullanılmaya devam etmektedir [29].

3.1.3. Polistiren köpüğün üretimi

Polistiren köpük; genişmiş polistiren köpük ve ekstrüde polistiren köpük olmak üzere iki tür imal edilmektedir. Polistiren köpüğü üretmek için; stiren monomer taneleri (genleşme köpüğü içeren), kuru buhar kürü yardımıyla orijinal hacimlerinin 40 katına kadar çıkarılmaktadır. Taneler daha sonra olgunlaşmaya bırakılmaktadır. Genleşmiş polistireni elde etmek için taneler kalıba dökülüp, daha fazla buhar kürü uygulanmakta ve istenen şekle gelmesi için eritilmektedir. Ekstrüde polistiren ise köpüklü malzemenin kalıba dökülmesinden sonra malzemeye basınç uygulanması yoluyla elde edilmektedir. Üretim metotlarındaki farklılık nedeniyle, bu iki malzeme fiziksel ve mekanik açıdan birbirinden farklıdır. En son kalıba konulma işleminden sonraki iki güne kadar polistiren malzemeler nihai dayanımlarına ulaşamazlar.

Polistiren köpük, fabrika çıktısı bloklar olarak temin edilebilir. Köpüğü yerinde dökmek teknik olarak mümkün değildir. Ekstrüde polistiren üretmek için gerekli işlem sonucunda 10-12 cm kalınlığında levhalar üretilir. Bu çeşit polistiren köpüğün dezavantajları; gerekenden fazla yoğunluğa sahip olması, yüksek üretim maliyeti ve büyük bloklar yerine kâğıt levhalar şeklinde üretilmesidir. Bu faktörler toplam maliyeti arttırmaktadır. Genleşmiş polistiren; daha düşük maliyette, amaca uygun olarak büyük bloklar halinde ve dayanım/yoğunluk oranının gerektirdiği şekilde üretilebilir. Aynı birim hacim ağırlığa sahip ekstrüde polistiren köpüğün birim maliyeti, genişmiş polistiren köpüğün yaklaşık iki katıdır [29].

3.1.4. Polistiren köpüğün kullanım alanları

Genleşmiş polistiren köpüğün uygulama alanları ve yaklaşık olarak ilk kullanılmaya başlandıkları tarihler incelenmiştir. Genleşmiş polistiren' den sonra en yaygın olarak kullanılan ekstrüde polistirenin de alternatif olarak kullanılabileceği durumlar belirtilmiştir.

Isı yalıtımı: 1960'lı yıllarda uygulanmaya başlanmıştır. Pratikte genişmiş polistiren ve ekstrüde polistirenin ikisinin de kullanıldığı tek alandır. Hücreler içerisinde tutulan büyük hacimli gaz (yaklaşık % 98), önemli ölçüde ısı yalıtımı sağlar.

Hafif dolgu malzemesi: 1970'li yıllarda uygulanmaya başlanmıştır. Genleşmiş polistiren yaklaşık 0.10 KN/m^3 gibi düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bu normal zemin malzemelerinden %1 daha düşüktür. Bu yüzden çok hafif dolgu malzemesidir. Düşük yoğunluğuna rağmen dayanımı ve sertliği sayesinde motorlu araçları, trenleri, uçakları ve hatta hafif yüklenmiş yapıları destekleyebilir.

Sıkışabilme özelliği: 1980'li yıllarda bu özellik kullanılmıştır. Rijit dayanma yapılarında tutulan zeminde deformasyona müsaade ederek ve kayma direncini harekete geçirerek, gelecek yatay etkiyi azaltmada, maden bölgeleri gibi basınç zorlamalarına maruz elemanlara gelecek yatay etkiyi azaltmada, şişebilen veya donan zeminlerden gelebilecek hacim artışının yapıya olumsuz etkisini sıkıştırarak engellemede, temel elemanlarının altında ve yanında şişebilen zeminlerden gelecek basınçları azaltmada, boruların, menfezlerin ve küçük çaplı tünellerin üstünde veya altında düşey basınçları zeminde kemerlenme oluşturarak azaltmada kullanılır.

Yapı elemanı: 1990'lı yıllar ile yapı elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Donatılı zemin duvarlarda cephe elemanı olarak ve yerinde dökme betonarme duvarlarda kalıp olarak genleşmiş polistiren ve ekstrüde polistiren ürünleri kullanılmaktadır [29].

3.1.5. Polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri

Polistirenin, şüphesiz ki en büyük avantajı düşük birim hacim ağırlığa sahip olmasıdır. Normalde $0,20 \text{ KN/m}^3$ birim hacim ağırlığında üretilir, fakat su miktarında zamanla artış olacağını hesaba katarsak, oturma ve stabilite problemleri için $0,98 \text{ KN/m}^3$ değeri uygun olur. Bu durum genleşmiş polistiren bloklarının sahada taşınmasını kolaylaştırır. Bir kamyonu bir defada ortalama 100 m^3 yükleme yapılabilir. Taşımada limit, yük değil hacimdir. Genleşmiş ve ekstrüde polistirenin, tek eksenli basınç altında gösterdikleri davranışlar birbirinden çok farklıdır. Genleşmiş polistiren % 1-2 boy değiştirmeye kadar (akma başlangıcı), lineer elastik malzeme gibi davranır. Daha sonra, uygulanan basınç gerilmesinde oluşan küçük artışlar, büyük şekil değişikliklerinin meydana gelmesini sağlar.

Boyda meydana gelen % 10 kısalmadan sonra basınç dayanımında çok az bir artış meydana gelir. Ekstrüde polistiren de genişmiş polistiren gibi lineer elastik davranış gösterir. Deformasyon kontrollü testlerde, % 5 boy kısalması değeri civarında maksimum basınç dayanımına ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu maksimum gerilme, genellikle malzemenin karakteristik basınç dayanımı olarak alınır. Ekstrüde polistiren göçme anında gevrek davranış gösterir.

Norveç'te bir laboratuarda yapılan deneyler göstermiştir ki; polistiren, karakteristik basınç dayanımının % 80'i büyüklüğünde tekrarlı gerilmelere maruz bırakılsa bile, bundan sonra yine karakteristik basınç mukavemetini sağlamaktadır. Mühendislik amaçları için akmanın başladığı gerilme değeri daha önemlidir. Çünkü akma gerilmesi değeri azalırsa, onarılamayacak plastik şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Genelde akma gerilmesi değeri olarak, % 1 boy değişimi görülen andaki basınç gerilmesi alınabilir. Sabit yükler altında yapılan uzama deneylerinde uygulanan yükün artmasıyla uzamanın arttığı görülmüştür. Sonuçlar tekrarlı yükler akma gerilmesi değerinin altında gerilmeler oluşturdukça uzamanın olmadığını göstermiştir.

Polistiren; düşük poisson oranına sahip olduğundan, düşey yük altında çok az miktarda yanal deformasyon yapar. Polistiren malzemelerin birim hacim ağırlığının, karakteristik basınç dayanımı gibi diğer mühendislik özelliklerine doğrudan etkisi vardır. Polistiren, basınç dayanımına göre yüksek kayma dayanımı değerine sahiptir. Polistiren blokların kalıplanmış yüzeyi için genellikle sürtünme katsayısı olarak 0,5 değeri alınır, bu değer de 27° lik sürtünme açısına denk gelir. Kesilmiş veya kırılmış yüzeylerin sürtünme açısı daha büyük alınır. Polistiren malzemeler; çok düşük birim hacim ağırlıklarına rağmen, düşük su emme potansiyeline sahiptirler. Malzemeyi oluşturan taneler, kapalı hücreli yapıya sahiptirler ve bu nedenle su emmezler.

Sınırlı sayıda içten bağlanmış boşluklar, toplam hacimde küçük orana sahiptirler ve suyun dolması için yeterli olmamaktadırlar. Malzemenin geçirimsizliği düşüktür, fakat su malzemenin içine kılcal boşluklar yardımıyla sınırlı miktarda girebilir. Yapılan uzun süreli gözlemler; devamlı su seviyesinin altında kalan polistiren dolgularda, hacimce su emme değerinin % 9'a erişebileceğini göstermiştir. Periyodik olarak su

seviyesinin altında kalan polistiren dolgularda, hacimce su emme değeri % 4'e çıkmıştır. Su seviyesinin üstünde kalan polistiren dolgularda, kılcal yükseklik küçük olmaktadır (20 cm civarında). Kapiler doygun bölgenin üstünde kalan bölgede nem oranı hacimsel olarak % 1'i ancak geçmektedir. Yapılan çalışmalar su emme değerinin, dolgunun dayanımı ve sıkışabilirliği üzerindeki etkisinin çok az olduğunu göstermiştir [29]. Tablo 3.1' de polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri görülmektedir.

Tablo 3.1. Polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri [29]

ÖZELLİKLER	Genleşmiş Polistiren köpük	Ekstrude Polistiren Köpük
Basınç Dayanımı * (N/mm ²)	0,02-0,10	0,14-0,37
Basınç Dayanımını ** (N/mm ²)	0,07-0,19	0,25-0,67
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	0,15-0,30	0,28-0,55
Poisson Oranı (ν)	0-0,02	
Kayma Dayanımı (N/mm ²)	0,09-0,22	-
Bloklar Arası Sürtünme Açısı (Sürtünme Katsayısı)	27 ⁰ (μ=0,15)	
Hacimce Su Emme (%)	7 gün 2-3	1 yıl 3,5-5
		7 gün 0,05
		1 yıl 0,2
Kapiler Yükseklik (cm)	20	-
(*) % 1 Deformasyonda, (**) % 10 Deformasyonda		

3.1.6. Polistiren Köpüğün Kimyasal Özellikleri

Polistiren köpük, birçok malzemeye karşı kimyasal olarak dirençlidir. Buna rağmen, polistiren köpüğün yüzeyinin tahrip olması ve uzun sürede büzölmelerin oluşması gözlenebilir. Polistiren köpük; bakterilerin ve mantarların yol açacağı bozulmalara karşı hassas değildir, bu nedenle biyolojik bozulmaya uğramaz. Polistiren, hayvanlar açısından besin değerine sahip değildir, yanabilir bir malzemedir ve büyük hacimlerde oksijenin mevcut olduğu durumlarda tutuşunca aniden yanabilir. Yanmayı geciktirici katkı maddesi ile birleştirilirse, ani tutuşma ortadan kalkar. Ultraviyole ışınlara maruz kalması halinde, polistirenin rengi solar ve yüzeyi kırılğanlaşır [29].

3.2. Seramik Köpükler

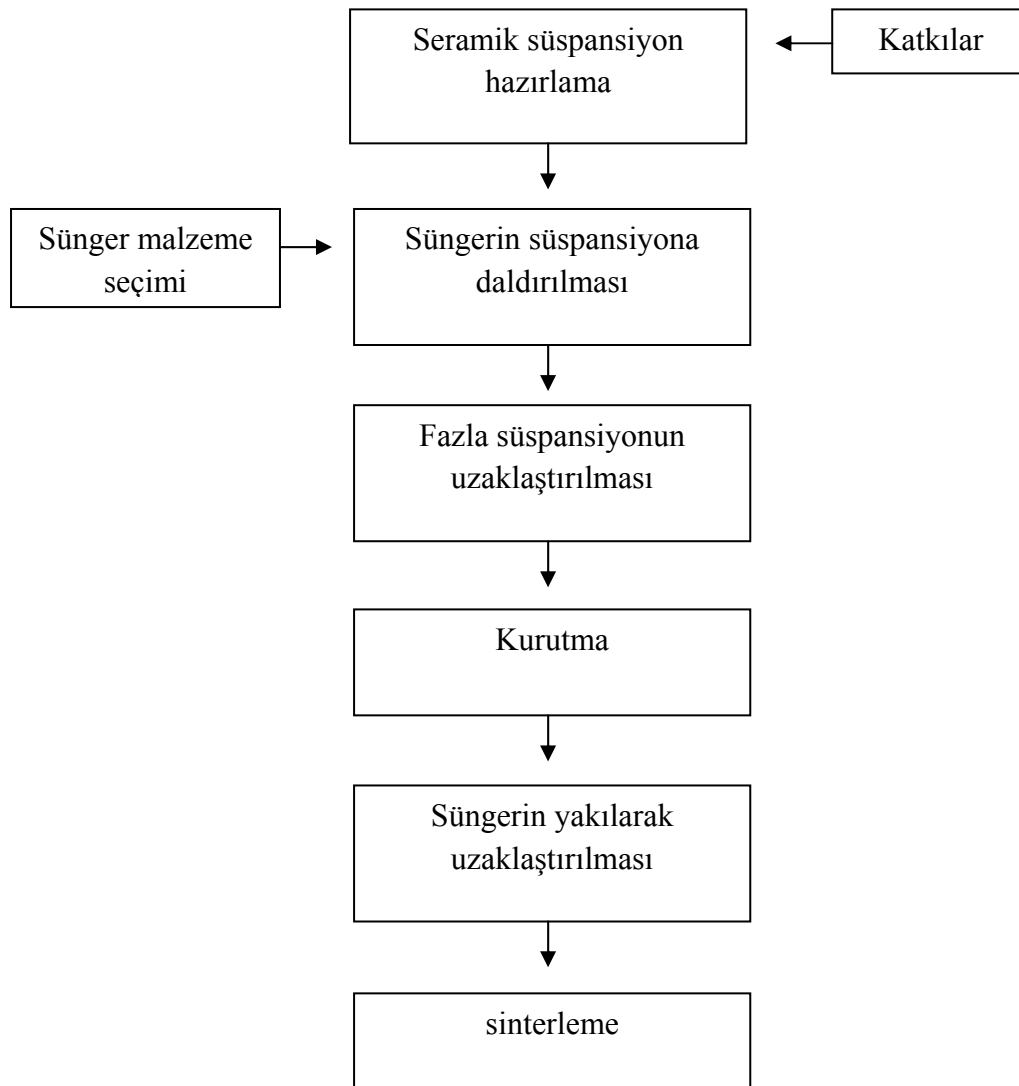
Gözenekli seramikler şekillerine göre iki genel kategoride sınıflandırılabilir. Bunlar bal peteği şekilli (honeycomb) seramikler ve köpük (foam) seramiklerdir. Köpük seramikler birbirleriyle temas halindeki açık boşlukların sürekli bir seramik bağ ile bağlanmasından oluşan üç boyutlu gözenekli malzemelerdir. Bal peteği şekilli seramikler ise presleme ya da ekstrüzyon yöntemiyle üretilen iki boyutlu gözenekli malzemelerdir. Köpük seramikler üretim yöntemlerine göre açık ya da kapalı gözenek yapılarında elde edilmektedir. Uygulama alanları da bu gözenek yapılarına bağlı olarak değişmektedir [30].

Köpük seramiklerin uygulama alanları:

- a) Açık gözenekli: Sıvı metal filtreleri, gaz filtreleri, katalizör taşıyıcısı, gözenekli yanma hücreleri, kemik yerini alan malzemeler, kompozit matriks yapısı.
- b) Kapalı gözenekli: Hafif sandviç panelleri, fırın yardımcı malzemeleri, termal yalıtım malzemeleri, ısıtıcı elemanlar, darbe adsorblayıcı.

Köpük seramik üretim yöntemlerinin başlıcaları; polimer sünger metodu (replikasyon yöntemi), direk köpükleştirme ve karbon preformlarının kaplanmasıdır.

Günümüzde köpük seramiklerin üretiminde en yaygın olarak kullanılan yöntem replikasyon prosesidir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Replikasyon prosesi akım şeması [30].

Köpük seramik malzeme üretiminde seramik malzemenin seçimi teknik ve ticari nedenlere dayanmaktadır. Kordiyerit, sahip olduğu düşük termal genleşme katsayısı, yeterli termal iletkenlik ve mükemmel termal şok dayanımından dolayı tercih edilmektedir. Düşük maliyetli olması, kolaylıkla elde edilebilmesi ve malzemeye dönüştürülebilmesi özellikle otomobil motorlarında katalizör destekleyici olarak kullanımında tatmin edici özellikler sağlamaktadır [30].

3.2.1. Seramik köpük filtreler

Seramik köpük filtreler üç boyutlu ağ içinde açık temiz boşluklara sahiptir. Filtreler sıvı gri dökme demir, küresel, pirinç, bronz ve alüminyum alaşımlarından metalik olmayan kalıntıların alınması için dizayn edilmiştir. Filtreler silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al_2O_3) esaslıdır. SiC ve özel alüminyum oksitlerin kullanımı, termal şoka dirençli olmasını ve sıvı metalin akışı sırasında boyutsal dengeyi sağlar.

Seramik köpük filtreleri kullanmanın avantajları aşağıda verilmiştir:

1. Sıkı, kısa ve direk birleştirme sistemi,
2. Metalin sessiz ve katlı akışı,
3. Modelin hazırlanması için geniş levha alanı,
4. Yüksek filtrasyon verimliliğine bağlı olarak metalik olmayan kalıntıların önemli miktarda azaltılması,
5. Döküm malzemesinin özelliklerinin geliştirilmesi,
6. Ufak birleştirme sistemleri sonucu akmanın artması ve ziyan olanların (hatalı dökümler) azalmasına bağlı olarak döküm maliyetinin azalması,
7. İşlenebilirliğe bağlı olarak işleme maliyetinin azalması, işleme zamanının kısılması ve aletlerin aşınmasının geciktirilmesi.

Metal ergitmede kaçınılmaz olarak istenmeyen cüruf ve metalik olmayan kalıntılar üretilir. Döküm boyunca bu malzemeler sıvı metalin içinde bir şekilde kalarak dökümde kalıntılara sebep olurlar.

Bu kalıntılar döküm hatalarına sebep olarak, dökümün kalitesini şu üç şekilde azaltır:

- 1) Mekanik özellikler
- 2) İşlenebilirlik
- 3) Yüzey bitirme

Dökümde görülen kusurlar parçayı hurda haline bile götürebilir. Hurda oranlarını azaltmanın anahtarı bu kalıntıların döküm kalıbına girmeden alınmalarıdır [31].

3.2.2. Cam köpükler

Cam köpük teknolojisinde, cam bünye ile saf karbon içeren bileşim cam yumuşayınca kadar oksijen ortamında ısıtılır. Saf karbon (örneğin kömür), oksijen ile yanma reaksiyonu (denklem 3.1) gerçekleştirir [32-34].

Reaksiyon sonucu gaz çıkışı başlayınca ürün tamamen kapalı cam hücrelerden oluşan bir köpük haline gelir [32-34].



Cam köpüğün içerdiği çok sayıda ince porlar genişleyerek kapalı gözenekler oluştururlar [33].

Cam köpük üretimlerinin tümünde toz metotları kullanılır. Toz haline getirilmiş cam ve bazı gözenek yapıcı katkı maddeleri karıştırılarak yüksek sıcaklarda sinterlenir. Bu katkı maddeleri bünyede por yapıcı maddelerdir.

Sinterleme sıcaklığı cam köpük üretiminde önemli parametredir. Sinterleme sıcaklığında reaksiyon veren katkı maddeleri kullanılır. Cam bünye içerisinden gaz çıkışı gerçekleştirilebilmesi ve sinterleme sıcaklığında gazın bünyede sıkışmaması için camın yumuşaması gerekir.

Köpük yapıcı katkı maddeleri; kömür, antrasit, kül, grafit ve silisyum karbür gibi karbon içeren malzemeleri kapsar [35].

Cam köpük tamamen atık camlara minimum seviyede saf katkılar ilavesiyle üretilebilir. Bu nedenle atıkların yeniden işlenebilirliği açısından da endüstride önemli bir yer oluşturur [32-33].

