

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UÇUCU KÜL VE CAM ATIKLARINDAN ÜRETİLEN
SERAMİKLERİN ÖZELLİKLERİNE ZnO KATKISININ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mustafa ÇETİN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şenol YILMAZ

Ocak 2019

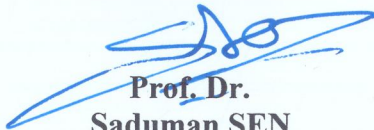
T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


UÇUCU KÜL VE CAM ATIKLARINDAN ÜRETİLEN
SERAMİKLERİN ÖZELLİKLERİNE ZnO KATKISININ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

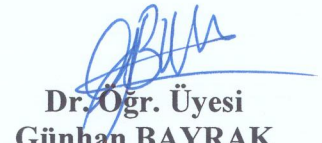
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mustafa ÇETİN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 16/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Şaduman ŞEN
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Şenol YILMAZ
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Günhan BAYRAK
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mustafa ÇETİN

16/01/2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında değerli fikir ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, her türlü teşvik ve fedakârlığı esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şenol YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında her türlü olanaklarından yararlandığım Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na ve teknisyenlerine teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımda yanımda yer alan ve numunelerimizin hazırlanmasında bilgi ve tecrübeleri ile yardımını esirgemeyen, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Ediz ERCENK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında yardımını esirgemeyen dostluğu ve samimiyeti ile yanımda olan Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi dostum Cansu KARAKAYA'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimimi tamamlayabilmemde en büyük paya sahip, maddi, manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili abim Ali YILDIRIM ve ablam Zeliha YILDIRIM'a ve hayatım boyunca varlığıyla bana güç veren canım annem Sabiha ÇETİN'e tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ VE AMAÇ	1
BÖLÜM 2.	
SERAMİK MALZEMELER	4
2.1. Seramiğin Tanımı ve Tarihçesi.....	4
2.2. Türkiye’de Seramik Sektörü	8
2.3. Seramik Malzemelerin Sınıflandırılması.....	11
2.3.1. Isıya dayanıklı seramikler.....	12
2.3.2. Pişmiş seramik kil ürünleri	15
2.3.3. İnce ve beyaz pişmiş seramik ürünler.....	15
2.3.4. Teknik seramikler.....	17
2.4. Seramik Malzemelerin Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırılması....	18
2.5. Seramik Malzemelerin Kalitatif Sınıflandırılması.....	20
2.6. Seramik Hammaddeler.....	22
2.6.1. Kil.....	22
2.6.2. Kaolen.....	24
2.6.3. Feldspat.....	26

2.6.4. Kuvars.....	30
2.7. Seramiklerin Genel Özellikleri.....	33
2.7.1. Fiziksel özellikler.....	33
2.7.2. Mekaniksel özellikler.....	33
2.7.3. Kimyasal özellikler.....	34
2.7.4. Termal özellikler.....	34
2.7.5. Manyetik özellikler.....	34
2.7.6. Elektriksel özellikler.....	35
2.8. Seramiklerin Üretim Yöntemleri.....	35
2.8.1. Hammadde seçimi.....	35
2.8.2. Hammaddelerin öğütülmesi.....	36
2.8.3. Şekillendirme.....	37
2.8.3.1. Presle şekillendirme.....	37
2.8.3.2. Plastik şekillendirme.....	37
2.8.3.3. Dökümle şekillendirme.....	37
2.8.4. Pişirme.....	38
2.8.5. Sinterleme.....	39

BÖLÜM 3.

UÇUCU KÜLLER	43
3.1. Uçucu Küllerin Tanımı ve Sınıflandırılması.....	43
3.2. Uçucu Küllerin Mineralojik ve Kimyasal Yapıları.....	45
3.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri.....	47
3.3.1. Görünüş.....	47
3.3.2. Tane boyutu.....	48
3.3.3. Özgül ağırlık.....	48
3.3.4. Karbon miktarı.....	48
3.4. Uçucu Küllerin Manyetik Özellikleri.....	49
3.5. Uçucu Küllerin Puzolanik Özellikleri.....	49
3.6. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri.....	50
3.7. Termik Santrallerde Atık Uçucu Küllerin Toplanması.....	51
3.8. Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Kullanım Alanları.....	53

3.8.1. Uçucu küllerin tuğla üretiminde kullanımı.....	54
3.8.2. Uçucu küllerin çimento ve beton yapımında kullanımı.....	56
3.8.3. Uçucu küllerin hafif agrega yapımında kullanımı.....	59
3.8.4. Uçucu küllerin zemin uygulamalarında kullanılması.....	59
3.8.5. Uçucu küllerin gaz beton yapımında kullanımı.....	60
3.8.6. Uçucu küllerin diğer alanlarda kullanımı.....	61

BÖLÜM 4.

KARO SERAMİK YAPI MALZEMELERİ.....	62
4.1. Karo Seramik Yapı Malzemelerinin Tanımı.....	62
4.2. Karo Seramik Bünyelerinin Hazırlanması.....	63
4.3. Seramik Karoların Hammaddeleri.....	63
4.3.1. Kaolenler.....	64
4.3.2. Killer.....	65
4.3.3. Kuvars.....	65
4.3.4. Feldspat.....	66
4.3.5. Pegmatitler.....	67
4.3.6. Kalker-mermerler ve dolomit.....	68
4.3.7. Magnezit.....	68
4.4. Fayans (ak çini) Türleri.....	69
4.4.1. Feldspatik fayans.....	69
4.4.2. Kalkerli fayans.....	70
4.4.3. Magnezitli fayans.....	71
4.5. Yer ve Duvar Karolarının Üretimi.....	71

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	74
5.1. Çalışma Programı.....	74
5.2. Numunelerin Üretimi.....	75
5.2.1. Numune hazırlama.....	75
5.2.2. Harmanlama ve kalıplama.....	77
5.2.3. Kurutma ve sinterleme.....	77

5.3. Deney Numunelerine Uygulanan Testler.....	77
5.3.1. Pişme küçülmesi.....	77
5.3.2. Gözeneklilik ve yoğunluk ölçümü.....	78
5.3.3. Su emme.....	78
5.3.4. Donma testi.....	79
5.3.5. Pamuklaşma testi.....	79
5.3.6. Basma testi.....	79
5.3.7. X- ışını difraksiyon analizi (XRD).....	80
5.3.8. Taramalı electron mikroskobu (SEM) ve EDS analizi.....	80
BÖLÜM 6.	
DENEYSSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ.....	81
6.1. Pişme Küçülmeleri.....	81
6.2. Numunelerin Su Emme, Gözenek ve Bulk Yoğunluk Ölçümleri.....	84
6.3. Numunelerin Donma Testi Sonuçları.....	89
6.4. Numunelerin Pamuklaşma Testi Sonuçları.....	91
6.5. Basma Testi.....	93
6.6. X-Işınları Difraksiyon Analizleri (XRD).....	94
6.7. Numunelerin Mikroyapı Analizleri.....	98
BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	107
7.1. Sonuçlar.....	107
7.2. Öneriler.....	109
KAYNAKLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	116