Cam köpük bir yalıtım malzemesinde aranabilecek; buhar geçirmezlik, su geçirmezlik, yanmazlık, alev geçirmezlik, haşarattan etkilenmezlik, kimyasal etkenlere dayanıklılık, işlenebilirlik, hafiflik ve yüksek ısı tutuculuk gibi birçok

önemli özelliğe sahiptir. Ayrıca dikkat çeken mekanik ve termal özellikleri vardır [32-33,35]. Şekil 3.4’ de çeşitli cam köpük malzemelerin uygulama alanları görülmektedir.

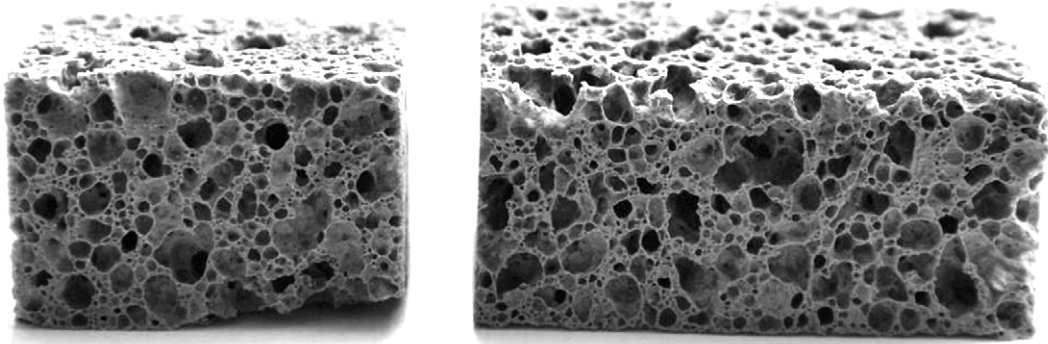


Şekil 3.4. Çeşitli cam köpük malzemeler [36]

3.2.3. Uçucu kül kullanımıyla cam köpük üretimi

Cam kırığı ve uçucu kül karışımlarına köpük yapıcı olarak CaCO_3 katılarak cam köpüklerin üretilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

% 20 kül-% 80 atık cam karışımına köpük yapıcı olarak % 1-5 dolomit ve % 1-5 kalsit ilavesi ile 10 farklı numune hazırlanarak kuru pres ile şekillendirilmiş ve 750-950 °C sıcaklık aralığında sinterlenmiştir. Üretilen numunelere çeşitli testler yapılmıştır. %80 cam kırığı %20 uçucu kül ilavesi ile hazırlanan karışımlara %1-2 kalsit ilavesi ile en iyi köpüklenmenin ve basma mukavemetinin elde edildiği (2,40-2,80 Mpa) tespit edilmiştir [37]. (Şekil 3.5)



Şekil 3.5. uçucu kül katkılı cam köpük malzeme [37]

Cam köpüklerin üretiminde atıkların sağladığı dayanıklılık ve yeniden kullanım avantajının araştırıldığı başka bir çalışmada atık cam tozuna yaklaşık olarak % 50 SiC içeren atık seramik parlatma tozları ilave edilmiştir. Çalışmada pencere camı atıklarına % 5 , % 7,5 , % 12,5 ve % 17,5 oranlarında SiC içeren atık parlatma tozlarının ilave edilerek hazırlanan karışımlardan üretilen numuneler 950 °C’de sinterlenmiştir. En iyi köpükleşmenin görüldüğü % 12,5 SiC içeren atık parlatma tozu katkılı karışımlarda daha iyi köpükleşmeyi sağlamak amacıyla MnO₂ ilave edilerek çalışma tekrarlanmıştır. MnO₂/SiC oranı 1/5 ve 1/3 olarak uygulanmış ve sonuçta MnO₂ ilavesi ile daha fazla köpük oluşumunun yanı sıra yüksek dayanıklılık ve homojen köpük oluşumu sağlamıştır [38].

3.3. Yalıtım Malzemesi Olarak Köpük Kullanımı

Yalıtım kelimesi literatürde ayırmak, tecrit etmek, yalnız bırakılmak karşılıklarını bulurken, yalıtım malzemeleri açısından sıcak ve soğuğu kötü ileten maddeler anlamına gelmektedir.

Her iki tanımlama da isabetli olmakla beraber, bu sektördeki malzemeleri daha ayrıntılı ve birbirinden ayırt edici kesin tariflere ihtiyaç vardır.

Yapıların ve sanayi işletmelerindeki tesislerin yalıtımları temel olarak birbirlerinden bina yalıtımları, teknik tesisat yalıtımları ve sanayi tesislerinin yalıtımları olmak üzere ayrılır. Bina yalıtımları genel olarak çatı-duvar veya döşeme yalıtımlarıdır.

Teknik tesisat yalıtımları ısıtma tesisatının ve sıhhi tesisatın (örneğin, temiz ve pis su tesisatının veya klima tesisatının) yalıtımıdır. Sanayi tesisatının yalıtımları ise örneğin yiyecek endüstrisinde soğutma tesisatının, kimya endüstrisinde boruların ve elektrik santrallerinde boru, kazan, elektro filtre gibi tesisatın yalıtımıdır.

Bu yalıtım amaçları için kullanılan genel malzemeler şunlardır:

- a) Mineral lifli malzemeler (camyünü, taşyünü, seramik yünü),
- b) Sert plastik köpükler (polistren, poliüretan, fenol v.s köpükler),
- c) Yumuşak köpükler (flex malzemeler),
- d) Cam köpüğü, kalsiyum silikat malzemelerdir.

Bu gruplardaki malzemeler ve grupların kendileri de kullanılabilme sıcaklığı, ısı iletkenlik, yanma durumu ve buhar difüzyonuna karşı gösterdikleri dirençlere göre birbirinden ayrılırlar [39].

Cam köpüğü erimiş saf cam ve karbonun köpük halinde getirilmesi ile üretilen ısı yalıtım malzemesidir. Yapılarda, temelden çatıya kadar tüm ısı yalıtım uygulamaları için geliştirilmiş olan cam köpük ısı yalıtım panelleri, ısı köprülerini engelleyerek maksimum enerji korunumu sağlar. Cam köpük ısı yalıtım plakaları, yapıya sıcak bitüm veya soğuk yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılır. Ayrıca mekanik sabitlemeye gerek duyulmaz. Şekil 3.6’ da çeşitli cam köpük yalıtım malzemeleri görülmektedir.



Şekil 3.6. Çeşitli cam köpük yalıtım malzemeleri [36,40]

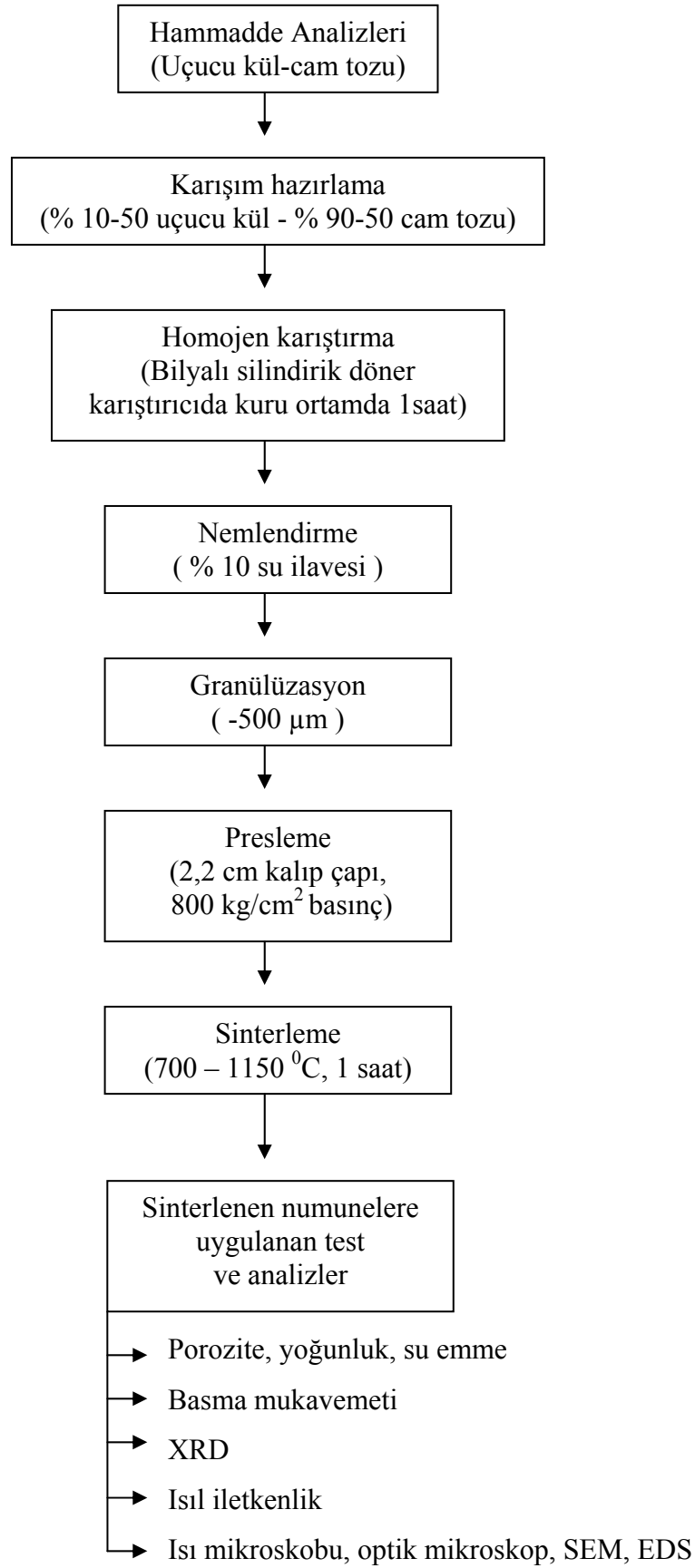
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deney Programı

Bu tez çalışmasında uçucu kül katkılı camsı köpük malzeme üretim imkanları araştırılmıştır. Çalışmada herhangi bir köpük yapıcı malzeme kullanılmadan uçucu külün içerisindeki yanmamış karbonların gözenek oluşumuna katkısı ile camsı köpüklerin üretilebilirliği incelenmiştir. Çalışma süresince öncelikle hammaddelere, daha sonrada üretilen cam köpük malzemelere çeşitli testler ve karakterizasyonlar yapılarak yalıtım malzemesine uygunluğu irdelenmiştir. Deneysel çalışmalar ile ilgili akım şeması Şekil 4.1. de verilmiştir.

4.2. Hammadde Karakterizasyonu

Çalışmada atık cam kırığı tozu ve Kütahya Seyitömer Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. Termik santral uçucu külü toz halinde, atık camlar ise büyük parçalar halinde temin edilmiştir. Sakarya organize sanayi bölgesinden alınan atık durumdaki pencere camları Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan halkalı kırıcıda kırılmış ve elenmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalar akım şeması.

4.2.1. X-ışınları floresans analizi

Çalışmada kullanılan uçucu külün ve cam tozunun x-ışınları floresans (XRF) analizi TÜBİTAK MAM Malzeme laboratuvarında bulunan XRF cihazında (PHILIPS PW2404) yapılmıştır.

XRF, maddelerin element bileşimini belirlemede kullanılan önemli yöntemlerden biridir. XRF ile analizde; atom X ışınları gibi yüksek enerjili bir radyasyonla uyarılır. 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 floresans ışımaya adı verilir. Elementlerin verdiği bu ışımaların dalga boyu her element için farklı ve ayırtmandır. Diğer bir ifadeyle bu ışımalar o elementin parmak izi gibidir. Işımanın dalga boyunun saptanmasıyla elementin cinsi (nitel), saptanan bu ışının yoğunluğunun ölçülmesiyle element konsantrasyonu (nicel) belirlenmektedir [41].

4.2.2. Diferansiyel termal analiz

Kullanılan uçucu külün ve cam tozunun aktivitelerinin belirlenmesi için diferansiyel termal analizleri (DTA) (SEIKO Exstar 6000) yapılmıştır. Uçucu kül ve cam tozunun DTA analizleri, 5°C/dak ısıtma hızıyla statik ortamda oda sıcaklığından 900°C ye ısıtma ile gerçekleştirilmiştir.

DTA analizinde numune ve termal olarak inert olan referans maddeye aynı sıcaklık programı uygulanır. İkisi arasındaki fark, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Bu iki madde bir arada ısıtılır. Sıcaklık düzgün bir şekilde arttırılır. Isının absorblandığı veya açığa çıktığı her numuneye uygulanabilir. Fiziksel olarak absorpsiyon ve kristalizasyon olayı ekzotermik bir olaydır. Desorpsiyon, süblimleşme, erime ve buharlaşma olayları ise endotermiktir. Kimyasal olarak ise polimerleşme ve oksitlenme ekzotermik; bozunma, dehidrasyon ve indirgenme olayları ise endotermiktir [42].

4.2.3. Tane boyut analizi

Kullanılan uçucu kül ve cam tozunun tane boyut analizleri lazer tane boyutu analiz cihazında (Master Sizer X Ver. 1.2b) yapılmıştır.

4.2.4. Taramalı elektron mikroskobu analizi

Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu külün mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile (JEOL 6335F) gerçekleştirilmiştir.

4.2.5. X-ışınları difraksiyon analizi

Kullanılan uçucu kül ve cam tozu özelliklerinin belirlenmesi amacıyla x-ışınları difraksiyon (XRD) analizi (Shimadzu XRD 6000) yapılmıştır.

X-ışınları cihazı ile kısa dalga boyuna sahip x-ışınları, test edilerek numunenin üzerine gönderilir. Işın demetleri maddenin üç boyutlu kristal kafeslerinden difraksiyona uğrar. Her mineralin kristal yapısının değişik difraksiyonlar vermesi ile karşılaştırıldığında test edilen malzemenin hangi minerolojik yapıya sahip olduğu ortaya çıkar [42].

4.3. Numune Hazırlama

Çalışmada beş farklı uçucu kül-cam tozu karışımı hazırlanmış olup, bu karışımlar Tablo 4.1' de gösterilmiştir. Ayrıca uçucu kül ve cam kırığının köpükleşmeye ve gözenek oluşumuna etkilerinin incelenebilmesi amacıyla saf uçucu kül ve saf cam tozundan numuneler de hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar pres ile şekillendirilerek on farklı sıcaklıkta sinterlenmiştir.

Tablo 4.1. Hazırlanan bileşimler ve kodları (% ağırlıkça)

Numune kodları	Uçucu kül (%)	Cam tozu (%)
F	100	0
G	0	100
F1G	10	90
F2G	20	80
F3G	30	70
F4G	40	60
F5G	50	50

4.3.1. Harmanlama ve kalıplama

Çalışmada kullanılan hammaddeler Tablo 4.1' de verilen oranlarda, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Seramik laboratuvarında bulunan zirkon bilyeli silindirik döner karıştırıcıda kuru ortamda 1 saat harmanlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

4.3.2. Şekillendirme

Her bir karışıma % 10 oranında su ilavesi yapıldıktan sonra şekillendirmede kolaylık sağlaması için granüle edilmiştir. Granülasyon, nemlendirilen karışımların 500µm boyutundaki elekten iki kere geçirilmesi ile yapılmıştır. Ardından elektronik tartıda 0.001 hassasiyette 3 gramlık tartımlar hazırlanarak presleme işlemi için tozlar hazırlanmıştır. Presleme işlemi, TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Seramik Laboratuvarında bulunan 40 ton kapasiteli kuru preste (UZSELCHOZ TEKNİKA DKC-1671) gerçekleştirilmiştir.

Şekillendirmede 800 kg/cm² basınç uygulanmış ve 2,2 cm çapında kalıp kullanılarak silindirik numuneler üretilmiştir. Şekil 4.2' de şekillendirmede kullanılan pres ve kalıp görülmektedir.



Şekil 4.2. Şekillendirmede kullanılan pres ve kalıp görüntüsü

4.3.3 Sinterleme

Preslenen numuneler etüvde 100 °C 'de 24 saat kurutulduktan sonra, 700-1150 °C sıcaklık aralıklarında 1 saat süre ile elektrik ısıtmalı fırında (HEARAUS) 5°C/ dk'lık ısıtma hızı ile sinterlenmiş ve fırın içerisinde oda sıcaklığına soğutulmuştur.

4.4. Deney Numunelerine Uygulanan Testler

Sinterlenmiş numunelere çeşitli testler uygulanarak özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, toplu küçülme-büyüme, bulk yoğunluk, su emme, porozite, basma mukavemeti, ısıl mikroskop incelemesi, ısıl iletkenlik ölçümü, optik mikroskop incelemesi, SEM ve XRD analizleri yapılmıştır.

4.4.1. Toplu küçülme ve büyüme

Sinterlenen numunelerin % küçülme-büyüme ölçümleri (çap) aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır [43-44].

$$\% \text{ küçülme-büyüme} = [(d_0 - d_1) / d_0] \times 100 \quad (4.1)$$

d_0 : Presleme sonrası ölçülen numune çapı

d_1 : Sinterleme sonrası ölçülen numune çapı

4.4.2. Gözenek Miktarı ve Bulk Yoğunluk

Gözenek olarak adlandırılan, malzeme içindeki boşlukların termal ve mekanik özelliklere etkilerinin belirlenmesi için analizler gerçekleştirilmiştir.

Sinterlenen numuneler tartılıp (W_a) uygun bir kaba konulduktan sonra, numunelerin yarısına kadar su koyularak kaynama noktasına kadar ısıtılmış, kaynama başladığında numunelerin üstünü örtecek şekilde su ilavesi yapılmıştır. Beş dakika kaynadıktan sonra 24 saat soğumaya bırakılan numuneler, su içinde (W_b) ve fazla suyu bir kağıt yardımıyla alındıktan sonra havada (W_c) tartılmıştır. Bu tartımlar sonucu aşağıdaki denklemlere göre gözenek yüzdesi ve bulk yoğunluk bulunmuştur [43-44].

$$\% \text{ Gözenek (G)} = [(W_c - W_a) / (W_c - W_b)] \times 100 \quad (4.2)$$

$$\text{Bulk yoğunluk (d}_b\text{)} = [W_a / (W_c - W_b)] \times d_s \quad (4.3)$$

W_a : Kaynama öncesi numune ağırlığı

W_b : Yaş numne ağırlığı

W_c : Kuru numune ağırlığı

d_s : Suyun yoğunluğu

Kullanılan sıvının yoğunluğu d_s su için 1 gr/cm^3 alınmıştır. Burada bulunan gözenek miktarı, malzemenin içerdiği açık gözeneklerin toplamı, bulk yoğunluk ise numune ağırlığının tüm malzemenin hacmine bölümüdür.

Ayrıca üretilen bazı numunelerin porozite ölçümleri TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuvarlarında Civa Porozimetresi cihazı (Quantachrome Poremaster) ile gerçekleştirilmiştir.

4.4.3. Su emme

Sinterlenen numuneler uygun bir kaba konularak numunelerin tamamı su içinde kalacak şekilde, su ilave edilmiştir. 24 saat bu şekilde bekletilen numunelerin yüzeyleri kabaca kurulandıktan sonra yeniden tartılarak doygun ağırlıkları ölçülmüştür. Aşağıdaki denklem yardımıyla su emme miktarı hesaplanmıştır [43-44].

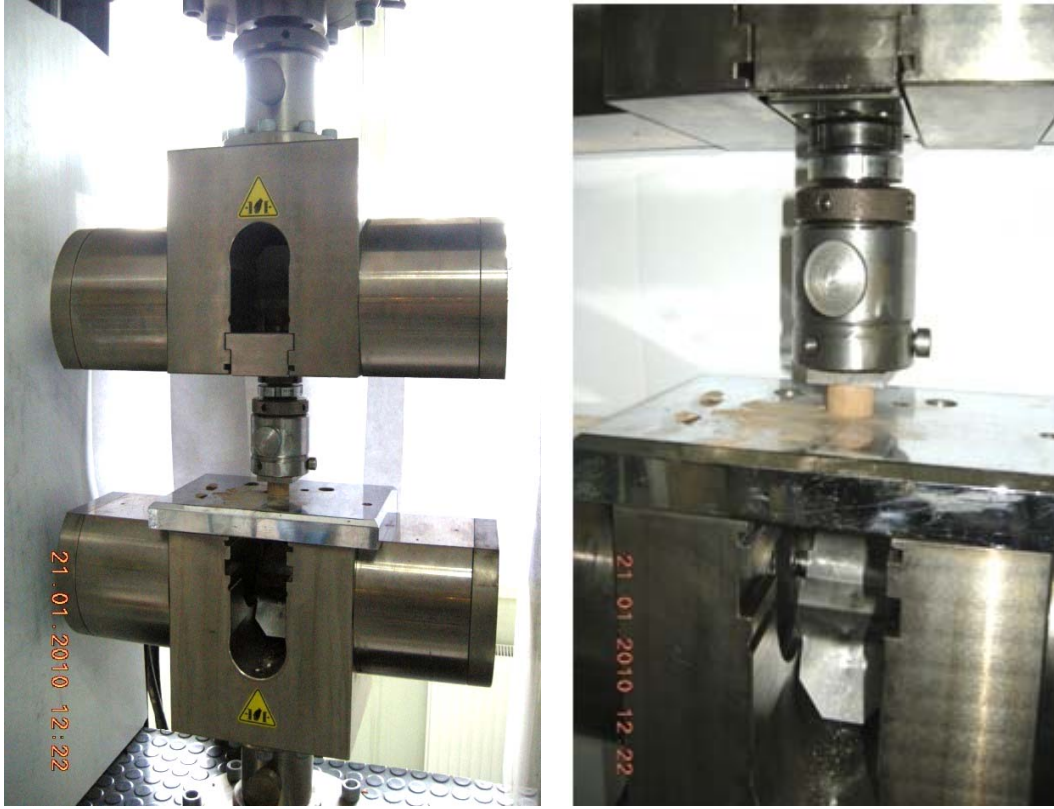
$$\% \text{Su Emme} = [(W_d - W_k) / W_k] \times 100 \quad (4.4.)$$

W_d : Yaş Numune ağırlığı

W_k : Kuru numune ağırlığı

4.4.4. Basma mukavemeti testi

Üretilen numunelerin oda sıcaklığında basma dayanımlarını tespit etmek için uygulanan bu testte öncelikle çap/boy oranı 2 olan özel numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler yüzey paralellliğini sağlamak amacıyla zımparalanmıştır. Hazırlanan numunelerin basma mukavemetlerinin ölçümü TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Mekanik Testler Laboratuvarında çekme-basma cihazında (ZWICK Z 250) yapılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Basma mukavemeti ölçüm cihazı görüntüsü

4.4.5. Isıl mikroskop incelemesi

Üretilen numunelerin sinterlenme sırasındaki davranışları, TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuvarlarında bulunan Isıl Mikroskop (Heating Microscope Misura 3.32) cihazı ile incelenmiştir.

4.4.6. Isıl iletkenlik ölçümü

Üretilen numunelerin yalıtım malzemeleri arasındaki yerini görebilmek amacıyla ısıl iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Üretilen numunelerin analizleri TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuvarında bulunan Isıl İletkenlik ölçüm cihazı (Laser Comp) ile gerçekleştirilmiştir.

4.4.7. Optik mikroskop incelemesi

Üretilen numunelerin gözenekli yapısının ve köpük oluşumlarının incelenmesi amacıyla optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Bu inceleme öncesi üretilen numuneler seramik kesici ile kesilerek hazırlanmıştır. Kesilen yüzeyler, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Laboratuvarında bulunan Optik Mikroskop (Nikon Eclipse L150/150A) ile incelenmiştir.

4.4.8. X-ışınları difraksiyon analizi

X-ray cihazı ile kısa dalga boyuna sahip x-ışınları, test edilerek numunenin üzerine gönderilir. Işın demetleri maddenin üç boyutlu kristal kafeslerinden difraksiyona uğrar. Her mineralin kristal yapısının değişik difraksiyonlar vermesi ile karşılaştırıldığında test edilen malzemenin hangi minerolojik yapıya sahip olduğu ortaya çıkar [42].

Üretilen numunelerin analizleri TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Laboratuvarında bulunan XRD cihazında (Shimadzu) gerçekleştirilmiştir.

4.4.9. Taramalı elektron mikroskobu ve enerji dispersif spektrometresi analizi

Elektron mikroskobu hammadde ve ürünlerin gözle görülmeyen kristal yapılarını inceleyerek mineral ve ürünlerin cinsi hakkında bilgi veren bir araçtır. SEM analizi ile numunede, tene boyutu, yüzey kabalığı, porozite, partikül tane dağılımı, malzeme homojenliği, ve kaplama kalınlığı belirlenebilir. Odaklanmış elektronlar numunenin yüzeyini tarar, tarama sonucunda oluşan sinyaller detektörler vasıtası ile tutulur. Taramalı elektron mikroskobu enerji dispersif spektrometresi analizi (EDS) ile kullanılarak elementel analizde yapılır. SEM' in çalışma prensibi; yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronların numune üzerine gönderilmesi ile elektronlar ile numune atomları arasında çeşitli etkileşimler olur [42].

Üretilen cam köpük malzemelerin gözenekli yüzeyleri SEM ile incelenmiş bazı örneklerde EDS analizi de yapılmıştır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

5.1. Hammadde Karakterizasyonu

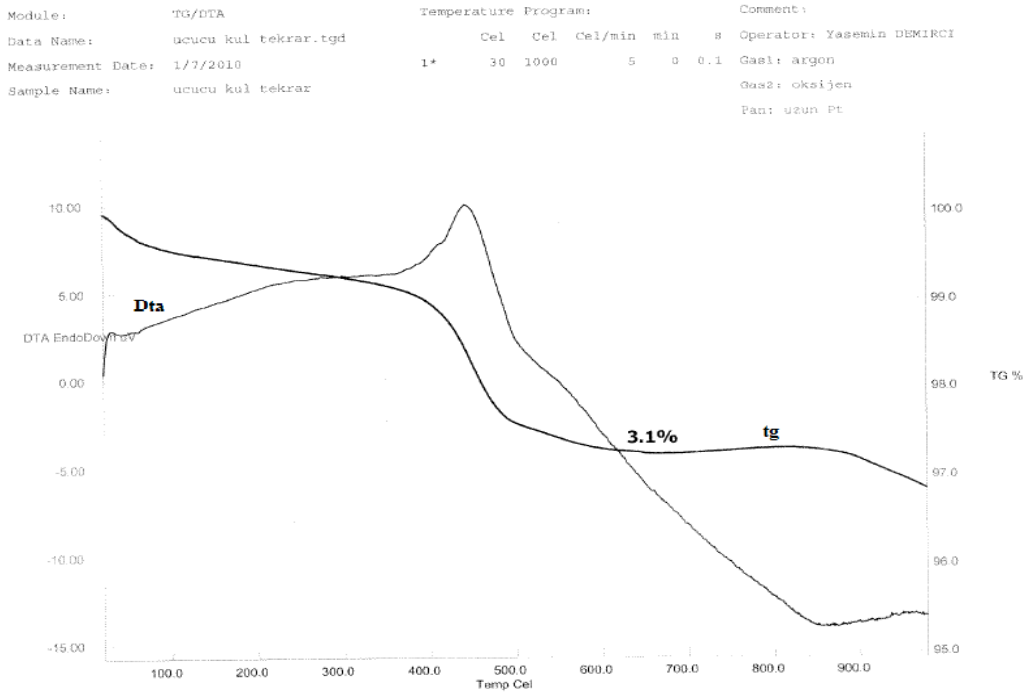
5.1.1. Uçucu kül

a) **Kimyasal analiz:** Deneysel çalışmalarda kullanılan Seyitömer termik santral atık uçucu külünün XRF ile yapılan kimyasal analizi Tablo 5.1’ de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi kullanılan uçucu külün $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriği % 84,78’ dir ve ASTM C 618 Standartlarına göre F sınıfı’dır (Bkz. Tablo 2.2).

Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan uçucu külün kimyasal analizi (% Ağırlıkça)

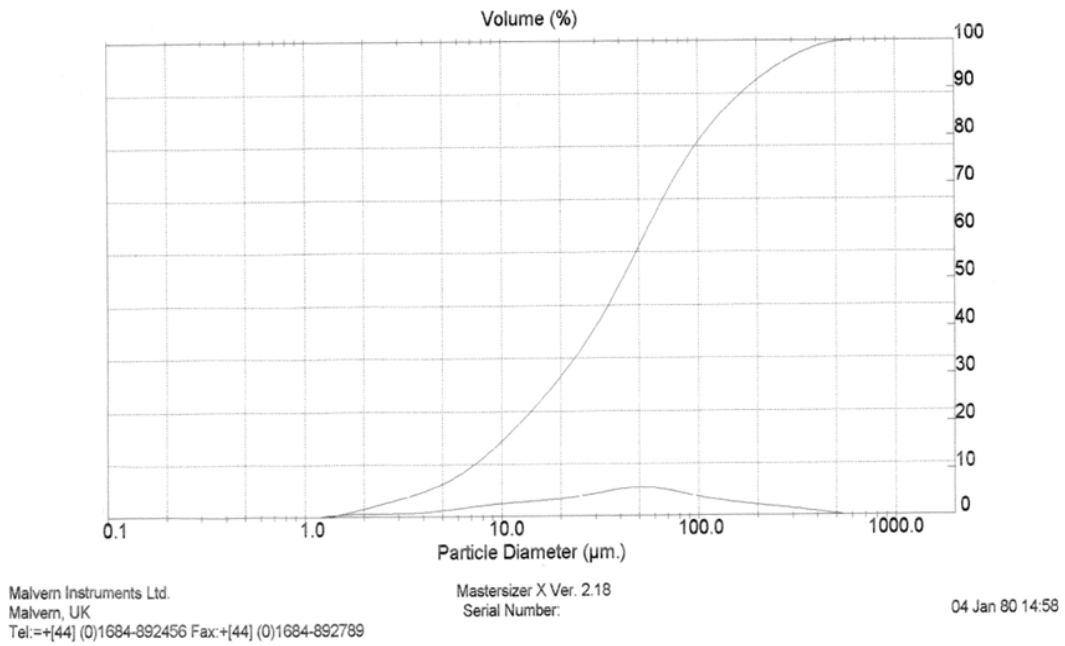
Oksit	Uçucu Kül
Na_2O	0,311
MgO	5,137
Al_2O_3	17,246
SiO_2	56,896
P_2O_5	0,128
Cl	0,028
K_2O	1,554
CaO	4,316
TiO_2	0,677
Fe_2O_3	10,628
SO_3	2,398
NiO	0,236
K.K	0.445

b) DTA analizi: Uçucu külün DTA analizinde 460 °C de ekzotermik pik görülmüştür (Şekil 5.1). Buna bağlı olarak aynı sıcaklıkta %3,1 lik ağırlık kaybı meydana gelmektedir. Bu ekzotermik pik, uçucu kül içerisindeki yanmamış karbonların reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir [45].



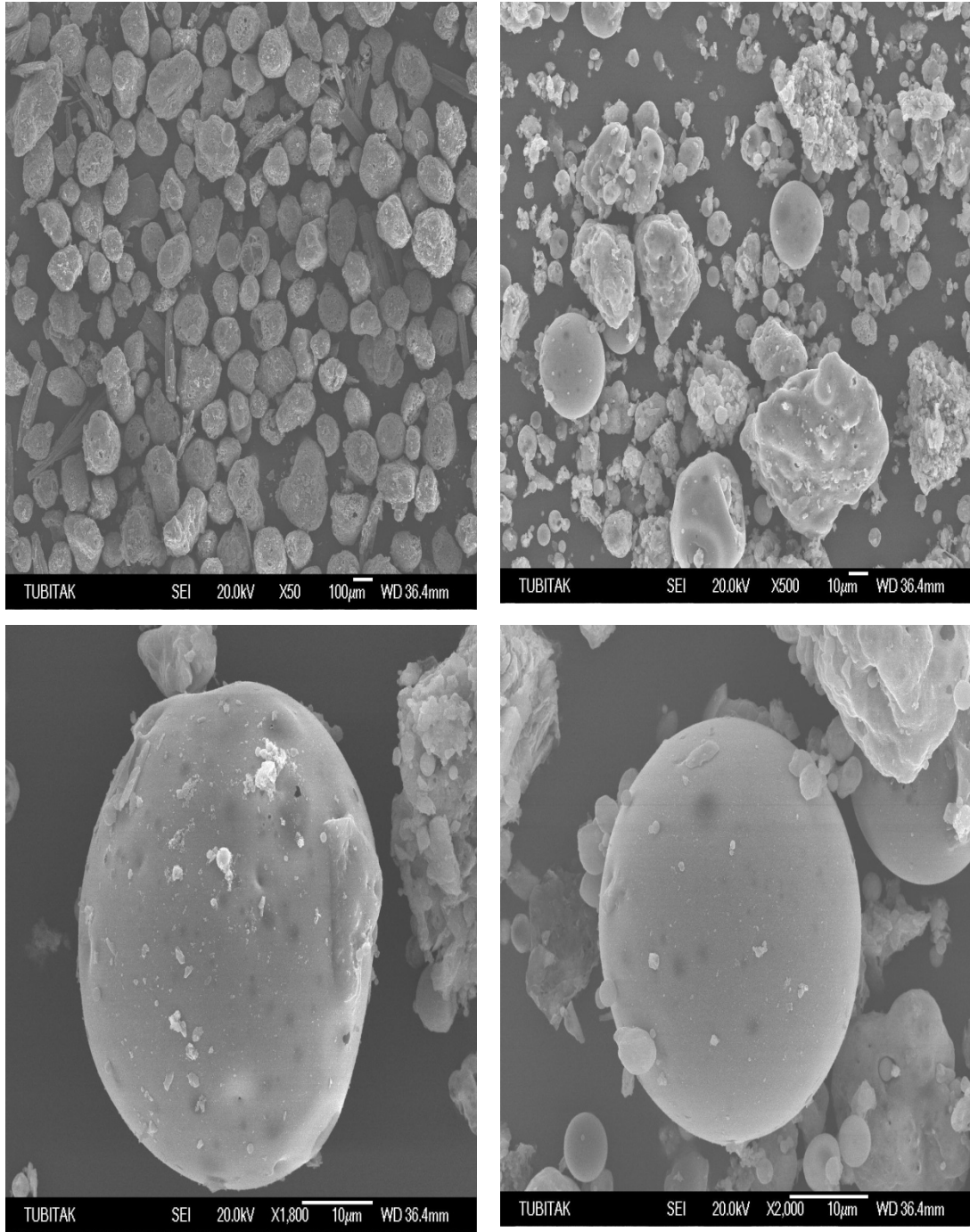
Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu külün DTA analizi

c) Tane boyut analizi: Deneylerde kullanılan uçucu külün yapılan ölçümler sonucunda tane boyutunun 10-100 µm aralığında olduğu belirlenmiş (Şekil 5.2) olup %50 sinin 41 µm altında olduğu görülmektedir.



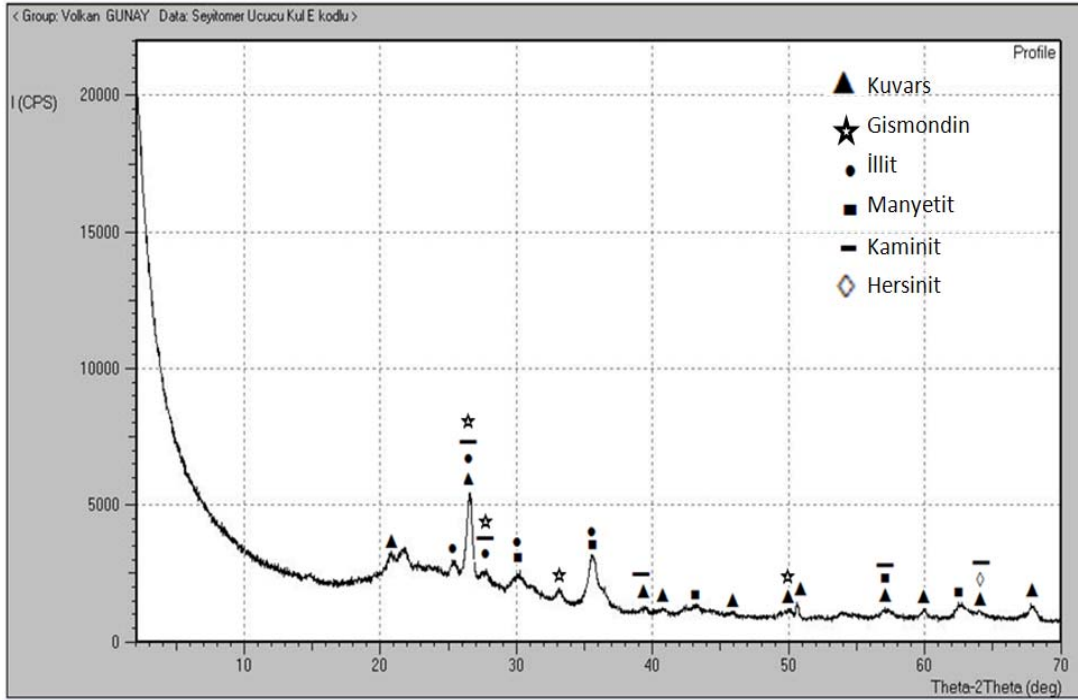
Şekil 5.2. Deneylerde kullanılan uçucu külün tane boyut analizi

d) SEM analizi: Kullanılan uçucu külün SEM ile tane yapısı incelendiğinde, tanelerin küresel ve köşeli aglomere tanelerden meydana geldikleri görülmüştür (Şekil 5.3). Genellikle termik santralin yakma sisteminin ve yakıt olarak kullanılan kömürün yapısına bağlı olarak uçucu küllerin küresel ve aglomere tane yapıları ve oranları değişiklik gösterebilmektedir [10-14].



Şekil 5.3. Kullanılan uçucu kül SEM görüntüleri

e) **XRD analizi:** Seyitömer termik santrali uçucu külünün XRD analizi Şekil 5.4' de, tespit edilen fazlar ve kart numaraları da Tablo 5.2' de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Kullanılan uçucu kül XRD sonucu.

Tablo 5.2. Uçucu kül XRD sonucunda belirlenen fazlar ve kullanılan simgeler.

Kristal Fazlar	Kart No	Simge
Kuvars (SiO_2)	46-1045	▲
İllit ($(\text{K,H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)	26-911	●
Manyetit (Fe_3O_4)	43-1491	■
Kaminit ($\text{Mg}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2$)	5-586	—
Hersinit (FeAl_2O_4)	46-1045	◇
Gismondin ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	39-359	★

Seyitömer termik santral uçucu külünde kuvars, illit, manyetit, kaminit, hersinit ve gismondin fazları tespit edilmiştir ve bu fazlar literatürle uyum göstermektedir [7,10,11,13].