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A_0	: Yük etkisi altında kalan numunenin yüzey alanı
d_s	: Saf suyun yoğunluğu (1 g/cm^3)
EDS	: Enerji Dağımlı X-Işınları Spektroskopisi
F_b	: Basma mukavemeti
h_k	: Numunenin kurutma sonrası çap uzunluğu
h_p	: Numunenin pişme sonrası çap uzunluğu
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
P_k	: Kırılma anındaki yk
PVC	: Polivinilklorür
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
W_a	: Kuru ağırlık
W_b	: Sıvı içerisindeki ağırlık
W_c	: Sıvıdan çıkarılıp kabaca kurulan numune ağırlığı
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu
Zn00	: ZnO içermeyen numune
Zn05	: % 5 ZnO içeren numune
Zn10	: % 10 ZnO içeren numune
Zn20	: % 20 ZnO içeren numune

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1.	Yapısal karo seramikler.....	72
Şekil 5.1.	Deneysel çalışmaların akım şeması.....	74
Şekil 6.1.	Farklı sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunelerin ZnO miktarındaki artışına bağlı olarak pişme küçülmesindeki değişim.....	83
Şekil 6.2.	Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak pişme küçülmesindeki değişimi.....	83
Şekil 6.3.	Farklı sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunelerin ZnO miktarındaki artışına bağlı olarak gözenek miktarındaki değişim.....	85
Şekil 6.4.	Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak gözenek miktarındaki değişimi.....	85
Şekil 6.5.	Farklı sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunelerin ZnO miktarındaki artışına bağlı olarak su emme miktarındaki değişim.....	86
Şekil 6.6.	Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak su emme miktarındaki değişimi.....	87
Şekil 6.7.	Farklı sinterleme sıcaklıklarında ZnO miktarındaki artışa bağlı olarak bulk yoğunluk değişimi.....	88
Şekil 6.8.	Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak bulk yoğunluk değişimi.....	88
Şekil 6.9.	Farklı sinterleme sıcaklıklarında ZnO miktarındaki artışa bağlı olarak donma % ağırlık kaybı.....	90
Şekil 6.10.	Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak donma % ağırlık kaybı.....	90
Şekil 6.11.	Pamuklaşma testi sonrası zayıf pamuklaşmanın gerçekleştiği	

	numunelerin görüntüsü.....	91
Şekil 6.12.	900°C’de sinterlenen dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO içeren numunelerin XRD grafiği.....	94
Şekil 6.13.	950°C’de sinterlenen dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO içeren numunelerin XRD grafiği.....	95
Şekil 6.14.	1000°C’de sinterlenen dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO içeren numunelerin XRD grafiği.....	96
Şekil 6.15.	1050°C’de sinterlenen dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO içeren numunelerin XRD grafiği.....	97
Şekil 6.16.	900°C’de sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri; (a) Zn00, (b) Zn05, (c) Zn10, (d) Zn20.....	98
Şekil 6.17.	950°C’de sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri; (a) Zn00, (b) Zn05, (c) Zn10, (d) Zn20.....	99
Şekil 6.18.	1000°C’de sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri; (a) Zn00, (b) Zn05, (c) Zn10, (d) Zn20.....	99
Şekil 6.19.	1050°C’de sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri; (a) Zn00, (b) Zn05, (c) Zn10, (d) Zn20.....	100
Şekil 6.20.	1050°C’de sinterlenen Zn20 numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü.....	100
Şekil 6.21.	1050°C’de sinterlenen Zn20 numunesinin verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 1 nolu bölgenin EDS analizi.....	102
Şekil 6.22.	1050°C’de sinterlenen Zn20 numunesinin verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 2 nolu bölgenin EDS analizi.....	103
Şekil 6.23.	1050°C’de sinterlenen Zn20 numunesinin verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 3 nolu bölgenin EDS analizi.....	104
Şekil 6.24.	1050°C’de sinterlenen Zn20 numunesinin verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 4 nolu bölgenin EDS analizi.....	105
Şekil 6.25.	1050°C’de sinterlenen Zn20 numunesinin verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 5 nolu bölgenin EDS analizi.....	106

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Uçucu kül bileşenlerinin maksimum ve minimum miktarları.....	46
Tablo 4.1.	Karo seramik türleri.....	62
Tablo 4.2.	Seramik karolar ile ilgili Avrupa ve Türk Standartları.....	73
Tablo 5.1.	Seyitömer uçucu külleri ve atık pencere camlarının ağırlıkça (%) kimyasal bileşimleri.....	75
Tablo 5.2.	Deneyde kullanılan ZnO oranları ve numune kodları.....	76
Tablo 5.3.	Hazırlanan bileşimlerin hesaplanan kimyasal analizleri....	76
Tablo 6.1.	Kurutma ve pişme işlemi sonrası ölçüm sonuçları.....	81
Tablo 6.2.	Numunelerin % pişme küçülmeleri.....	82
Tablo 6.3.	Numunelerin gözenek miktarı, su emme ve bulk yoğunlukları.....	84
Tablo 6.4.	Numunelerin donma testi öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri.....	89
Tablo 6.5.	Numunelerin ZnO oranları ve sinterleme sıcaklıklarına göre pamuklaşma testi sonuçları.....	92
Tablo 6.6.	Numunelerin ZnO oranları ve sinterleme sıcaklıklarına göre basma testi sonuçları.....	93

ÖZET

Anahtar kelimeler: Uçucu kül, atık cam, ZnO, seramik

Bu çalışmada uçucu kül ve atık cam karışımlarından üretilen seramik malzemelere ZnO katkısının etkisi incelenmiştir. Ağırlıkça % 0, 5, 10 ve 20 oranlarında ZnO, uçucu kül ve atık cam karışımına ilave edilerek bileşimler hazırlanmıştır. Silindirik numuneler preslenerek şekillendirilmiş ve 900, 950, 1000 ve 1050 °C' de 2 saat süre ile sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numunelerin pişme küçülmesi, bulk yoğunluğu, görünür gözenekliliği, su emmesi, donma, pamuklaşma özellikleri ve basma mukavemeti belirlenmiştir. Ayrıca X-ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile de sinterlenen numuneler karakterize edilmiştir. Böylece ZnO katkısının uçucu kül ve atık cam tozu karışımlarından üretilen seramiklerin özelliklerine etkileri incelenmiştir.

THE EFFECT OF ZnO ADDITION ON THE PROCESSING OF CERAMIC TILES FROM WASTE GLASS AND FLY ASH

SUMMARY

Keywords: Fly ash, waste glass, ZnO, ceramic

In this study, the effect of ZnO addition on ceramic materials produced from fly ash and waste glass mixtures was investigated. ZnO in the range of 0, 5, 10, 20 wt. % have been added into waste glass and fly ash mixture. Cylindrical specimens were shaped by pressing and were sintered at 900, 950, 1000 and 1050 °C for 2 h. Sintered specimens were exposed to the firing shrinkage, bulk density, apparent porosity and water absorption, freeze, efflorescence and compressive strength. Furthermore, the samples were also characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) analysis. Thus, the effects of ZnO addition on the properties of ceramics produced from fly ash and waste glass powder mixtures were investigated.

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Dünya çapında insan nüfusundaki artışa bağlı olarak özellikle kentsel alanlarda ilerlemesine ihtiyaç duyulan inşaat sektörünün ve sanayide meydana gelen büyümelerin ortaya büyük miktarda enerji talebini çıkardığı bilinmektedir [1,2]. Bunun yanında dünya üzerinde bulunan tüm fosil enerji kaynakları tükenmektedir ve bu enerjilerin üretimleri sırasında ortama verilen zararlı gazların salınımı insanlara büyük ölçülerde zarar vermektedir. Sektörlerin içerisinde özellikle inşaat sektörü, toplam enerji tüketim payının %30'unu elinde tutarak, yeryüzünde en çok enerji tüketen sektörlerden olmuştur [2,3].

Son senelerde, dünyanın kendi kendini temizleme kapasitesini aşarak artan çevre kirliliği ile mücadele etmek amacıyla dünya çapında çok sıkı düzenlemeler uygulanmakta ve bu konuda kurallar konulmaya devam edilmektedir. Bu çerçevede, sürdürülebilir kalkınma uluslararası bir kavram olarak vurgulanmış olup, endüstrinin çevresel etkilerini azaltmak için yoğun çaba sarf edilmektedir[4]. Artmakta olan gaz salınımlarının hem doğanın fiziki bütünlüğünü hem de insanın yaşam alanını tehdit etmesi nedeniyle günümüzde üretilen enerjinin yanı sıra doğal dengenin bozulmaması da hedef olarak gösterilmiştir. Bu sebeplerle ihtiyaç duyulan enerji üretildikten sonra da etkili ve verimli bir şekilde kullanılmalıdır [2,3].

Günümüzde sanayi ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak sanayide üretim esnasında çıkan atık ve yan ürünlerde önemli ölçülerde artışlar olmuştur. Yeni ve ileri teknoloji malzeme üretme isteği ile birlikte atıkların ve yan ürünlerin yeniden değerlendirilerek ekonomik kazanç olarak karşımıza çıkması hedeflenmektedir. Böyle bir olguda hem var olan doğa dengesinin korunması hem de daha kaliteli malzemeler üretilerek daha iyi yaşanabilir alanların oluşturulmasına çalışılmaktadır [5,6]. Uluslararası enerji ajansı (IEA) istatistiklerine göre fosil yakıtlar ile enerji

üretimi 2030 yılına kadar dünya'ya hakim olmaya devam edecek olup bu sırada açığa çıkan yan ürünler de değerlendirilmeye devam edilecektir [2]. Gelişmiş ülkelerin sahip oldukları sanayiye bağlı olarak onların üretimlerinin devamlılığı ve üretimde çeşitliliği arttırmaları açısından enerji vazgeçilmez bir unsurdur. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler içinse hem enerji üretimi açısından dışa bağımlılığı azaltacak hem de geri kazanım yöntemleri ile daha kaliteli ve farklı malzemeler üretebilecektir [7]. Ülkemiz gereksinim duyduğu elektrik enerjisinin büyük bir kısmını termik santrallerden karşılamaktadır. Türkiye 2014 yılı verilerine göre ürettiği elektrik enerjisinin %29,2'sini termik santraller aracılığıyla gerçekleştirmiştir. Termik santrallerde yakıt olarak yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise % 20-40'ı küldür [8].

Termik santrallerde enerji üretmek için yakıt olarak farklı kompozisyonlara sahip kömürlerin kullanılması sonucunda farklı özellik ve farklı tipte uçucu küller elde edilmektedir [9]. Bunun yanı sıra teknik olarak 1000 mw'lık bir termik enerji santralinden bir senede ortalama yaklaşık olarak 650.000 ton uçucu kül elde edilmektedir. Ayrıca bu miktardaki uçucu kül üretiminin depolanabilmesi için yıllık 60.000 m² depolama alanı gereklidir. Dünya genelinde ise 2000'li yılların başında 360 milyon ton uçucu kül depolandığı bildirilmiştir [8]. Öteki yandan 2012 yılında ülkemizde bulunan termik santrallerden yıllık 23,8 milyon ton uçucu kül elde edilmektedir. Türkiye'de termik santrallerde üretilen uçucu küllerin %10'a yakını geri dönüşüm işlemlerinde kullanılmaktadır. Geriye kalan %90'lık kısım ise kontrollü olarak depolanmakta veya doğaya bırakılmaktadır [8,9].

Uçucu küller termik santrallerde kömürün yüksek sıcaklıkta yakılması sırasında meydana gelen baca gazları ile sürüklenen çok ince boyutlu partiküllerdir. Uçucu küllerin baca gazları ile birlikte atmosfere çıkışını engellemek için elektrostatik ve mekanik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle geliştirilen filtrelerin alt kısımlarındaki haznelere uçucu küllerin birikmeleri sağlanır. Pulverize halindeki bu kömürlerin yanmasıyla yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu külleri oluşturan bileşenler uçucu küllerin değerlendirilmesine olanak sunmaktadır. Uçucu küller kimyasal yapısında genel olarak Fe, Si, Ca, Al ve S bulundurmaktadır. Elde edilen

uçucu küller başta inşaat sektöründe olmak üzere plastik, çimento, su arıtımı, seramik, beton, hafif agrega, kara yolları, zirai amaçlar, petrol kuyuları sondajlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçucu küller özellikle yapı malzemelerinin temel taşı olan tuğla üretiminde kullanılan killerin fazla suyunu emerek, şişmesini ve çatlamasını da önlemektedir. Külün puzolanik özellik ve ince olması sebebiyle pişen malzemede mukavemet artışına sebep olması ve plastik özelliği olmamasından dolayı ana malzemeye bağlayıcı olarak da katkıda bulunmaktadır ve aynı zamanda birçok çalışmada uçucu küllerin pişirim işlemlerinde enerji tasarrufu sağladığı vurgulanmıştır. Uçucu külün karakteristikleri ve üretimi: yakılan kömür türü, işlem biçimi, termik santralin özellikleri, kömür bileşenleri ve yakma sistemine göre değişmektedir. Bu durum uçucu küllerin kullanımı ve değerlendirilmesi açısından farklı çalışmaların yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır [8,9].