5.1.2. Cam tozu

a) Kimyasal analiz: Deneysel çalışmalarda kullanılan cam tozunun kimyasal analiz sonuçları Tablo 5.3' te verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde deneysel

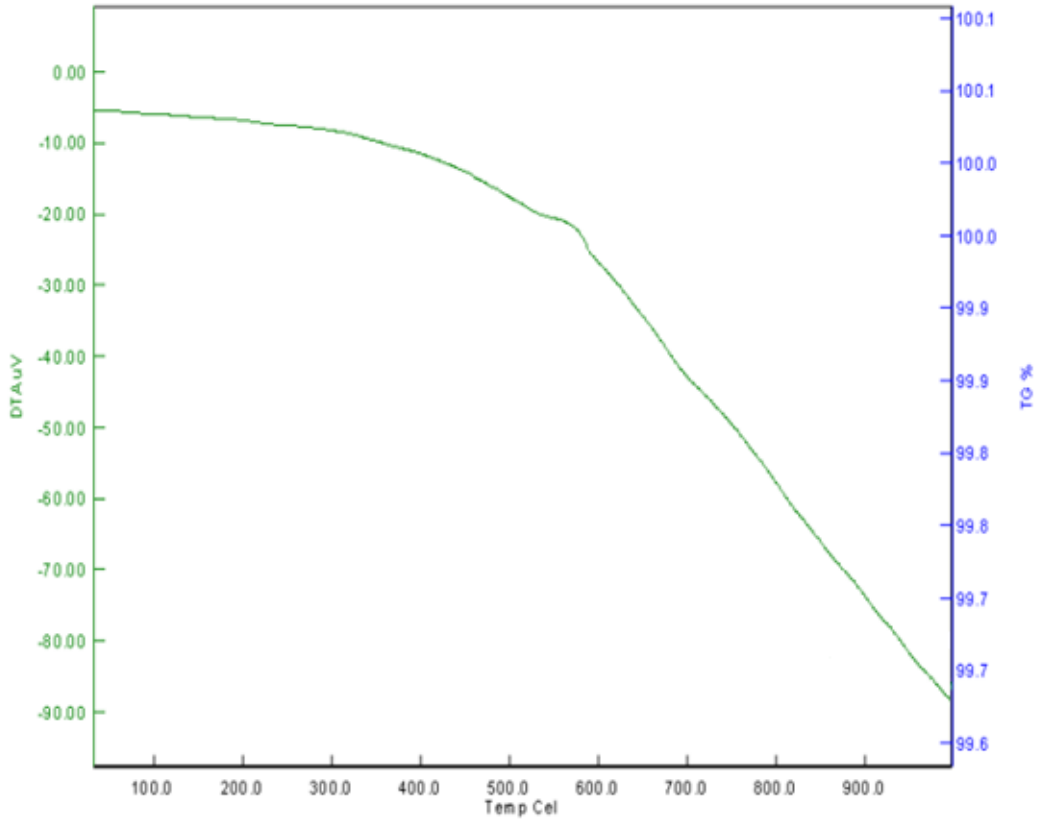
çalışmalarda kullanılan cam tozunun soda-kireç pencere camı olarak literatürle uyum sağladığı görülmektedir . Tüm dünyada üretilen camların %90 ı soda-kireç pencere camlarıdır. Bu camların en önemli avantajları; ucuz olması, kolay eritilebilmesi, ısıl şok mukavemeti ve kimyasal kararlılık gerektirmeyen hemen her yerde kullanılabilmesidir. Soda–kireç camlarının bileşimlerini genel olarak %73 SiO₂, % 6 CaO, % 4 MgO, %16 Na₂O oluşturmaktadır [46].

Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan cam tozunun kimyasal analizi (% Ağırlıkça)

Oksit	Cam Tozu
Na ₂ O	9,916
MgO	5,998
Al ₂ O ₃	1,515
SiO ₂	73,195
Cl	0,025
K ₂ O	0,108
CaO	8,590
TiO ₂	0,040
Fe ₂ O ₃	0,185
SO ₃	0,338
K.K	0,09

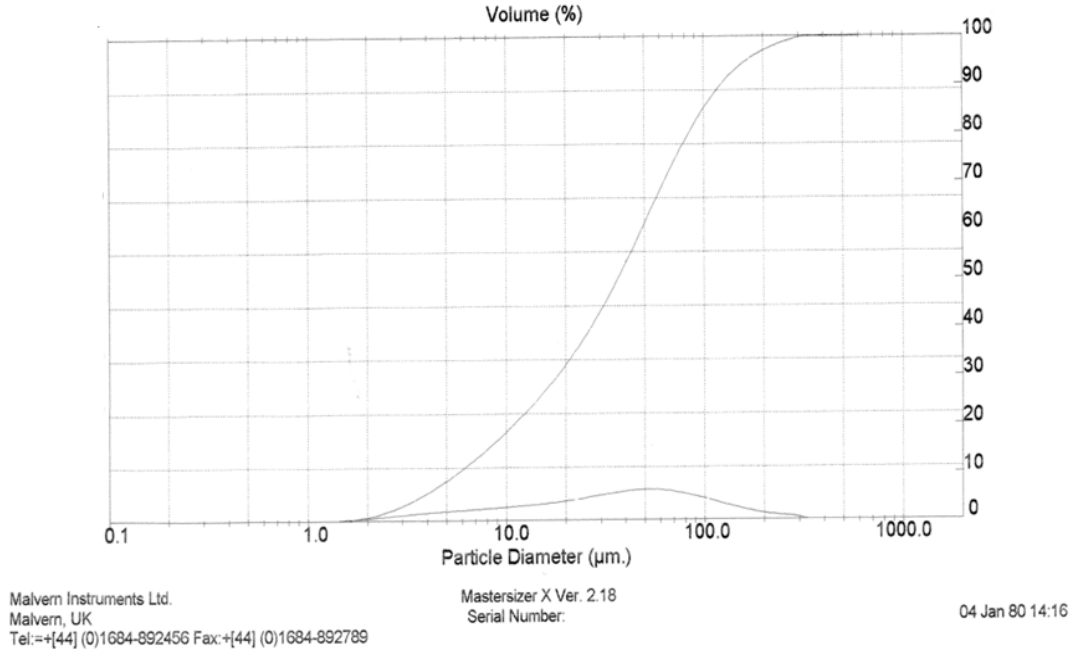
b) DTA analizi: Camlaşma özelliği olan malzemelerde cam geçiş sıcaklığı olarak bilinen sıcaklık değeri mevcuttur. Bu sıcaklık, sabit bir nokta olarak değil dönüşüm aralığı olarak ta tanımlanır. Malzeme yalnızca bu sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda cam özelliği taşır bu sıcaklıktaki viskozite çok yüksek olup yaklaşık 10 poise mertebesindedir .

Deneysel çalışmalarda kullanılan cam tozunun DTA analizi sonucunda cam geçiş sıcaklığının 550 °C olduğu görülmüştür (Şekil 5.5). Tespit edilen sıcaklık değeri literatürle uyumludur [47].



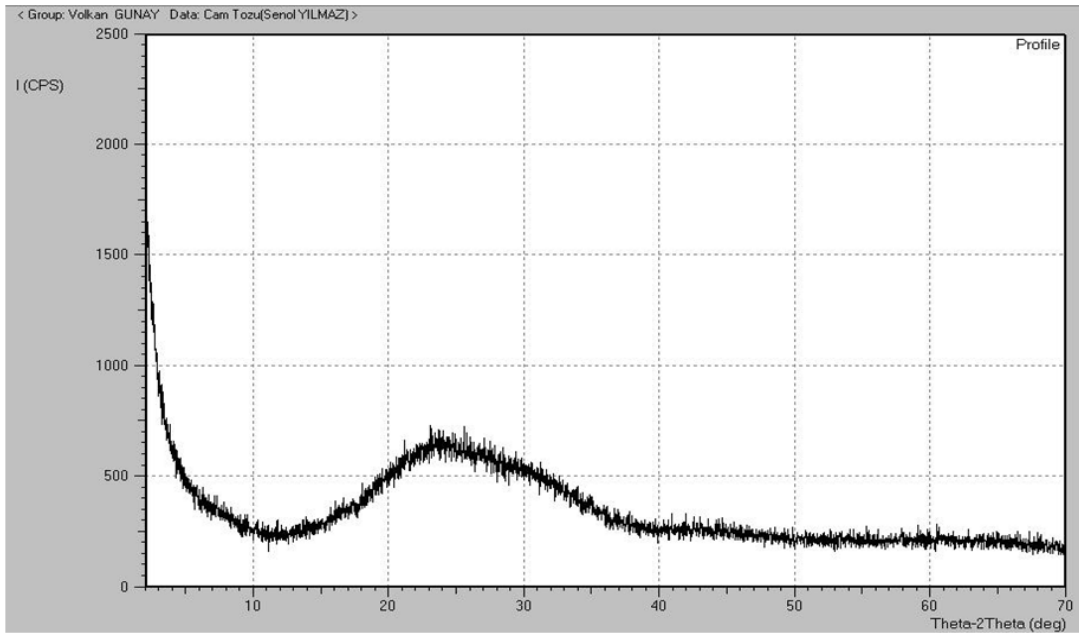
Şekil 5.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan cam tozunun DTA analizi

c) Tane boyut analizi: Deneylerde kullanılan cam tozunun tane boyut analizi sonucu Şekil 5.6' da verilmiştir. Şekilden, cam tozunun tane boyutunun 10-100 μm aralığında olduğu belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan cam tozunun %50 si 36 μm 'nin altındadır.



Şekil 5.6. Deneylerde kullanılan cam tozunun tane boyut analizi

d) XRD analizi: Cam tozu XRD sonucu Şekil 5.7' de verilmiş olup camsı amorf yapı tespit edilmiştir. Bu, klasik cam XRD analiz sonucudur ve literatürle uyum sağlamaktadır [47].



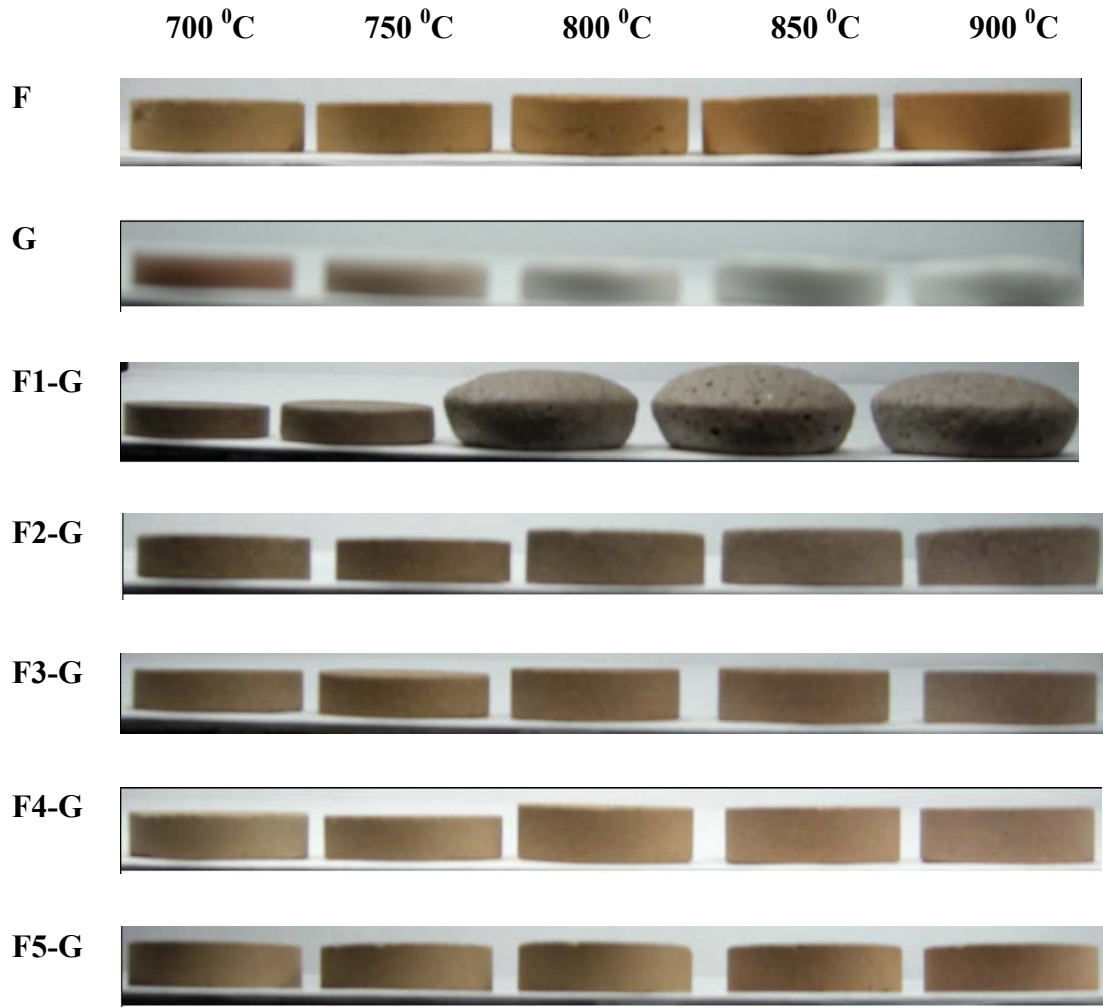
Şekil 5.7. Kullanılan cam tozunun XRD sonucu

5.2. % Şekil Değişimi, Gözenek Miktarı ve Bulk Yoğunluk

a) **% Şekil değişimi:** Deneyleerde kullanılan her bir bileşim 700 °C – 1150 °C sıcaklık aralığında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası numunelerin makro görüntüleri Şekil 5.8 ve 5.9’ da görülmektedir. Deneyleerde sinterlenen numunelerin % şekil değişimi her bir numunenin sinterleme öncesi ve sonrası elde edilen boyutlarının ortalama değeri olarak hesaplanmış ve Tablo 5.4’ da verilmiştir. Tablodaki değerlerden çizilen grafikte Şekil 5.10’ da gösterilmiştir.

Sinterleme sonrası numuneler incelendiğinde, sinterleme sıcaklığı arttıkça malzemelerde şekil değişimleri olmuş ve kabarma meydana geldiği görülmüştür. Sinterleme ile meydana gelen boyutsal değişim beklenen bir durumdur. Genellikle seramik malzemelerin sinterlenmesinde, sinterlemeye bağlı olarak boyutsal değişim meydana gelir [35,37-38].

Şekil 5.9’ dan görüldüğü gibi, saf cam tozu (G) ve F1G, F2G numunelerinde 1000 °C sonrası erime gözlenmiştir. Bu numuneler ya tamamen cam tozundan meydana gelmekte ya da yüksek miktarda cam içermektedir ve diğer numunelere göre daha düşük yumuşama sıcaklığına sahiptirler [47]. Sinterlenen numunelerin makro incelemelerinden de görülebileceği gibi (Şekil 5.8-5.9), F1G bileşiminde 800 °C’de, F2G de 950 °C’de ve F3G de ise 1050 °C’de kabarma eğiliminin başladığı gözlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ile, F1G numunelerinde 850 °C ve 900 °C de %50 ‘nin üzerinde şekil değişimi meydana gelerek maksimum kabarma sağlanmıştır (Şekil 5.10). Diğer numunelerde ya erime sonucu deformasyon ya da daha az boyutsal değişim görülmektedir. Üretilen numunelerin tamamında 700 °C ve 750 °C’ lerde sinterlenmeye bağlı olarak hacimsel küçülme meydana gelmiştir (Şekil 5.10).



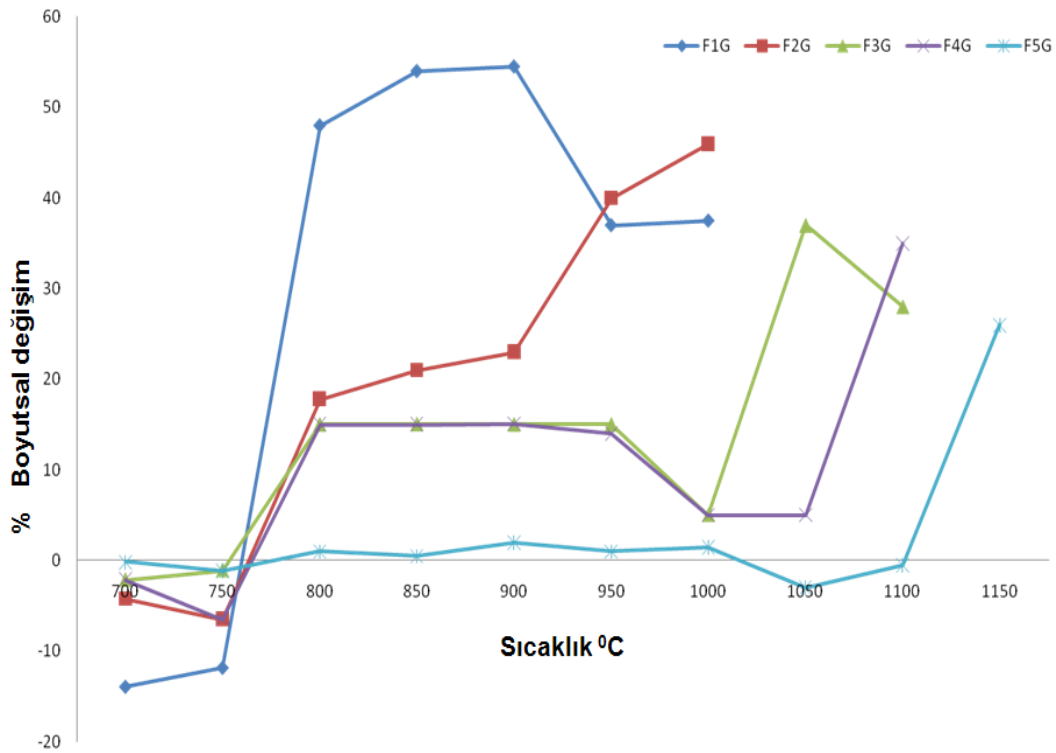
Şekil 5.8. Numune fotoğrafları (700 °C - 900 °C)



Şekil 5.9. Numune fotoğrafları (900 °C - 1150 °C)

Tablo 5.4. Üretilen numunelerin % şekil değişimi değerleri

Sinterleme Sıcaklığı (°C)	F1G	F2G	F3G	F4G	F5G
700	-13,90	-4,25	-2,15	-2,15	-0,15
750	-11,80	-6,52	-1,10	-6,52	-1,10
800	48,00	17,80	15,00	15,00	1,00
850	54,00	21,00	15,05	15,00	0,50
900	54,50	23,00	15,00	15,05	2,00
950	37,00	40,00	15,00	14,00	1,00
1000	37,50	46,00	5,00	5,00	1,50
1050	-	-	37,00	5,00	-3,00
1100	-	-	28,00	35,00	-0,50
1150	-	-	-	-	26,00



Şekil 5.10. Üretilen numunelerin boyutsal değişim - sıcaklık

b) Gözenek miktarı: Numunelerin gözenek (porozite) değerleri denklem 4.2. ile hesaplanmış, sonuçlardan Tablo 5.5 ve Şekil 5.11 oluşturulmuştur. Porozite değerleri şekil değişimi değerleri ile uyum göstermektedir. En yüksek porozite değeri F1G bileşiminin 900 °C’ de sinterlenen numunesinde belirlenmiştir (% 44). Uçucu kül katkılı köpük yapıcı içeren cam köpük araştırmalarında % 75-84 porozite tespit edilmiştir [37]. Belirlenen % 44 porozite miktarının herhangi bir köpük yapıcı malzeme katkısı olmadan elde edildiği göz önünde bulundurulursa, cam köpük için iyi bir değer olduğu düşünülmektedir.