Bu çalışmada atık cam tozu ve Kütahya Seyitömer termik santrali uçucu kül karışımına dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO ilavesi yapılarak üretilen seramiklerin özelliklerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen dört farklı karışımdan üretilen silindirik numuneler 900, 950, 1000 ve 1050°C'de 2 saat süre ile sinterlenmiş olup, sinterlenen numunelerin pişme küçülmesi, bulk yoğunluğu, görünür gözenekliliği, su emme, donma, pamuklaşma ve basma özellikleri incelenmiştir. Ayrıca X-ışını difraksiyonu (XRD) ile faz analizleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile de mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Böylece ZnO katkısının uçucu kül ve atık cam tozu karışımlarından üretilen seramiklerin özelliklerine etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2. SERAMİK MALZEMELER

2.1. Seramiğin Tanımı ve Tarihçesi

Seramik kelimesine tanımlama yapılırken, bu tür ürünlere adını veren tanımlama Tarih'te ilk olarak eski Yunanca'dan gelmektedir. Keramos kelimesi eski Yunanca'da geçen ve boynuz anlamıyla günümüze aktarılan bir kelimedir. Eski Yunanlılar özel günlerde ve törenlerde bir boynuz yani bir kap olarak kullandıkları nesnelere bu gelenekselleşmiş tabir olan keramos olarak ifade etmişlerdir. Kullanılan kapların yerine seramikler geçtiğinde kelime olarak keramos tabirinin kullanımı devam etmiştir [10,11].

Seramik, genel olarak şu şekilde açıklanabilir: Organik olmayan malzemelerin meydana getirdiği bileşimlerin, değişik metotlar ile şekil verildikten sonra, sırlanarak ve ya sırlanmadan iyice sertleşip, dayanıklılık kazanacak kadar pişirilmesi teknolojisi ve bilimidir. Günümüzde ise bu tanımlama şöyle de yapılabilmektedir: Ametallerin meydana getirdiği, yani inorganik olarak görülen bütün mühendislik malzemeleri ve bunlara bağlı ortaya çıkan ürün gruplarıdır. Seramikler bir diğer açıdan doğadan doğal yollarla elde edilen ürünler olduğu için ekolojik ürünlerdir [12]. Seramik malzemeler günümüzde nitrürlü, borürlü, karbürü olarak üretilirken, önemli kompleks silikatları ve oksitleri yapısında barındırır. Seramik malzemeler farklı kompozisyonlarda bulunduğundan, cam ve kristal yapıları içerebilir ve aynı zamanda yapısında genelde porozite bulundurabilir. Bu yapı bileşenlerinin malzeme içerisinde dağılımlarının ve miktarlarının farklı olması, seramik malzemelere farklı özellikler yüklemektedir. Örneğin: yalıtkan özellik gösteren bir seramik malzemeyi mevcut fazların düzenini değiştirip, malzemeyi iletken hale getirmek ya da bu durumun tersi mümkün olabilmektedir. Bu sebeplerle seramiklerin geliştirilmesinde ana düşünce şekli mikroyapı olmaktadır [5].

Endüstrinin genel olarak gelişebilmesi için en kıymetli yapı taşları seramikler olmuştur. Örneğin: metalurji endüstrisi için refrakterler, otomotiv sektörü ve makine, takım için aşındırıcılar ve hatta nükleer güç enerji santralleri için uranyum oksit yakıtlar değerli unsurlar olmuştur. Günümüzde cep telefonu, bilgisayar gibi birçok elektronik cihaz için ileri teknoloji seramikler elektronik yapı elemanlarını oluşturduğundan dolayı vazgeçilmezdir. Ayrıca ileri seramik malzemelerin koruyucu olarak yüzey teknolojisinde kullanımı ve nano parçacık, visker, fiber ya da levha olarak polimer ve metal malzemelerle kompozit halinde kullanımları yaygınlaşmaktadır [5,13].

Seramik malzemelerin kullanımını cazip kılan ve birçok alanda farkını ortaya koyan başlıca sebepler aşağıda belirtilmiştir:

1. Kimyasal açıdan kararlı olmaları
2. Sert yapıya sahip olmaları
3. Hammaddelerinin ucuz olması ve kolay temini
4. Yüksek sıcaklıklara dirençli olmaları
5. Metallere kıyasla oldukça hafif olmaları
6. Aşınma ve erozyona karşı dayanıklı olmaları
7. Korozyona karşı yüksek direnç göstermeleri
8. Düşük sürtünme katsayılarına sahip olmaları [5].

Seramiğin tarihteki bilinen ilk ana malzemesi su geçirmeyen killi toprak, çamur ve ya balçık olmuştur. Basit ve iddiasız gibi gözükse de bu malzemenin rahatlıkla şekil verilebilmesinden ve kaynak olarak kolay temin edilebilmesinden dolayı kullanım miktarı hızla artmıştır. Seramiklerin plastik özellik taşımaları, topraktan imal edilmeleri, seramik üretiminin ve sanatının ilerlemesine büyük ölçüde katkı sağlamıştır. Evrenin ve insanlığın var oluşundan bu güne yani ortalama 2 milyon yıl önce Paleolitik çağ başlamış ve günümüzden 10 bin yıl önce sonlanmıştır. Bu süreçte insanlar doğada hayatlarını devam ettirebilmek için toprakları kullanmış ve kendilerine el aletleri yapmaya başlamışlardır. Üst Paleolitik devirde Orta Avrupa'da bazı pişmiş topraklar tespit edilse de Anadolu'da buna benzer malzemelere

rastlanılmamıştır. Neolitik Çağ'la aslında seramik esaslı malzemelerin üretimi ilk olarak anlam kazanmıştır. Çünkü bu dönemde kilin ateşte pişirilmesi sayesinde hem seramik üretimi hem de seramikte sanat anlayışı kavramları değer kazanmıştır. Günümüzde ise aynı şekilde seramik endüstrisinin ve sanat zihniyetinin hızla geliştiği bilinmektedir [14,16].

Kilin pişirilmesi ile birlikte insanların temel ihtiyaçları olan kap-kacak çeşitleri bu sayede karşılanmaktaydı. Aynı zamanda şekil alabildiğinden insanlar bu malzemeyi yani seramikleri benimsemiş ve haberleşmede, belgelemede, kiremit, tuğla, çömlek, çanak, süs eşyaları ve hatta yakılan ölümlerin küllerinin saklandığı kaplar ve farklı ocaklar gibi özel anlam taşıyan dinsel törenlerde kullanım alanları bulmuştur. Hatta aynı dönemde çocuklara oyuncak amaçlı yapılmış eserler bile bulunmuştur. Anadolu'da asırlar boyunca zengin kültürünü koruduğu için 8000 yıl öncesine kadar bu bölgede yaşayan insanların bıraktıkları eserler yerini korumaktadır. Anadolu Çatalhöyük' te toprakla ateşin bir araya gelmesi Mayalar döneminden 4000 yıl önce olmuştur. Anadolu' da özellikle Diyarbakır ve Konya' da tamamen insan eliyle yapılan tanrıça idolleri seramiklerin üretimi konusunda anavatan olma yolunda tarihimize ışık tutmaktadır. Bu süreçten sonra insanlığın bilinen tarih öncesinden 2000-3000 sene öncesinde Troya ve Alişar gibi yerlerde, yazının keşfinden sonraki 2000'li yıllarda ise özellikle Asurlu tüccarlar ve devamında Hititler seramik ürünlerin ticaretleri ile farklı alanlara seramikleri taşımaya başlamışlardır [14,16].