En iyi kabarmanın görüldüğü ve yüksek porozitenin elde edildiği F1G bileşiminde civa porozimetresi ile yapılan porozite ölçümünde de şekil 5.11’ e benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, civa porozimetresi ölçümlerinde sinterlenen numunelerde porozite dağılımı da belirlenmiş ve sinterleme sıcaklığı arttıkça por boyutlarının arttığı gözlenmiştir (Şekil 5.12 – 5.13).

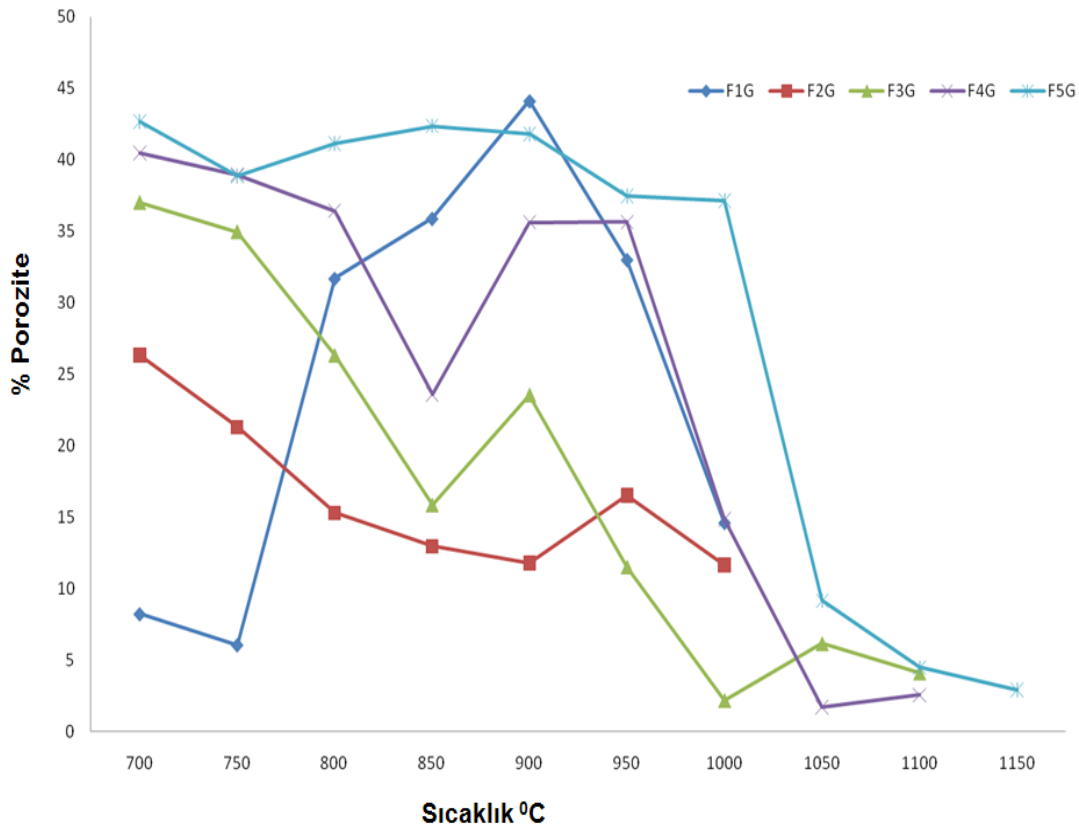
Tablo 5.5. Üretilen numunelerin porozite değerleri (%)

Sinterleme sıcaklığı °C	F1G	F2G	F3G	F4G	F5G
700	8,21	26,34	37,01	40,45	42,66
750	6,04	21,30	34,96	38,94	38,94
800	31,68	15,28	26,31	36,40	41,10
850	35,88	12,94	15,85	23,59	42,35
900	44,11	11,78	23,54	35,60	41,78
950	33,00	16,52	11,50	35,62	37,45
1000	14,60	11,63	2,16	14,84	37,10
1050	-	-	6,14	1,72	9,16
1100	-	-	4,08	2,56	4,49
1150	-	-	-	-	2,91

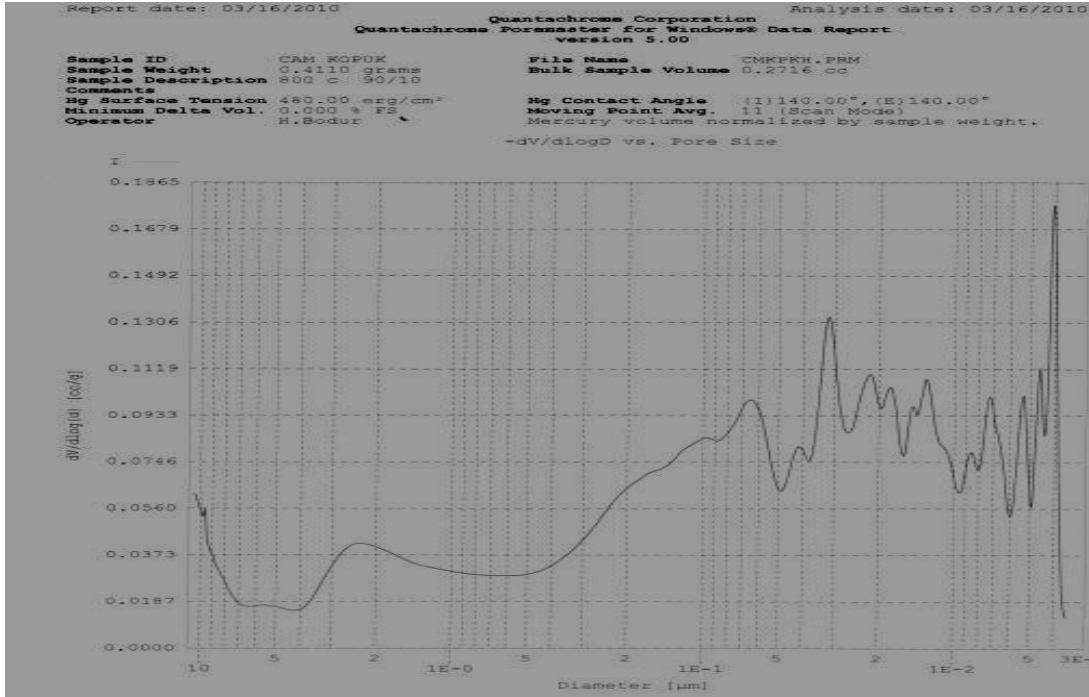
En iyi köpükleşmenin ve yüksek porozitenin elde edildiği F1G bileşiminde 900 °C’ye1 kadar sıcaklık artışıyla porozite miktarı artmaktadır. Çünkü, uygulanan

sinterlenme sıcaklıkları cam tozunun cam geçiş sıcaklığından daha yüksek olup düşük viskozite ve yüksek akışkanlığın meydana getirmektedir [37]. Bu durumda, gerek tozların içerisinde kalan hava kabarcıklarının ve gerekse uçucu külün içerisindeki yanmamış karbonun meydana getirdiği gazların kolay hareket ederek porozite oluşumunu ve köpükleşmeyi teşvik etmektedir.

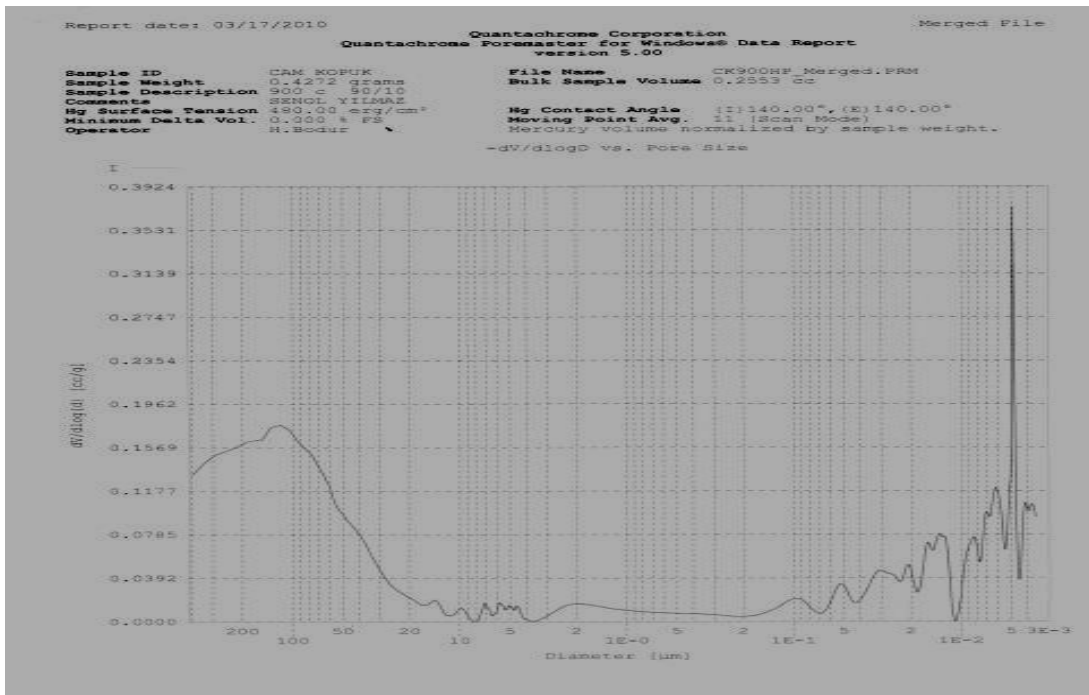
F1G nin dışındaki diğer bileşimlerde porozite oluşumu ve köpükleşmeden ziyade sinterleme meydana gelmiştir. Bu numunelerde sinterleme sıcaklığı arttıkça daha iyi sinterlemenin oluşumuna bağlı olarak porozite azalmaktadır (Bkz. Tablo 5.5, Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Üretilen numunelerin porozite – sıcaklık grafiği



Şekil 5.12. Civa porozimetresi analiz sonucu (FIG 800 °C)



Şekil 5.13. Civa porozimetresi analiz sonucu (FIG 900 °C)

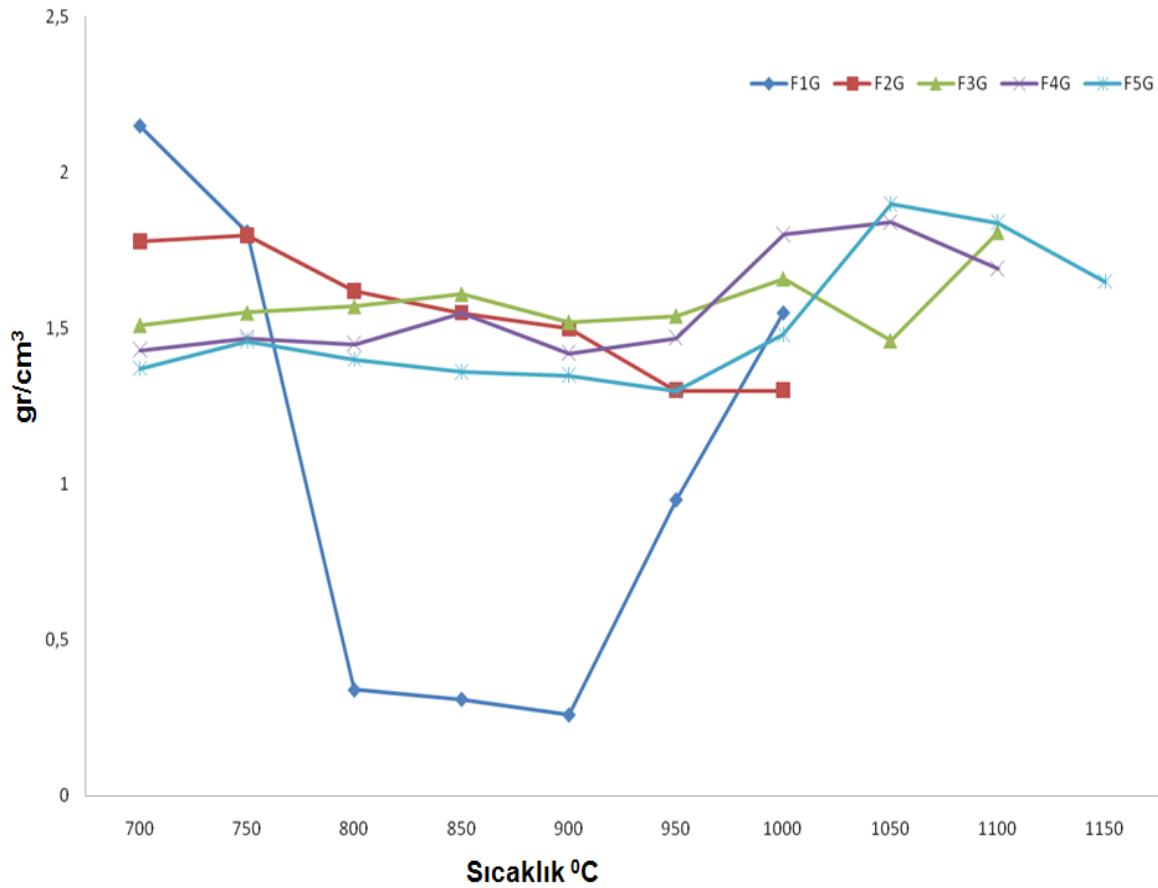
c) Bulk yoğunluk: Numunelerin bulk yoğunluk değerleri formül denklem 4.3. ile hesaplanarak Tablo 5.6 daki değerler oluşturulmuş ve bu değerlerden de Şekil 5.14' deki grafik çizilmiştir.

Yoğunluk değerleri porozite değerleri ile uyum göstermektedir. En düşük yoğunluk değeri F1G bileşiminin 900 °C' de üretilen numunesinde belirlenmiş olup 0,26 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Yoğunluk değerleri, uçucu kül katkılı köpük yapıcı içeren cam köpük araştırmalarında tespit edilenlerle uyum sağlamaktadır [37].

Yüksek cam tozu oranına sahip F1G bileşiminde camın yüksek yoğunluğundan dolayı diğer bileşimlerle karşılaştırıldığında düşük sinterleme sıcaklıklarında daha yüksek yoğunluk değerleri görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının artışıyla artan porozite miktarına bağlı olarak F1G bileşiminden üretilen numunelerde yoğunluk azalma göstermekte ve en düşük değerine en yüksek porozitenin elde edildiği 900°C'de ulaşılmaktadır. Bu sıcaklığın üzerinde camda kısmi ergimenin başlamasıyla beraber azalan porozite sonucunda yoğunluklarda kısmi bir artış göze çarpmaktadır. Uçucu kül oranının daha yüksek olduğu diğer numunelerde daha az camsı faz oluşumuna bağlı olarak daha yüksek viskozitenin meydana gelmesinden dolayı porozite miktarı daha düşük olup bu sonuç yoğunluk değerlerinde de gözlenmektedir.

Tablo 5.6. Üretilen numunelerin yoğunluk değerleri (gr/cm³)

Sinterleme sıcaklığı °C	F1G	F2G	F3G	F4G	F5G
700	2,15	1,78	1,51	1,43	1,37
750	1,81	1,80	1,55	1,47	1,46
800	0,34	1,62	1,57	1,45	1,40
850	0,31	1,55	1,61	1,55	1,36
900	0,26	1,50	1,52	1,42	1,35
950	0,95	1,30	1,54	1,47	1,30
1000	1,55	1,30	1,66	1,80	1,48
1050	-	-	1,46	1,84	1,90
1100	-	-	1,81	1,69	1,84
1150	-	-	-	-	1,65



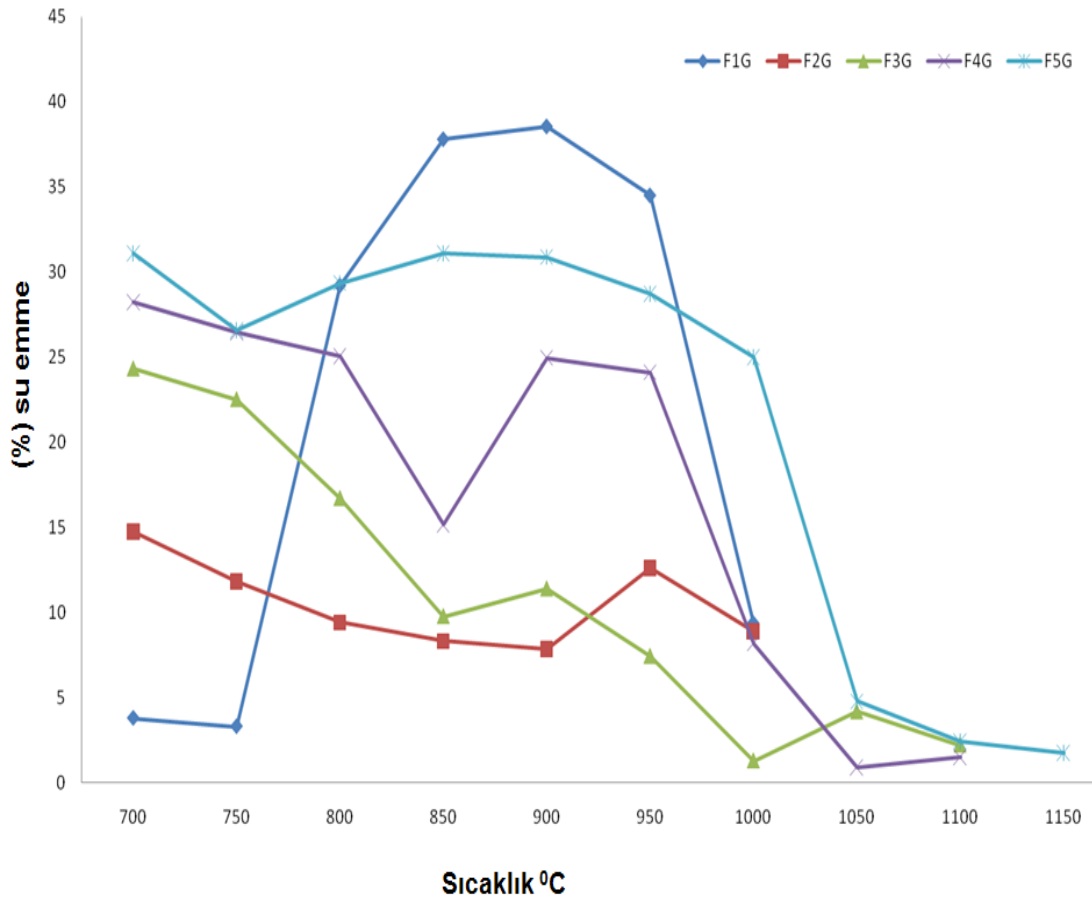
Şekil 5.14. Üretilen numunelerin yoğunluk – sıcaklık grafiği

5.3. Su Emme

Numunelerin su emme değerleri denklem 4.4. ile hesaplanmış, sonuçlardan Tablo 5.7 ve Şekil 5.15 oluşturulmuştur. Tablo ve şekilden görüldüğü gibi sonuçlar porozite ve yoğunluk değerleri ile uyum göstermektedir. F1G numunelerinde sinterleme sıcaklığının artışıyla artan porozite ve azalan yoğunluktan dolayı su emme değerleri artmaktadır. 950 °C'nin üzerinde ise camın ergimeye başlamasından dolayı deformasyonla birlikte su emme değeri önemli ölçüde düşüş sergilemektedir. Diğer numunelerde sinterleme sıcaklığının artışıyla artan sinterlenme oranına bağlı olarak su emme değerleri azalmaktadır.