Tunç Çağ'ı Anadolu'da gelişimin her yönüyle hızlandığı bir dönemdir. Bu dönemde özellikle Hititler tarihi aydınlatan ve sosyal yaşantılarını kil tabletlere aktararak, birçok değerli seramik yapıt bırakmışlardır. Seramik malzemelerin üretimi için fırınlara ihtiyaç duyulduğundan ve nispeten hassas, gevrek ve kırılgan yapıya sahip olduklarından, göçebe tarzıyla yaşayan topluluklar bu malzeme grubunu kullanmayı tercih etmeyerek, genellikle yerleşik hayata geçmiş ve belirli bir otoriteye sahip topluluklar tarafından tercih edilmişlerdir. Bu durum Orta Asya' da bulunan Türklerin İslamiyet'i kabul etmeleri ve sonrasında yerleşik hayata geçmeleri ile hız kazanmıştır. Karahanlılar, ve Abbasiler gibi Türk ve Arap devletleri dönemlerinde seramik sanatı oldukça hızlı gelişmiştir [14,16].

Seramik üretiminin teknik açıdan gelişmesi açısından en verimli dönemlerden birisi Selçuklular dönemi olmuştur. Çünkü Selçuklular iktidar olarak kalabilmek ve komşularına kendi kültürlerini aşlamak için seramik malzemeleri çok farklı örneklerle mimari yapılarına işlemişlerdir. İslam mimarisinde önemli yer alan çini seramiklerin farklı bir dili olarak çeşitlilik kazandırmıştır. Dönemin farklı devletlerinin kullandığı çiniler devletlerin farklı özelliklerini ve değişik yönlerini de ortaya koymuştur. Günümüz şartlarında da o zamandan bu zamana gelen bu farklı seramik tarzı anlayışı hala devam etmektedir [14,16].

Topraktan imal edilen, dünyada insanların uygarlık tarihi kadar eski olan seramikler insanlara hem günlük yaşantılarında bir bakıma arkadaş olmuş, hem de insanların ihtiyaçlarını karşılamalarına olanak sağlamıştır. Verimli Anadolu topraklarında 8000 yıllık çok uzun bir süreçte seramik malzemeler Anadolu'da yaşayan çok zengin ve farklı kültürlerin etkisinde kalarak insanların hayatlarına dair birçok sırrı üzerinde barındırmıştır. Osmanlı İmparatorluğu döneminde özellikle İslam'ın etkisiyle Kütahya, İznik ve Çanakkale başta olmak üzere sofraya eşyaları, mimari yapı ve süslemeler, dekoratif ürünler gibi birçok eser bırakılmıştır. Ardından Cumhuriyet'in ilan edilmesiyle birlikte, 1929 yılına kadar seramiklerin endüstrisi ve seramik sanatları alanlarında maalesef çok büyük gelişmeler olmamıştır. 1929 yılında çağdaş Türk seramik anlayışını başlatan en önemli adım Namık İsmail'in çabalarıyla çinicilik atölyesi açılmasıdır. 1931 yılında önemli hocalardan olan Hakkı İzzet'in de katılımlarıyla seramik sanatı ve çinicilik endüstrisi hızlı bir gelişim evresine girmiştir. Daha sonra Ankara'da seramik atölyeleri açılarak, seramik atölye sayıları artmıştır. Türk seramik endüstrisi ve Türk seramik sanatı var olan geçmişindeki Anadolu Medeniyetleri ve Türk İslam geleneğinden esinlenerek ve bu akımları da harmanlayarak geleceğe emin adımlarla ilerlemektedir [16].

Anorganik yapıya sahip olan seramiklerin tarihi oldukça eskidir. Asırlarca doğada bozulmadan kalan seramik malzemeler arkeologlar aracılığıyla incelenerek, farklı bölgelerde ne tür toplumların yaşantısının olduğu ve hatta bu topluluklar hakkında özellikle farklı devirlerde yaşayan insanların gelişmişlik seviyeleri ve kültürleri hakkında bilgiler vererek insanlık tarihine de ışık tutmaya devam etmektedir [16].

2.2. Türkiye’de Seramik Sektörü

Yaklaşık 8000 yıl önce Anadolu topraklarında farklı üretim tekniklerimizle başlayan seramik malzeme üretimleri özellikle 1950’li yıllardan itibaren sanayinin hızla gelişmesi ile birlikte seramik malzemelerin üretimlerini de oldukça hızlandırmıştır [14]. Türkiye’de seramik sektörü var olan diğer sektörlerle göre karşılaştırma yapıldığında çok hızlı bir şekilde ilerleme kaydetmiştir. 1990’lı yıllardan bu yana seramik sektörü 60’ın üzerinde firma ile üretimlerini devam ettirmekte ve gelişen sanayide 30 bin kişilik bir istihdam alanı sağlamaktadır. 1960’lı yılların başlarına kadar özellikle seramik kaplama alanı ve teknolojisinde Türkiye yurtdışından oldukça fazla ithalat yaparken bu durum Çanakkale’nin Çan ilçesinde yer alan Çanakkale Seramik Fabrikası A.Ş. üretimleri ile Türkiye’ye seramik kaplama malzemeleri alanında hem dışa bağımlılık oranlarını düşürmüş hem de ihracat yapılarak kazanç yeni kapılarını açmıştır. Sektörün üretim kapasitesi bugün 260 milyon m² düzeyine ulaşmıştır [5].

Türkiye açısından seramik kaplama malzemeleri dış ticaret verileri 2012 – 2016 seneleri arasında analiz yapıldığında 324,4 milyon m² şeklinde gerçekleşmiştir. Tablo 2.1.’deki bu verilere göre 2014 senesine kadar yükselişi devam eden üretimde artış oranları 2 senelik duraksama dönemine girmiştir. Seramik kaplama malzemeleri alanında 2012 senesinde 91,7 milyon m² ihracat yapılırken, 2016 senesinde ihracat 80,9 milyon m² ye kadar düşmüştür. Bu durum Türkiye’ye karşı yapılmakta olan birtakım stratejik hareketlilik ve komşularının dolayısıyla bununla birlikte Türkiye’nin de etkilendiği bir ekonomik savaş tablolarının önüne konulmasının etkisidir [17].

Türkiye seramik sektöründe 60’ dan fazla ülkeyle pazarını genişletmeye devam etmektedir. Teknoloji alanındaki gelişmeler ile birlikte ekonominin gelişmesiyle de yapılan yatırımlar olumlu sonuçlar meydana getirerek Türkiye’ nin seramik pazarlarında hızla büyümesine sebep olmaktadır [12].

Tablo 2.1. Türkiye seramik kaplama malzemeleri pazar analizi (milyon m²) [17].