Tablo 5.7. Üretilen numunelerin % su emme değerleri

Sinterleme sıcaklığı °C	F1G	F2G	F3G	F4G	F5G
700	3,81	14,74	24,35	28,23	31,10
750	3,32	11,83	22,54	26,45	26,58
800	29,20	9,41	16,73	25,05	29,35
850	37,80	8,31	9,79	15,16	31,07
900	38,55	7,85	11,42	24,96	30,87
950	34,50	12,62	7,45	24,10	28,7
1000	9,38	8,88	1,30	8,21	25,00
1050	-	-	4,20	0,93	4,80
1100	-	-	2,24	1,54	2,44
1150	-	-	-	-	1,76



Şekil 5.15. Üretilen numunelerin % su emme – sıcaklık grafiği

5.4. Basma Mukavemeti

Uçucu kül-cam tozu karışımlarından üretilen ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin basma mukavemeti değerleri Tablo 5.8’ de verilmiştir. Tespit edilen bu değerler yardımıyla basma mukavemeti–sıcaklık grafiği oluşturulmuştur (Şekil 5.16).

Basma mukavemetlerinin porozite değerleri ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Porozite miktarı arttıkça basma mukavemeti azalmaktadır. Bu beklenen sonuç literatürde yer almaktadır [37].

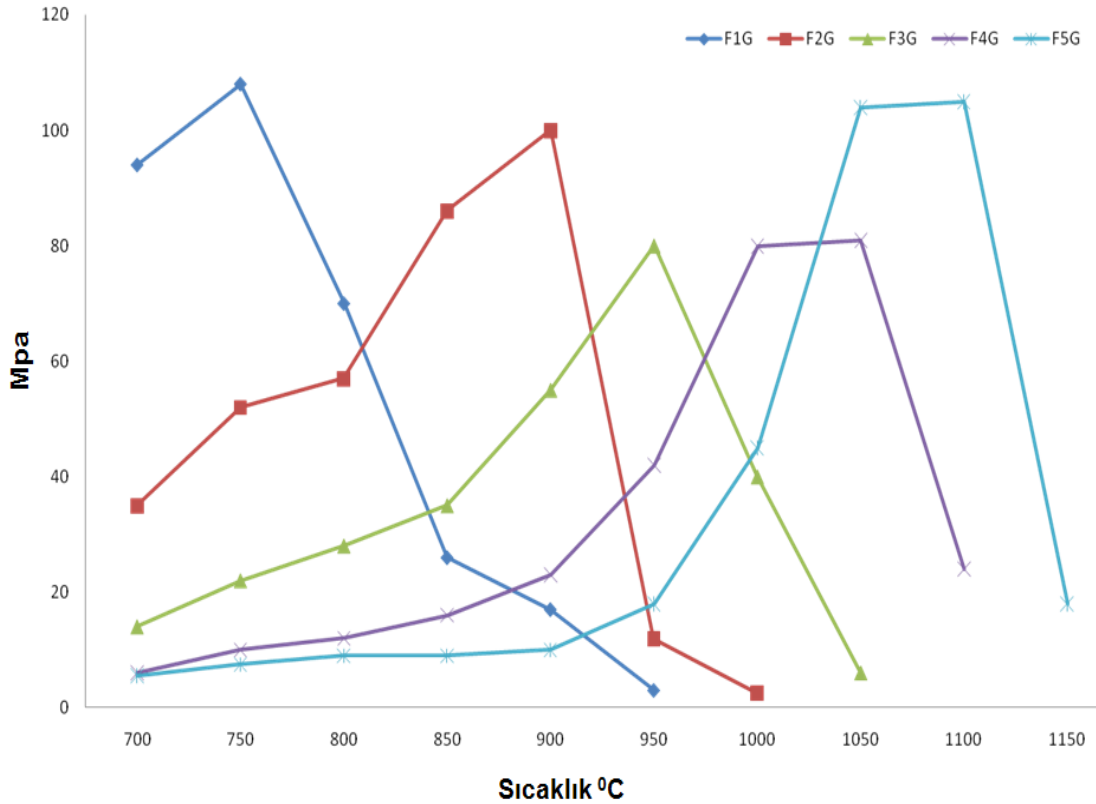
Köpük yapıcı ilavesi olmadan uçucu kül ve cam tozundan üretilen numunelerin içerisinde % şekil değişimi, yoğunluk, porozite değerleri ile en iyi köpükleşmenin sağlandığı F1G (900 °C) numunesinin basma mukavemeti 17 MPa olarak ölçülmüştür. Literatürde uçucu kül katkılı köpük yapıcı ilaveli cam köpük üretiminde

1,70 – 2,29 MPa basma mukavemetleri görülmektedir [37]. Literatürde bu basma değerlerinin elde edildiği numunelerde porozite miktarı daha yüksektir (%75-84). Bu çalışmada ise %44 porozite de 17 MPa basma mukavemeti tespit edilmiştir.

F1G nin dışındaki diğer numunelerde ise deformasyon ve erime başlayana kadar basma mukavemeti daha düşük poroziteden dolayı artış göstermektedir.

Tablo 5.8. Üretilen numunelerin basma mukavemeti değerleri (MPa)

Sinterleme sıcaklığı °C	F1G	F2G	F3G	F4G	F5G
700	94	35	14	6	5,5
750	108	52	22	10	7,5
800	70	57	28	12	9
850	26	86	35	16	9
900	17	100	55	23	10
950	3	12	80	42	18
1000	-	2,53	40	80	45
1050	-	-	6	81	104
1100	-	-	-	24	105
1150	-	-	-	-	18



Şekil 5.16. Üretilen numunelerin basma mukavemeti – sıcaklık grafiği

5.5. Isı Mikroskop İncelemesi

En iyi köpükleşmenin ve en yüksek porozitenin elde edildiği F1G numunelerinin 32⁰C-1100⁰C aralığında sıcaklık karşısında gösterdiği şekil değişimi incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda sinterleme ve yumuşama sıcaklığı ile bünyenin yarım küre şeklini aldığı sıcaklık değerleri tespit edilmiştir (Şekil 5.17-5.19). Elde edilen sonuçlar sinterleme sıcaklığının 732 ⁰C, yumuşama sıcaklığının 733 ⁰C ve yarım küre şeklini aldığı sıcaklığının da 1095 ⁰C olduğunu göstermektedir.

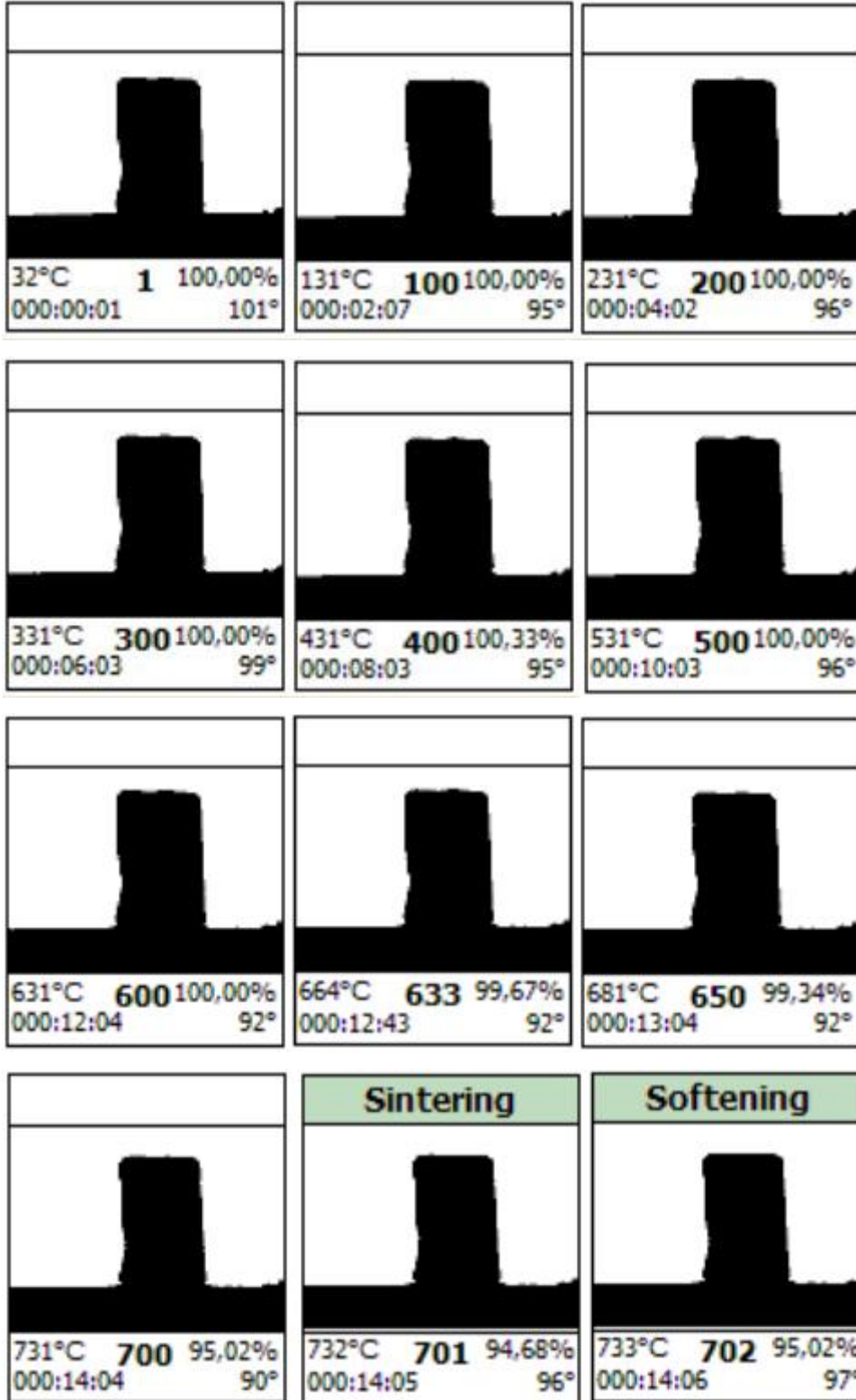
Isıl mikroskop incelemesi ile yapılan tespitler; % şekil değişimi, porozite, yoğunluk ve basma mukavemeti değerlerini desteklemektedir. Şekil 5.17-5.19'dan görüldüğü gibi sıcaklık artışıyla porozitenin artışına bağlı olarak numunelerde kabarmanın ve şekil değişiminin arttığı gözle çarpılmaktadır.



Heating Microscope
Misura 3.32
www.expertsystemsolutions.com
tech@expertsystemsolutions.com



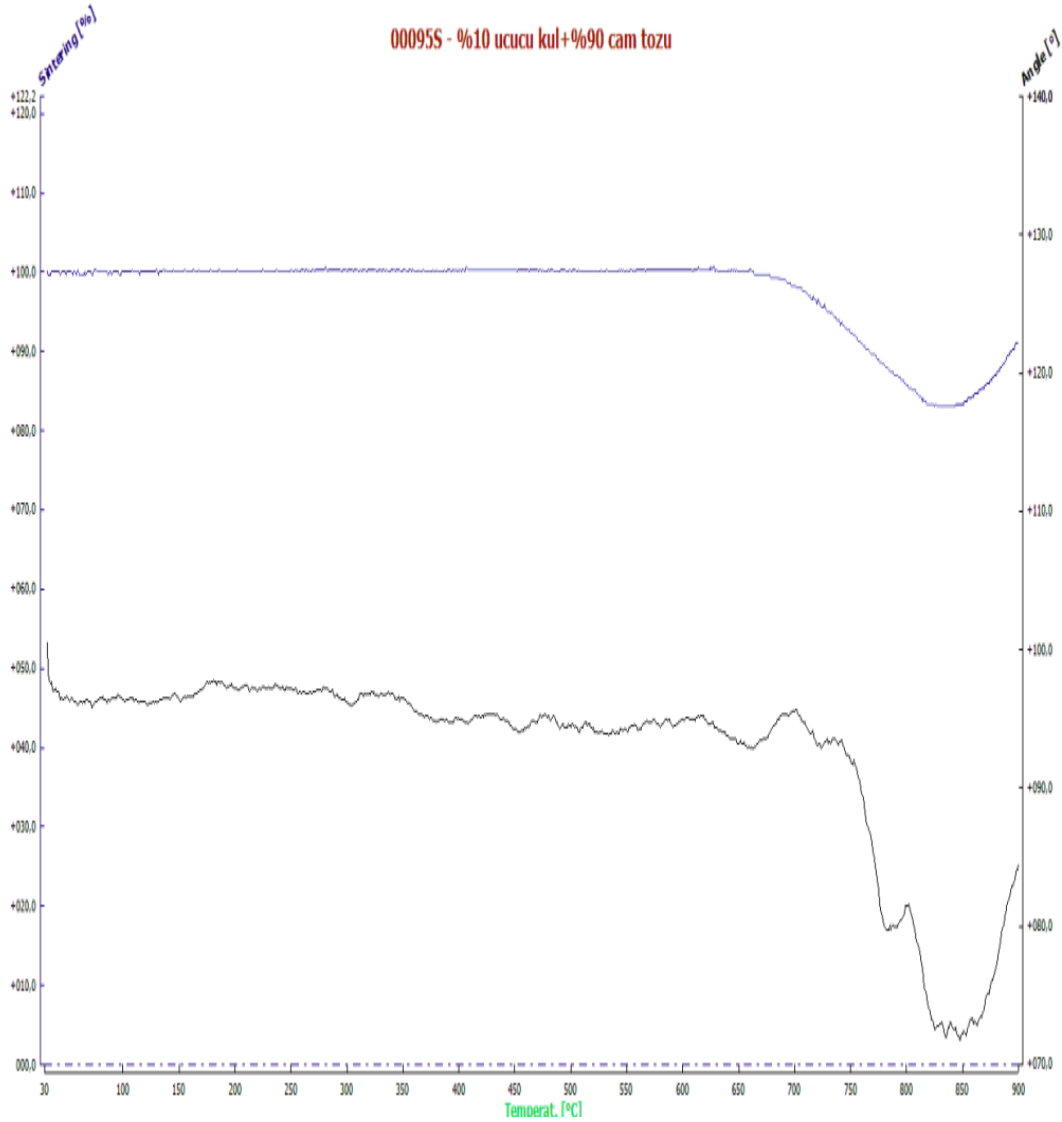
Code:	000955	Test type:	Single sample
Description:	%10 ucucu kul+%90 cam tozu	Min. temperature:	32 °C
Date:	15.12.2009	Max. temperature:	1096 °C



Şekil 5.17. FIG numunesi ısı mikroskop görüntüleri (32 °C – 733 °C)



Şekil 5.18. FIG numunesi ısı mikroskop görüntüleri (781 °C – 1095 °C)



Şekil 5.19. F1G numunesinin ısı mikroskobu ile şekil değişimi grafiği

5.6. Isıl İletkenlik

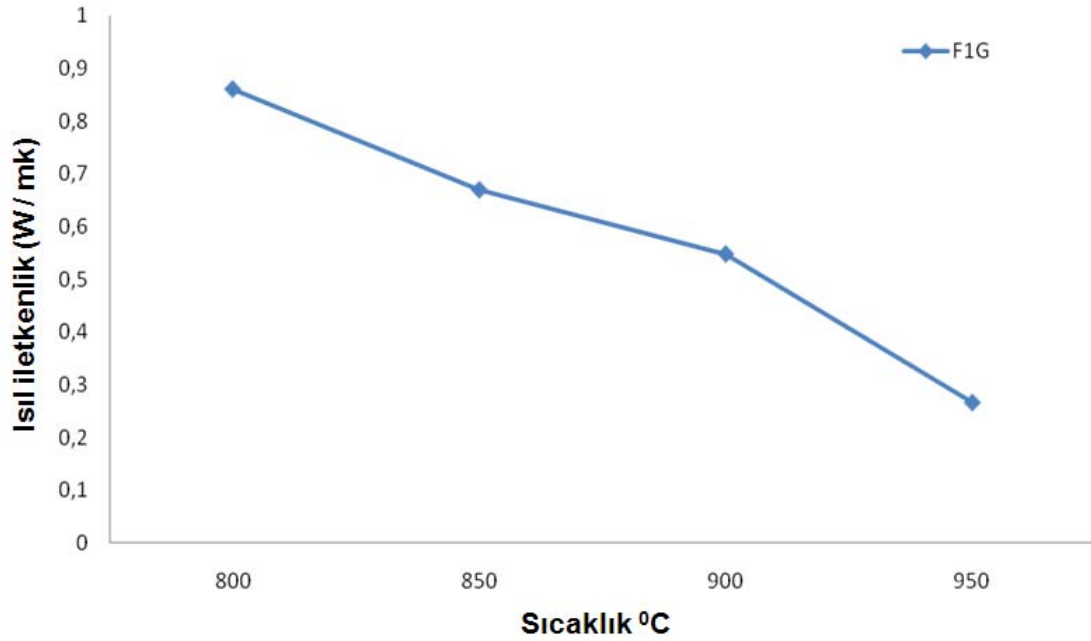
En yüksek porozite değerlerine sahip olan F1G bileşiminin 800-950 °C'de sinterlenen numunelerinde elde edilen ısı iletkenlik değerleri Tablo 5.9' da, bu değerlerden çizilen grafikte Şekil 5.20'de verilmiştir.

Sinterleme sıcaklığının artmasına bağlı olarak artan porozite ile birlikte ısı iletkenlik azalmaktadır. Bu durum, camsı köpük malzemenin ısı yalıtımında kullanılabilirliğinin yüksek porozite ile mümkün olabileceğinin bir göstergesidir.

Yalıtım malzemesi olarak kullanılan cam köpük malzemelerin ısı iletkenlik katsayısı literatürde 0,033 W/mk olarak belirtilmiş olup [39] F1G bileşiminin en düşük ısı iletkenlik değeri 0.26 W/mk bulunmuştur.

Tablo 5.9. F1G bileşimine ait ısı iletkenlik değerleri (W/mk)

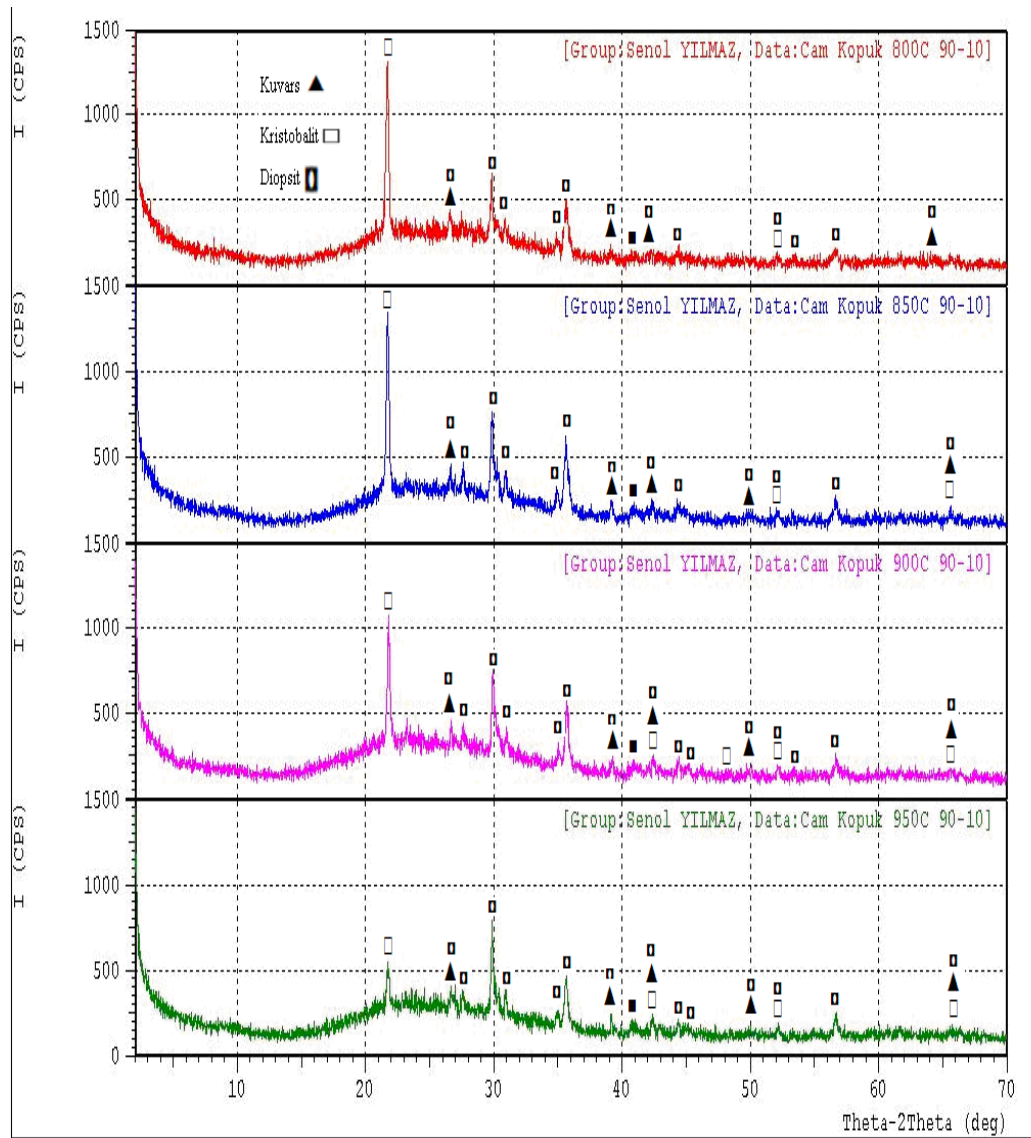
Sinterleme sıcaklığı °C	F1G
800	0,8603
850	0,6694
900	0,5480
950	0,2664



Şekil 5.20. F1G numunesinin ısı iletkenlik – sıcaklık grafiği




5.7. X-ışınları Difraksiyon Analizi

Köpük yapıcı ilavesi olmadan uçucu kül ve cam tozundan üretilen numunelerin içerisinde % şekil değişimi, yoğunluk, porozite değerleri ve basma mukavemeti ile en iyi köpükleşmenin sağlandığı F1G bileşiminin 800, 850, 900 ve 950 °C' lere sinterlenen numunelerinin XRD sonuçları şekil 5.21' de verilmiştir. Analizlerde belirlenen fazlar ve kart numaraları da Tablo 5.10' de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. F1G numunesi XRD sonuçları

Tablo 5.10. Sinterlenen F1G XRD sonucunda belirlenen fazlar ve kullanılan simgeleri

Kristal Fazlar	Kart No	Simge
Kuars (SiO_2)	46-1045	
Kristobalit (SiO_2)	39-1425	
Diopsit ($\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$)	26-911	

XRD analizi sonucunda F1G bileşimindeki numunelerde tüm sinterleme sıcaklıklarında kuvars, kristobalit ve diopsit fazları tespit edilmiştir. Sıcaklık artışıyla kristobalit pik şiddetlerinde azalma gözlenirken diopsit pik şiddetlerinde artış göze çarpmaktadır. Sıcaklık artışıyla diopsit fazının oluşumu artmaktadır. Hammadde karakterizasyonunda Seyitömer termik santrali uçucu külünde tespit edilen kuvars, illit, manyetit, kaminit, hersinit ve gismondin fazları cam tozu ile sinterleme sıcaklıklarında reaksiyona girmiş ve kuvars, kristobalit ve diopsit fazlarını meydana getirmiştir. Sinterleme sonucunda bulunan bu yeni fazlar literatürde yer alan benzer çalışmalarla uyum göstermektedir [35, 37].

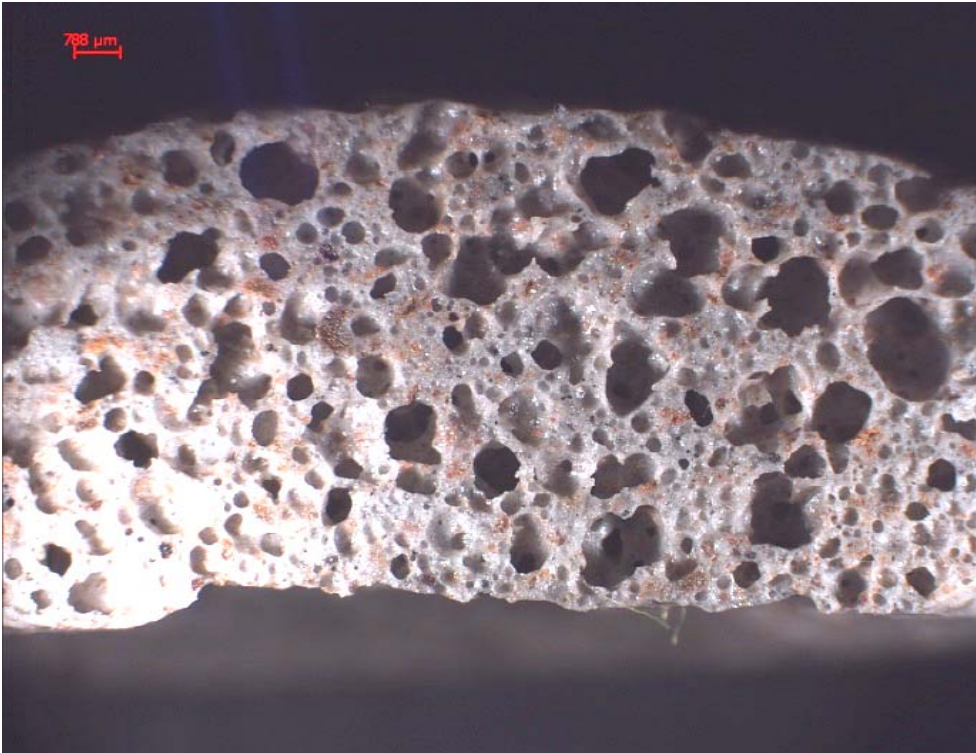
5.8. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu ile Mikroyapı İncelemesi ve Enerji Dispersif Spektrometresi Analizi Sonuçları

Bu çalışma kapsamında üretilen en yüksek porozite miktarı ile en iyi köpükleşmenin elde edildiği F1G bileşiminin 800, 850, 900 ve 950 °C' lerde sinterlenen numunelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.22 - 5.25' de verilmiştir.

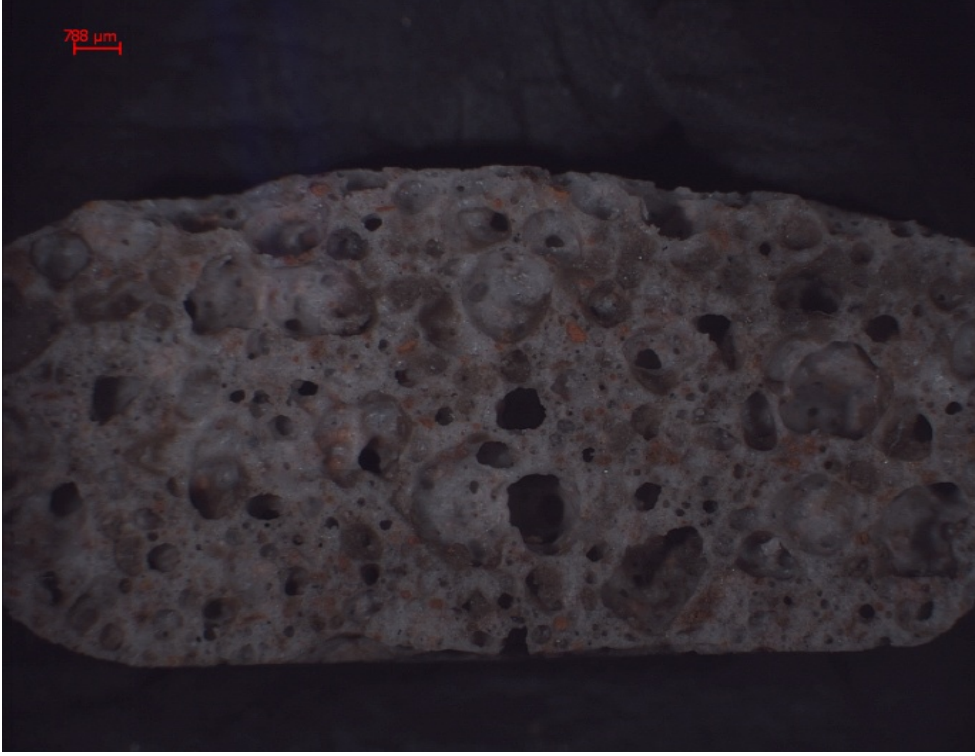
Optik mikroskop mikroyapıları incelendiğinde sinterleme sıcaklığının artışıyla birlikte por boyutunda ve porozite miktarında artış olduğu göze çarpmaktadır. Yine mikroyapılardan görüldüğü gibi por boyut dağılımı homojen olmayıp küçük ve büyük porlar birlikte bulunmaktadır. Bu durum benzer çalışmalarda da gözlenmektedir [37,38]. Ayrıca mikroyapılardan yüzeye doğru daha büyük meydana geldiği gözlenmektedir. Bu durum, sıvıların içerisinde tabandaki gaz basıncının yüzeye yaklaştıkça azalması ve hava kabarcıklarının sıvı yüzeyine yaklaştıkça hacimlerinin büyümesinden kaynaklanmaktadır. Tabana yakın bölgede basıncın yüksek olması sebebiyle por boyutları küçük olmaktadır [48].



Şekil 5.22 800 °C'de sinterlenen FIG numunesinin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 5.23. 850 °C'de sinterlenen FIG numunesinin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 5.24. 900 °C'de sinterlenen FIG numunesinin optik mikroskop görüntüsü

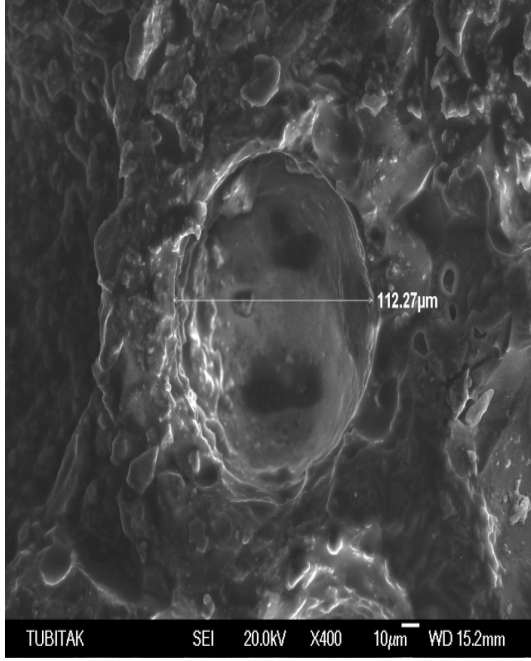


Şekil 5.25. 950 °C'de sinterlenen FIG numunesinin optik mikroskop görüntüsü

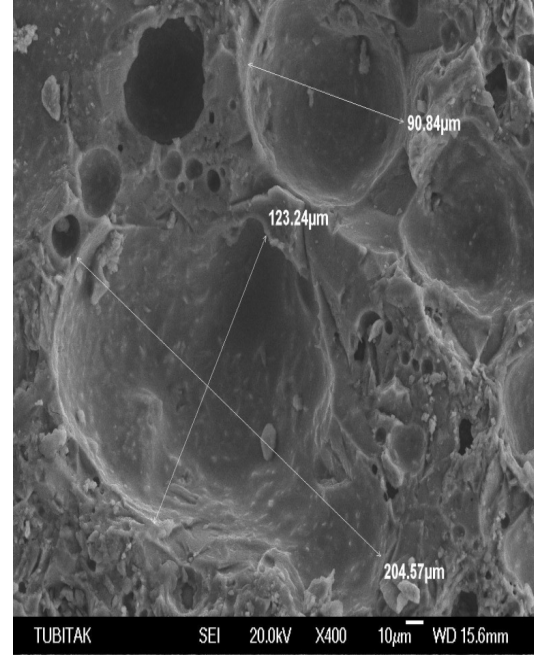
F1G numunlerine ait SEM mikroyapı görüntüleri ve bu görüntüler üzerinden alınan EDS analizleri Şekil 5.26 – 5.30’ da verilmiştir.

SEM mikroyapılarında bazı görüntüler üzerinden por boyutları ölçülmüş olup alınan ölçümler civa porozimetresi sonuçlarıyla uyum sergilemektedir. Düşük sıcaklıklarda sinterlenen numunelerde por miktarının ve boyutlarının küçük olduğu, sinterleme sıcaklığının artışıyla porların birbirine bağlandığı ve birleşerek büyük porlar meydana getirdiği görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda daha büyük porların görülmesinin sebebi, artan sıcaklık ile viskozitenin düşmesine bağlı olarak viskoz akışın gerçekleşmesiyle kabarcıkların daha kolay hareket etmesidir.

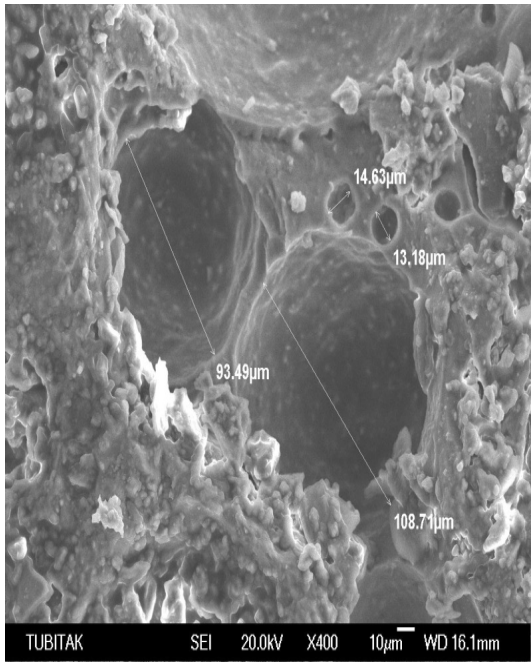
SEM görüntüleri üzerinden alınan EDS analizlerinde Ca, Si, Mg, Fe, Al, Na ve O pikleri tespit edilmiştir. Bunlar uçucu külün kimyasal analizinde belirlenen kimyasal bileşiklere aittir. Ca, Si ve Mg sinterlenen numunelerde bulunan kuvars, kristobalit ve diopsit fazlarında bulunmakta olup bu fazların meydana geldiğine işaret etmektedir. Fe, Al ve Na pikleri camsı amorf yapının olduğunu göstermektedir. Bütün piklerin beraber bulunması kristal yapı ile birlikte camsı yapının da mevcut olduğunu ve birlikte bulduklarını belirtmektedir. Bazı bölgelerde görülen yüksek Si piki, muhtemelen buralarda diopsit fazının daha fazla bulunduğunu ifade etmekte olup bu sonuç XRD analizleri ile de uyum göstermektedir.



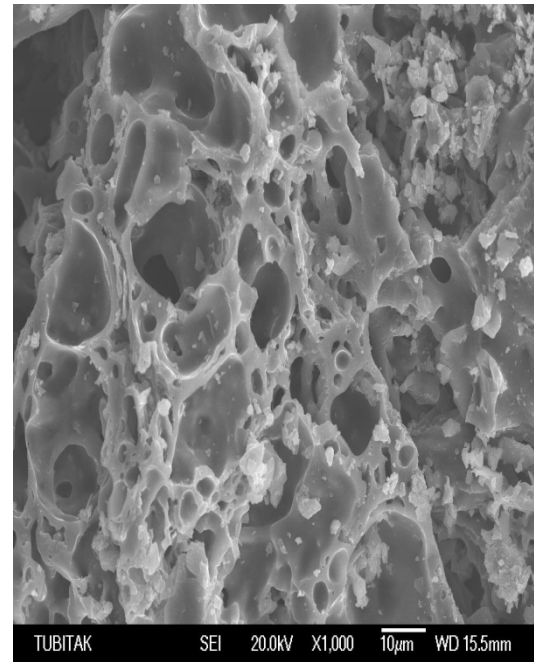
(a)



(b)

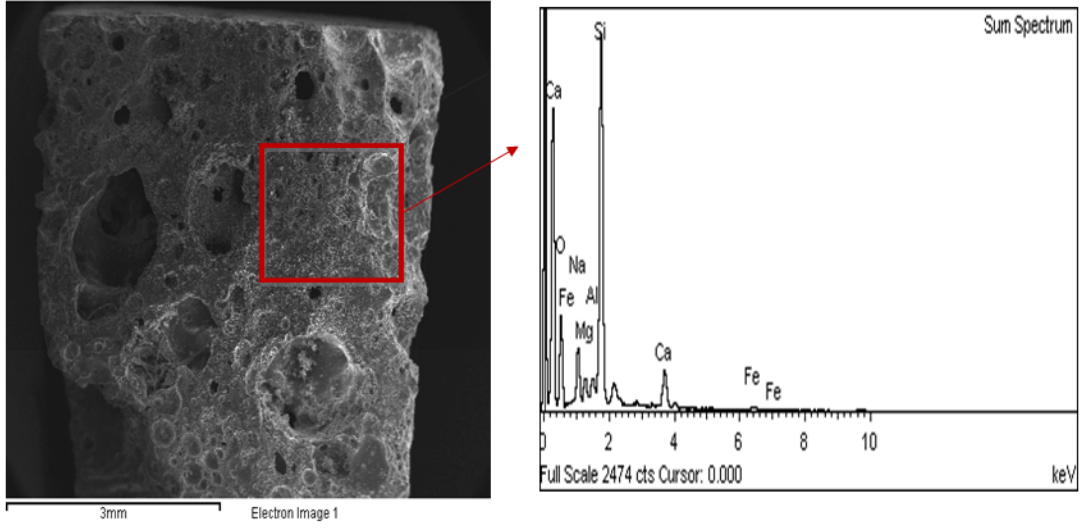


(c)

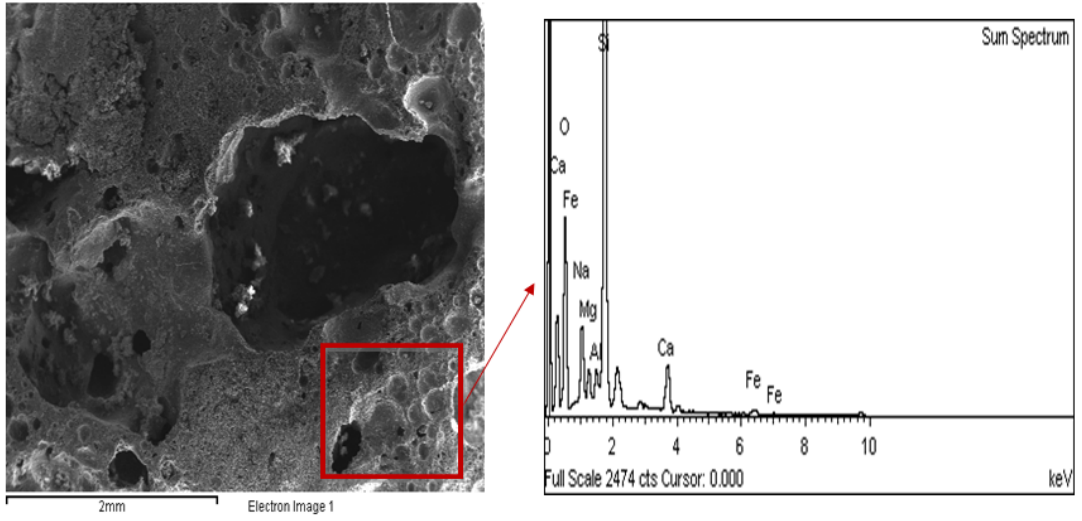


(d)