Yıllar	Üretim	İthalat	İhracat
2012	294,0	4,6	91,7
2013	304,1	5,3	87,8
2014	339,8	5,4	84,7
2015	336,6	3,8	77,1
2016	324,4	3,0	80,9

Türkiye mutfaklarda ve banyolarda kullanılan lavabolar, klozetler, rezervuarlar, duvar ve yer seramik karoları, mutfak eşyaları, sofras ve süs eşyaları gibi birçok alanda üretim yaparken bir yandan da bilim ve teknoloji ışığı altında adımlarını atmaya devam etmektedir. Seramik kaplama malzemeleri alanında kendini geliştirmiş ve pazarda ciddi söz sahibi olma yolunda ilerleyen Türkiye aşağıdaki alanlarda da önemli gelişmeler kaydetmiştir. Aşağıda belirtilen çalışma alanları en hızlı ilerleme kaydetme hedeflediğimiz alanlardır [12].

Bunlardan bazıları ise ;

1. Refrakter seramik malzemeler,
2. Teknik seramik malzemeler,
3. Seramik sağlık araçları,
4. Seramik kaplama malzemeleri, (Yer ve duvar için)
5. Mutfak ve sofras eşyaları [12].

Türkiye seramikte kaplama malzemeleri alanında Avrupa pazarının %11'inin ihtiyaçlarını üretmektedir. Bu alanda dünyada ise 260 milyon m² üretimiyle ilk ona girmeyi başaran Türkiye 2017 yılındaki verilere göre 9. Sırada yer almıştır. 24 firma seramik kaplama malzemeleri alanında üretimlerini devam ettirirken, diğer seramik sağlık araçları sektöründe 40 firma çalışmalarını faal olarak devam ettirmektedir.

Sektörde atılan teknoloji ve otomasyon adımları doğrultusunda daha kaliteli ürünler üreterek gelişimini bu alanda hızlı bir şekilde devam ettirmektedir. Seramik sektöründe Türkiye ihracatı inşaat açısından direk bağlılık göstermeleri sebebiyle duvar ve yer seramik kaplama malzemeleri 2017 yılında 551 milyon dolarlık ihracat yapılmıştır ve bu durum Türkiye ekonomisine ciddi boyutta maddi katkılar sağlamaktadır. ABD, Kanada, İngiltere, Almanya ve öteki yandan İsrail Türkiye'nin büyük ölçülerde ihraç yaptığı ülkeler olma özelliğini kazanmıştır. Değerlendirilmesi gereken ikinci etkili alan olan seramik sağlık araçları alanında ise Türkiye'nin ihracat rakamları 230,8 yaklaşık olarak milyon dolar civarındadır. Bu alanda İtalya, Almanya, Fransa, ABD, ve İngiltere başta seramik ihraç ettiğimiz ülkeler özelliği taşımaktadır [18].

Dünyada önemli pazar ve üretim payına sahip olan seramiklerin alt dallarından birisi olarak sayabileceğimiz cam sektörü de ülkemizde hızlı gelişmeler göstermektedir. Ülkemiz camı oluşturan dolomit, kuvars ve kum soda gibi hammaddelerin de zengin olarak bulunduğu verimli alanlar içerir. Bu nedenle Türk cam sanayi kullandığı hammaddelerin yüzde 98'ni kendi kendine temin etmektedir. Yaklaşık 25 bin kişinin istihdam edildiği bu alanda Türkiye cam üretimlerinin %90'nı Şişecam gerçekleştirmektedir. Cam üretimlerinin 2014 yılı verilerine göre ülkemize 8,6 milyon TL'lik ekonomik katkısı olmuştur. Dünya cam üretim hacmi ise 140 milyar dolar seviyesini aşmış olup, Türkiye bu alanda da geliştirdiği teknolojiler ile kendi pazar hacmini arttırmayı hedeflemektedir [18].

Refrakter seramik malzemeler aşınma ve sürtünmeye karşı dayanıklı, korozyona karşı direnç gösterebilen, yüksek sıcaklıklarda ve basınçlı ortamlarda işlevselliğini kaybetmeyen önemli malzeme gruplarından. Ülkemizde 17 farklı firma olmak üzere bu alanda şekilli, özellikle demir çelik sektörüne dönük çalışan ve şekilsiz inşaat ve demir çelik gibi uygulama alanlarında kullanılan refrakter seramik malzemelerin üretimleri mevcuttur. İzolasyon yapı malzemeleri ve harçlar gibi ürünlerin doğal hammaddelerini genel olarak ülkemizden karşılarken, bazı sentetik hammaddeler yurtdışından ithal yoluyla üretimlerde kullanılmaya devam

edilmektedir. Türkiye kendisinin ihtiyaç duyduğu refrakter seramik malzemelerin %80'ni dış ülkelere ihtiyaç duymaksızın üretebilmektedir [5].

Güncel olarak Türkiye 2017 son çeyreğinde ihracat ekonomisi katkı endeksine göre sahip olduğu farklı 18 sanayi sektörü arasından seramik sektörü hızla yükselmeye devam etmekte ve % 18,27'lik ekonomik katkısını % 22,31'lük bir seviyeye taşımayı başarmıştır. İnşaat seramiklerini %6,53 katkı oranıyla giyim eşyaları ve %4,40 katkı oranıyla mobilya sektörü takip etmiştir. Türkiye 2017 yılında seramik kaplama malzemeleri alanında Dünya'da 8. ve sağlık araç gereçleri ve inşaat karo üretimleri alanlarında ise 4. konumda olup, önemli ihracatçı ülkeler listesinde yer almayı başarmıştır. Türkiye inşaat sektöründe kullanılan karolarda Avrupa'da 3. ve sağlık araç gereçleri alanında Avrupa'nın en büyük üreticisi konumuna gelmiştir [19,20].

2017 yılının son kısmında Avrupa ve Dünya'da önemli ihracatçı ülke durumuna gelen Türkiye %8-9 aralığında bir büyüme ivmesi ile üretimlerini devam ettirmiş olup, 2018 yılından 2023 yılına kadar ise sektörde büyüme oranlarının özellikle çift haneli rakamlara taşınması hedeflenmektedir. Seramik malzemeler sektörünün pazar değeri anlaşılmış olup, bu alanda yetkili merciler ekonomik olarak desteklerini devam ettirmekte ve bu alanda her türlü üretim ve teknolojik yatırımlar amacıyla teşviklerde bulunmalarını sağlayarak, seramik sektöründeki büyümenin etkisiyle daha yüksek seviyede ekonomik kalkınmayı desteklemek istenmektedir [20].

2.3. Seramik Malzemelerin Sınıflandırılması

Seramik malzemeler için mikro yapılarında meydana gelebilecek en küçük değişimlerde bile çok farklı özellikler göstermelerinden dolayı standart bir sınıflandırma metodu bulunmamaktadır. Seramik malzemelerin teknik ve yapısal olarak özelliklerinin değişmesi durumu mikro yapılarının incelenmesi sonucunda ortaya çıkan atomların kristal yapı içerisinde dağılımları ve yaptığı bağlarla direk olarak bağlantılı olması sebebiyle malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişim ve geliştirme olanağı sunmuştur. Son senelerde teknoloji ile de iç içe yer alan seramik sektöründeki gelişmeler bir yandan seramik ürünlerde çeşitliliğe neden

olmakta, bir yandan da teknolojinin ilerlemesine katkıda bulunarak daha verimli çalışma olanakları sunmaktadır. Literatürde yer alan farklı bilim insanları ve ya araştırmacılar farklı şekillerde sınıflandırma yöntemleri kullanmışlardır. Yaygın olarak kullanılan sınıflandırma çeşidi şu şekildedir:

1. Isıya dayanıklı seramikler.
2. Pişmiş seramik kil ürünleri.
3. İnce ve beyaz pişmiş seramik ürünler.
4. Teknik seramikler.

2.3.1. Isıya dayanıklı seramikler

Isıya dayanıklı seramik malzemeler, seramik esaslı refrakter malzemeler olarak da adlandırılmaktadır. Refrakter malzemelerin genel olarak tanımlanma biçimi yüksek sıcaklıklara ve ortamdaki kaynaklı yüksek sıcaklıklarda katı, sıvı ve gazların fiziksel ve kimyasal etkilerine karşı direnç gösterebilen malzemelerdir. Pratik olarak bir başka deyişle, basit bir kömür sobasından sanayide kullanılan ağır fırınlara kadar uzanan, yüksek sıcaklıklara dayanan malzemelerdir. Bu bağlamda bu özellikleri sağlayabilen metal ya da alaşımlar refrakter malzeme grubuna dahil edilmezler. Refrakter malzemeler yapısında metalik bağları içerebilir ancak malzemenin tamamı sadece bu bağlarla örtülü olmamalıdır. Diğer bir tanımlamaya göre, kabaca refrakter malzemeler yüksek sıcaklıklara kadar dayanıklılık gösteren bir metal ya da metal alaşımı olmayan malzeme türleridir [21,22].

Seramik malzemelerin keşfedilmesindeki gibi refrakter malzemelerde yine ilk olarak ateşin bulunmasıyla insanların hayatlarına girmeyi başarmıştır. Yapılan birtakım araştırmalar neticesinde insanoğlunun yaptığı ilk tuğlanın M.Ö.3200'lü yıllarda yapıldığı ortaya çıkmıştır. Bu sebeple refrakter malzemelerin üretimi aslında seramik esaslı malzemelerin üretimi kadar eski olduğunu göstermektedir. Modern olarak inşaat sektöründe kullanılmak üzere şekilli refrakter üretme tekniği kullanılarak 1700'lü yıllarda İngiltere'de farklı tipte bir inşaat tuğlası üretmeyi başarmıştır.

Günümüzde Demir-Çelik sektöründe yaşanan hızlı gelişmeler sayesinde refrakter seramiklerin çeşitliliği ve üretimleri artmış ve artmaya da devam etmektedir [22].

Günümüzde refrakter malzemeler; cam, çimento, kurşun, kireç, bakır ve Demir-Çelik, seramikler gibi birçok sektörde kullanım açısından olmazsa olmaz denilebilecek malzemelerdir. Bu sektörlerin yapı taşı refrakter malzemeler olup, olmaması durumunda cam, çimento, seramik, demir ve çelik bir açıdan da refrakterlerin kendisini üretmek imkânsızlaşır. Hayat koşullarımız ele alındığında bize kolaylık sağlayan ve estetik güzellik katan malzemelerin üretimleri için bu malzeme grubuna ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizde ilk olarak 1934 yılında ilk refrakter malzememiz olan sinterli manyezitin üretimini Kırıkkale Çelik Fabrikası'nda yapılmıştır. Daha sonra 1963 senesinde yabancı sermaye desteğiyle kurulumu tamamlanan Manyezit A.Ş. (MAŞ), 1972'de Kütahya'da kurulan Kütahya Manyezit A.Ş. üretimlerini devam ettirmiştir. Aynı zamanda şekilli ve şekilsiz olarak alümina-silikat içeren ürünler ile grafit içeren manyezit esaslı karbon tuğlaların üretildiği tesisler İstanbul'da kurulmuştur. Bazik Ateş Tuğla Ltd. Şti, Remsan, Metamin, Asmaş ve Refsan şirketleri de başta demir çelik üretimi yapan irili, ufaklı her türlü tesise hem teknik olarak hem de üretim yaparak destek olmaktadır. Bu malzemeler mekanik yük, korozyon gibi birçok iç ve dış etkileşime karşı koyabilmeleri gerekçesiyle hem üretimleri devam ettirilmekte hem de bu sayede diğer farklı malzeme gruplarının üretimlerine olanak vermektedir [22].

Refrakter malzemeleri asidik, bazik ve ya nötr olarak da gruplandırmak mümkündür. Bu durumda üç farklı grup aşağıdaki gibi olmaktadır:

1. Asidik Refrakterler: Silika, Silimanit, Zirkon, Müllit ve Ateş Kili.
2. Bazik Refrakterler: Dolomit, Magnezit, Periklas ve Forsterit.
3. Nötr Refrakler: Boksit, Krom, Alümina ve Karbon [5].

Asidik refrakterler grubunda yer alan Silika refrakterlerinin %93-98 oranlarında silika içermeleri kuvarstan kaynaklanmaktadır. Yapısında silis bulduran refrakter malzemelerin kolay şekillendirilmesi için %1-1,5 oranında hidroksit ilavesi yapılır.

Ana faz yapısını tridimit oluşturması sebebiyle kuvarsın farklı kristal Şekillere d6nüşüm tersinir olmaktadır. Bu yüzden değişen sıcaklık etkileri mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Asidik refrakterlerin iyi bir örneği olan silika, demir oksit gibi bileşimlerden etkilenmediği için demir çelik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Alümina silikat refrakterler ise doğal ateş kilinden imal edilmektedir. Yapısında %52-65 arasında silis bulundurlar ve içeriğindeki alümina oranına bağlı olarak kullanım alanları farklılıklar göstermektedir. Sıcaklık ve mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha yaygın kullanım alanlarına açılabilmesi açısından alümina oranının arttırılması gereklidir. Ayrıca alümina ve silika tek tek ele alındığında çok yüksek ergime sıcaklıklarına sahipken, bir araya geldiklerinde ise ötektik konum meydana getirmeleri sebebiyle ergime sıcaklıkları oldukça düşecektir. Demir oksitin az miktarda da olması durumunda ergime sıcaklığı düşeceğinden ateş tuğlası kilinin özellikleri önemli parametrelerdendir. Ateş tuğlasının killeri yüksek oranda kuruma ve pişme küçülmelerine sebebiyet verdiği için az miktarda kullanılması daha uygundur. Bu sebeple son kez pişirilerek şamot hali elde edilir. Daha kaliteli refrakter malzemeler üretilmesi için yapıda alümina ve silikanın birleşmesiyle oluşan, müllit fazının ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) fazla olması istenmektedir [5,22].