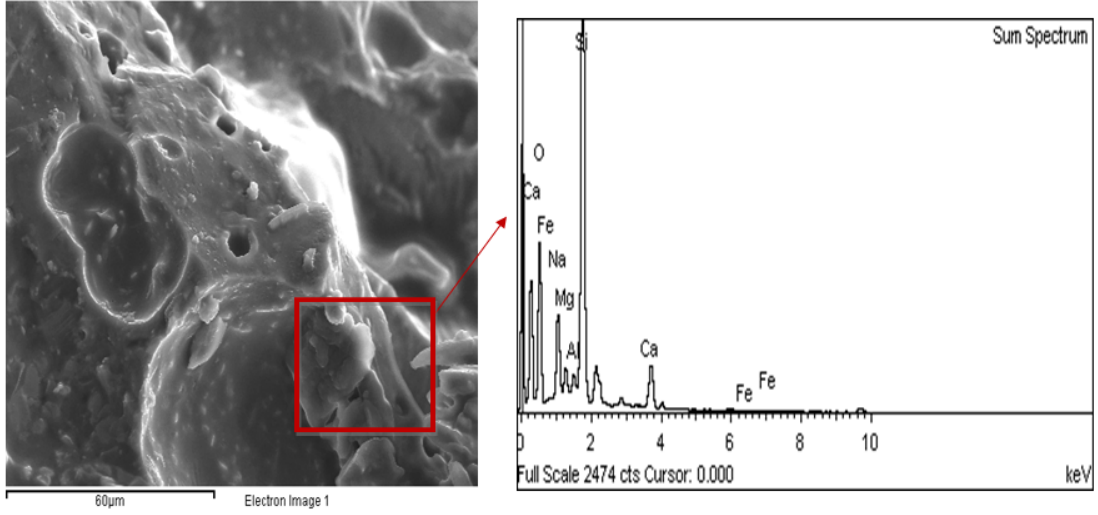
Şekil 5.26. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen FIG numunesinin SEM mikroyapı görüntüleri a)800 °C, b)850°C, c)900°C, d)950°C



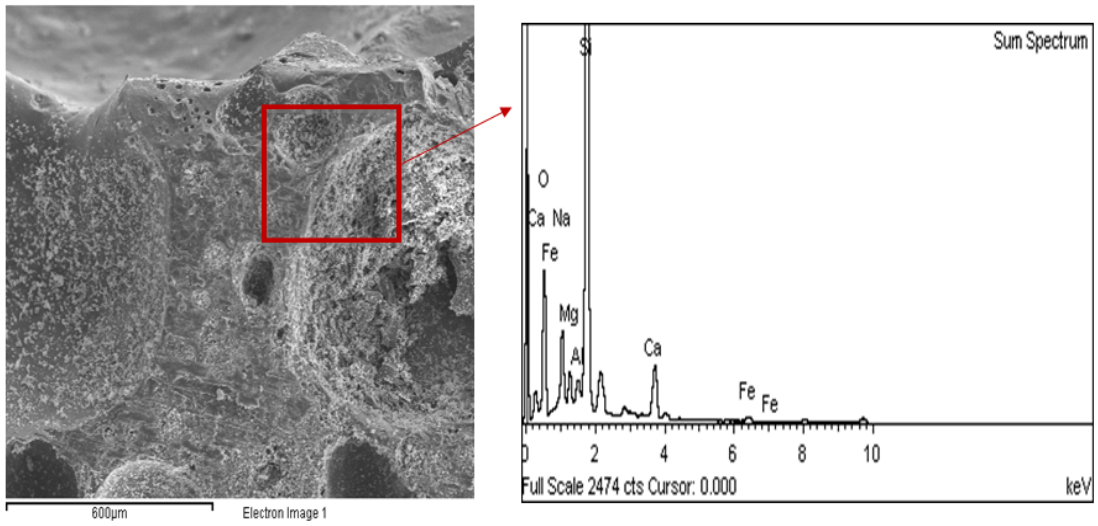
Şekil 5.27. FIG 800 °C numunesi SEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi



Şekil 5.28. FIG 850 °C numunesi SEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi



Şekil 5.29. FIG 900 °C numunesi SEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi



Şekil 5.30. FIG 950 °C numunesi SEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada Seyitömer termik santrali atık uçucu külü-atık pencere camı tozu karışımlarından herhangi bir köpük yapıcı katkısı olmadan camsı köpük malzemenin üretim imkanları araştırılmıştır. Uçucu küle % 50-90 oranlarında atık cam ilavesi ile karışımlar hazırlanmış ve bu karışımlar kuru presleme tekniği ile şekillendirilmiştir. Şekillendirilen test numuneleri 700-1150 °C sıcaklık aralığında sinterlenmiş ve çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1) Uçucu külün kimyasal analizinde $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriğinin % 84,78 olduğu tespit edilmiştir. Bu değer, ASTM C 618 Standartlarına Seyitömer termik santrali atık uçucu külünün F sınıfı olduğunu göstermektedir.
- 2) Uçucu külün DTA analizinde 460 °C de ekzotermik pik gözlenmiştir. Ayrıca, aynı sıcaklıkta %3,1 lik ağırlık kaybı meydana gelmektedir.
- 3) Uçucu külün yapılan tane boyutunun 10-100 µm aralığında olduğu ve %50 sinin 41 µm altında bir boyuta sahip olduğu tespit edilmiştir.
- 4) Uçucu külün SEM ile tane yapısı incelendiğinde, küresel ve köşeli aglomere tanelerden meydana geldiği görülmüştür.
- 5) Uçucu külün XRD analizinde kuvars, illit, manyetit, kaminit, hersinit ve gismondin fazları tespit edilmiştir.
- 6) Deneysel çalışmalarda kullanılan cam tozunun DTA analizi sonucunda cam geçiş sıcaklığının 550 °C olduğu görülmüştür.

7) Cam tozunun tane boyutunun 10-100 μm aralığında olduğu ve %50 sinin 36 μm altında bir boyuta sahip olduğu tespit edilmiştir.

8) Saf cam tozu (G) ve F1G, F2G numunelerinde 1000 $^{\circ}\text{C}$ ' de sinterleme sonrası erime gözlenmiştir. F1G bileşiminde 800 $^{\circ}\text{C}$ 'de, F2G de 950 $^{\circ}\text{C}$ 'de ve F3G de ise 1050 $^{\circ}\text{C}$ 'de kabarma eğiliminin başladığı görülmüştür. Artan sinterleme sıcaklığı ile, F1G numunelerinde 850 $^{\circ}\text{C}$ ve 900 $^{\circ}\text{C}$ de %50 'nin üzerinde şekil değişimi meydana gelerek maksimum kabarma sağlanmıştır. Üretilen numunelerin tamamında 700 $^{\circ}\text{C}$ ve 750 $^{\circ}\text{C}$ ' lerde sinterlenmeye bağlı olarak hacimsel küçülme meydana gelmiştir.

9) En yüksek porozite değeri F1G bileşiminin 900 $^{\circ}\text{C}$ ' de sinterlenen numunesinde belirlenmiştir. Belirlenen % 44 porozite miktarının herhangi bir köpük yapıcı malzeme katkısı olmadan elde edildiği göz önünde bulundurulursa, cam köpük için iyi bir değer olduğu düşünülmektedir. F1G nin dışındaki diğer bileşimlerde porozite oluşumu ve köpükleşmeden ziyade sinterleme meydana gelmiştir. Bu numunelerde sinterleme sıcaklığı arttıkça daha iyi sinterlemenin oluşumuna bağlı olarak porozite azalmaktadır.

10) En düşük yoğunluk değeri F1G bileşiminin 900 $^{\circ}\text{C}$ ' de üretilen numunesinde belirlenmiş olup 0,26 gr/cm^3 olarak ölçülmüştür.

11) F1G numunelerinde sinterleme sıcaklığının artışıyla artan porozite ve azalan yoğunluktan dolayı su emme değerleri artmaktadır. Diğer numunelerde sinterleme sıcaklığının artışıyla artan sinterlenme oranına bağlı olarak su emme değerleri azalmaktadır.

12) Köpük yapıcı ilavesi olmadan uçucu kül ve cam tozundan üretilen numunelerin içerisinde en iyi köpükleşmenin sağlandığı F1G (900 $^{\circ}\text{C}$) numunesinin basma mukavemeti 17 MPa olarak ölçülmüştür.

13) En iyi köpükleşmenin ve en yüksek porozitenin elde edildiği F1G numunelerinin 32 $^{\circ}\text{C}$ -1100 $^{\circ}\text{C}$ aralığında ısı mikroskobu ile yapılan incelemesinde; sinterleme

sıcaklığının 732 °C, yumuşama sıcaklığının 733 °C ve yarım küre şeklini aldığı sıcaklığın da 1095 °C olduğu belirlenmiştir.

14) 900 °C' sinterlenen F1G bileşiminde en düşük ısıl iletkenlik ölçümü ve 0.26 W/mk değeri tespit edilmiştir.

15) XRD analizi sonucunda F1G bileşimindeki numunelerde tüm sinterleme sıcaklıklarında kuvars, kristobalit ve diopsit fazları tespit edilmiştir.

16) Optik mikroskop mikroyapılarında sinterleme sıcaklığının artışıyla birlikte por boyutunda ve porozite miktarında artış olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca, por boyut dağılımının homojen olmadığı, küçük ve büyük porların birlikte bulunduğu gözlenmiştir.

17) SEM mikroyapılarında, düşük sıcaklıklarda sinterlenen numunelerde por miktarının ve boyutlarının küçük olduğu, sinterleme sıcaklığının artışıyla porların birbirine bağlandığı ve birleşerek büyük porlar meydana getirdiği görülmüştür.

6.2. Öneriler

1) Yapılan çalışmada en iyi köpükleşmenin ve en yüksek porozitenin F1G kodlu %10 uçucu kül içeren bileşimde meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmada herhangi bir köpük yapıcı katkı kullanılmayarak %44 porozite elde edilmiştir. Farklı köpük yapıcı katkılarıyla daha yüksek porozite oranlarının elde edilip edilemeyeceği araştırılabilir.

2) Benzer çalışmalar farklı atıklar ve farklı camlarla yapılarak köpükleşme özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] GÖRHAN, G., KAHRAMAN, E., BAŞPINAR, M. S.; “Uçucu Kül Bölüm 1 Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları”, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi , (2) 85 -94, 2008.
- [2] ARUNTAŞ, H. Y.; “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 21, No 1, 193-203, 2006.
- [3] BENTLİ, İ., UYANIK, A.O., DEMİR, U., ŞAHBAZ, O., ÇELİK, M.S.; “Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı”, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı İzmir, Türkiye, 09-12 Haziran 2005.
- [4] DEMİR, İ.; “Uçucu Külün Hafif Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması”, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, (1) 21 – 24 2005.
- [5] KAVAS, T., ÇELİK, M.Y., EVCİN, A.; “Cam Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, 5 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 13-14 İzmir, Türkiye, Mayıs 2004.
- [6] ERCENK, E., TOPLAN, N., TOPLAN, H.Ö., YILMAZ, Ş.; “Uçucu Kül ve Atık Cam Tozu İçeren Sırlar ve Endüstriyel Uygulamaları”, IV. Uluslararası Katılımlı Seramik, Emaye, Cam, Sır ve Boya Semineri (SERES’07), Bildiriler e-kitabı, 1117-1125, Eskişehir, 2007.
- [7] YILMAZ, Ş., ŞEN, Ş., GÜNAY, V., ÖZKAN O.T.; “Utilization of Power Plant Fly Ash as a Building Material”, Tile and Brick International, Volume 13, Issue 4, 297-300, 1997.
- [8] EROL, M., GENÇ, A., ÖVEÇOĞLU, M.L., YÜCELEN, E., KÜÇÜKBAYRAK, S., TAPTIK, Y.; “Characterization of a Glass-Ceramic Produced from Thermal Power Plant Fly Ashes, Journal of the European Ceramic Society, Volume 20, Issue 12, 2209-2214, 2000.
- [9] YILMAZ, Ş., TOPLAN H.Ö.; “Uçucu Kül Esaslı Sırlar ve Endüstriyel Uygulamaları”, Seramik Türkiye (Türk Seramik Federasyonu Dergisi), Sayı 5, 151–154, 2004.

- [10] YILMAZ, Ş.; “Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1992.
- [11] MUKHERJI, S.K., B. MACHHOYA, B., SAVSANI, R.M., VYAS, D.R., DAN T.K.; “The Utilisation of Fly Ash in the Preparation of Ceramic Tableware and Art-ware”, Br. Ceram. Trans., Volume 92, Issue 6, 254–257, 1993.
- [12] YILMAZ, Ş., ŞEVİK, H., ÖZDEMİR, H.; “Yüksek Fırın Cürufu İçeren Sırlar ve Endüstriyel Uygulamaları”, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 856-862, 2004.
- [13] BEYÇİOĞLU, A., BAŞYİĞİT, C., SUBAŞI, S.; “Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı ile Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerin Azaltılması”, Çevre Sorunları Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi Çevre Müh. Böl., Kocaeli, 1386-1394, 2008.
- [14] YILDIZ, T., YILDIZ, C.; “Soma Termik Santrali Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Yeni Bir Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt. 9, Sayı. 2, Sayfa. 163-169, 2003.
- [15] <http://www.projectsmonitor.com/NewsImages/photos%2013/Fly%20Ash-1.jpg>, 2010.
- [16] <http://www.fhwa.dot.gov/PAVEMENT/recycling/fach01.cfm>, 2010.
- [17] http://img.alibaba.com/photo/10953997/Fly_Ash_Cement.jpg, 2010.
- [18] <http://www.sciencedaily.com/images/2009/09/090929141534-large.jpg>, 2010.
- [19] <http://themoderngreen.com/wp-content/uploads/2010/01/fly-ash-bricks.jpg>, 2010
- [20] <http://imgghost.indiamart.com/data1/S/7/MY-1517673/fly-ash-brick-6-inch-brick-250x250.jpg>, 2010.
- [21] http://pressbox.co.uk/images/logos/390512_fly%20ash.jpg, 2010.
- [22] http://www.ecofriend.org/images/researchers-have-created-bricks-from-fly-ash-that-look-and-perform-like-normal-bricks_9.jpg, 2010

- [23] EROL, M., DEMİRLER, U., KÜÇÜKBAYRAK, S., MERİÇBOYU, A. E., ÖVEÇOĞLU, M.L.; “Characterization Investigations of Glass-Ceramics Developed From Seyitömer Thermal Power Plant Fly Ash”, Journal of the European Ceramic Society, 23 [5] 757-763, 2003.
- [24] KIM, J.M., KIM, H.S.; “Processing And Properties of a Glass-Ceramic From Coal Fly Ash From a Thermal Powder Plant Through an Economic Process”, Journal of the European Ceramic Society, 24 [9] 2825-2833, 2004.
- [25] EROL, M., KÜÇÜKBAYRAK, S., MERİÇBOYU, A.E., ÖVEÇOĞLU, M.L.; “Crystallization Behaviour of Glasses Produced From Fly Ash”, Journal of the European Ceramic Society, [21] 2835-2841, 2001.
- [26] ZHANG, J., DONG, W., LI, J., QIAO, L., ZHENG, J., SHENG, J.; “Utilization of Coal Fly Ash in the Glass-Ceramic Production”, Journal of Hazardous Materials, 149 [2] 523-526, 2007.
- [27] EROL, M., KÜÇÜKBAYRAK, S., MERİÇBOYU, A.E.; “Comparison of the Properties of Glass, Glass-Ceramic and Ceramic Materials Produced From Coal Fly Ash”, Journal of Hazardous Materials”, 153 [1-2] 418-425, 2008.
- [28] YETGİN, S. H., ÜNAL, H.; “Polimer Esaslı Köpük Malzemeler”, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17. Sayı Aralık 2008.
- [29] HOROZ, Ç.; “Haliç Tarama Çamuru-Çimento-Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri” İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2007.
- [30] AKPINAR, S., ALTUN, İ. A., ÖNEL, K.; Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bilim-Teknoloji dergisi 29; 140-146, 2009.
- [31] http://dogusmetal.com/files/Kopuk_Filtre_Kullanimi.pdf, 2010.
- [32] [http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/icerik/cam.htm#8-CAM_KÖPÜĞÜ](http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/icerik/cam.htm#8-CAM_KÖPÜĞÜ;); 2010.
- [33] <http://www.enco.ch/glass.htm>, 2010.
- [34] http://tr.wikipedia.org/wiki/Kimyasal_tepkime, 2010.

- [35] TULYAGANOV, D.U., FERNANDES, H.R, AGATHOPOULOS, S., FERREIRA, J. M. F;“Preparation and Characterization of High Compressive Strength Foams from Sheet Glass”, J Porous Mater 13; 133-139, 2006.
- [36] http://www.raf.com.tr/urun_1234_foamglas%C2%AE-cam-kopugu-isi-yalitimi.html, 2010.
- [37] TULYAGANOV, D.U., FERNANDES, H.R, FERREIRA, J. M. F; “Preparation and Characterization of Foams from Sheet Glass and Fly Ash Using Carbonates as Foaming Agents , Ceramics International 35; 229-235, 2009.
- [38] BERNARDO, E., CEDRO, R., FLOREAN, M., HREGLICH, S;“Reutilization and Stabilization of Wastes by the Production of Glass Foams”, Ceramic International 33; 963-968, 2007.
- [39] ERENOĞLU, O. M; “Tesisat Yalıtımında Elastomerik Kauçuk Köpüğü Malzemelerinin Kullanılma Nedenleri”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yalıtım Kongresi, Eskişehir-Türkiye, 23-24-25 Mart 2001.
- [40] <http://www.mowcoproducts.com/insulation-image/cellular-block-d.jpg>, 2010.
- [41] http://maluyam.pau.edu.tr/?sayfa_no=65, 2010.
- [42] ERCENK, E.; “ZnO - % 6 Bi₂O₃ İkili Sisteminde İlavesinin Mikroyapı Ve Tane Büyüme Kinetiğine Etkileri”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Haziran, 2005.
- [43] ÖZDEMİR, İ.; “Yüksek Fırın Curuflarından Yapı Malzemesi Üretim Koşullarının Araştırılması ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eylül, 2003.
- [44] AKSOY, F.A.; “ Porselen Üretiminde Bazaltın Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mayıs, 2007.
- [45] HİÇYILMAZ, C., ÖZBAŞ, K.E., KÖK, M.V., KARACAN, Ö.; “Türkiye 11. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı”, Bartın-Amasra, 10-12 Haziran 1998.
- [46] TOYDEMİR, N.; “Cam Yapı Malzemeleri”, Sakarya Gazetecilik ve Matbaacılık Tic. A.Ş., Eskişehir, 1990.
- [47] YILMAZ, Ş.; “Cam-Seramik Üretim Teknolojileri Ders Notları” Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Güz Dönemi, 2008.

- [48] <http://www.fenokulu.net/portal/Sayfa.php?Git=KonuKategorileri&Sayfa=KonuBaslikListesi&baslikid=148&KonuID=703>, 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Anıl Şahin, 1985 yılında Konya’ da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Konya’ da tamamladı. 2003 yılında Konya Karatay Anadolu Lisesini bitirdi. 2004 yılında Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’nde başladığı Seramik mühendisliği eğitimini başarı ile tamamlayıp 2008 yılında mezun oldu ve Seramik Mühendisi unvanını aldı. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitimine başladı.