Bazik ve nötr refrakterler grubunda en çok kullanılan refrakterlerden birisi olan magnezitin ana hammaddesi kalsine edilmiş magnezyum oksittir. Bileşimin ortalama %90'lık büyük bir kısmını magnezyum oksit oluştururken, malzemenin yapısında bulunan %10 civarındaki demir oksit sinterleme işleminin uygulanmasında kolaylık sağlar. Ayrıca malzemeye krom oksit ilavesi ile sinterleme derecesi önemli oranda düşürebilir. Magnezit tuğlaların termal şok dirençleri oldukça düşüktür. Bu sebeple magnezit yapısındaki tuğlalara genellikle %2-4 oranlarında mutlaka alümina ilavesi yapılır. Aksi durumda genişleme katsayısı oldukça yüksek olan magnezit kullanımlarında çatlama ya da yarılmalar meydana gelebilir. Kullanılan diğer bazik esaslı refrakterlerin temelini ise dolomit oluşturmaktadır. Dolomit 2300°C'de ergiyen kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonat bileşenlerinden meydana gelmektedir. Yapıtaşı dolomit olan refrakterler neme karşı savunmasız olduklarından direk

kullanılmazlar. Dolomit kullanımlarına başlamadan önce zift kaplama ile dış ortam arasındaki temas yüzeyi kesilir [5,22].

2.3.2. Pişmiş seramik kil ürünleri

Doğada bolca hammaddesi bulunan kırmızı ve ya kırmızıya yakın tonlarda olan pişirilebilen malzemelerdir. İçeriğinde demir oksit barındıran bu malzemeler ve inşaat sektöründe çok yaygın olarak kullanılırlar. Zengin kil yataklarından hammadde temini ve kolay şekil alabilme özellikleri sayesinde geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Sırlama işlemi yapılarak var olan gözenekleri süs eşyaları gibi sanatsal görseellikler sunmaktadır. Kiremitler, bahçe seramikleri, farklı tip künkler, baca tuğlaları, inşaat tuğlaları bu malzeme grubunun en önemli ürünlerindedir [5,23].

Killi toprak ile kum içeren karışıma su ilavesi ile hamurun elde edilip, farklı tip özel fırınlarda pişirilmesiyle tuğla üretimi gerçekleşmiş olur. Doğada hammaddesinin bolca bulunması nedeniyle kentsel yerleşim alanları dışında küçük çaplı kırsal bölgelerde de üretimleri söz konusudur. Daha az saflık derecesindeki kırmızı killer kolay temin edilmeleri sebebiyle tuğla üretiminde kullanımları yaygınlaşmıştır. Yer kabuğunda bol miktarda bulunmaları sebebiyle günümüzde dahi üretilen seramiklerin çoğunun içerisinde yer almayı başarmışlardır. Endüstriyel anlamda sır içi ve sır altı uygulamaları ile dekoratif görüntüler sunmaktadır. Yapısında demir oksitin varlığından dolayı ham hali gri, kahverengi, yeşilimsi ve ya kırmızı olabilir [23,24].

2.3.3. İnce ve beyaz pişmiş seramik ürünler

Feldspat (K_2O veya Na_2O , $Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), kaolen ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), kuvars (SiO_2) gibi saf minerallerin oluşturduğu hammaddelerden meydana gelmektedir. Dekorasyon ve süs eşyaları, elektrik alanında kullanılan izole malzemeleri, porselen çeşitleri, yer ve duvar ürünleri, çeşitli banyo malzemeleri, fayanslar bu seramik türü

içinde değerlendirilir. Kaolen'in plastiklik oranının az olmasını beyaz pişen seramik kili arttırmaktadır [5,25].

Porselenler yoğun ve beyaz pişen malzemelerdir. Sert porselenler kuvars, kaolen ve potasyum feldspattan meydana gelmektedir. Feldspat'ın ergime noktası daha düşük olduğundan ergir ve kaolenle tepkime gerçekleştirir. Bu ergime işlemi zamanla kuvarsında erimesine sebep olmaktadır. Ayrıca kaolen kristobalitle yan yana gelerek mülliti meydana getirir. Bunların yanı sıra şeffaf porselenler yapısında serbest kuvars bulundurmazlar [5,25].

Termal ısı şoklarına karşı direnci düşüren, bünyede şeffaflığı azaltan serbest kuvars yapılarıdır. 1280-1460°C'lik sıcaklık aralığında sert porselenlerin pişirimi gerçekleştirilmektedir. Yumuşak porselen türleri ise sert olanlara göre daha düşük sıcaklık değerlerinde pişirilmektedir. Porselen çeşitlerinin su emmeleri ve gözenek miktarları oldukça düşük olup, %0-1 değer aralığında yer almaktadırlar. Bu yapıda camsı fazlar feldspat etkisiyle görülür. Feldspat yerine frit porseleni, frit kullanılarak üretilir. Japon porseleni olarak bilinen bir tür yapay camlar olarak bilinirler. Talk kullanılan porselen tipi steatit porselenleridir. Steatit porselenlerinin ısıl genleşme katsayısı düşüktür ve izole elektrik malzemeleri olarak kullanılmaktadır [5].

Sert çiniler yani diğer adıyla gre, su emme oranı %5 civarında olan, kimya endüstrisinde reaktiflere dayanıklılık gösteren kapları oluşturan ya da süs eşyaları, sofr gereçleri, düşük gerilimli elektrik izolatörleri ve yer karoları gibi alanlarda kullanılan oldukça ince seramik malzemelerdir. Sert çiniler 250°C'de vitrifiye edilebilen killerden de meydana gelebilmektedir. Bu ürün doğal gre olarak adlandırılır. Kaolen, kalker, feldspat ve kilden meydana gelen sıhhi tesisat malzemeleri ve kaliteli izolatörler bu kategoride bulunmaktadır. Fayans tipi bu ince seramik türleri ise akçini olarak adlandırılmaktadır. Akçinilerin su emme oranları diğerlerinden farklı olup %15 civarlarına kadar uzanabilmektedir. Şeffaf olmayan bu yapılar yoğun miktarda porozite içerebilmektedir. Süs eşyaları, fayans tipleri ve sofr malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar [5].

2.3.4. Teknik seramikler

Günümüzde kullanımı yaygınlaşmış olan, elektrik iletimi ya da elektrik yalıtımı, piezoelektrik, yarı iletkenlik özellikleri ve sertlik gibi ayırt edici unsurları yapısında barındırırlar. Nükleer enerji alanında, bilgisayar ve telefon gibi makinelerin önemli kısımlarında, elektronik sektörde ve uzay çalışmalarında tercih sebebidir [5]. Bu grupta yer alan başlıca malzeme tipleri:

1. Piezoelektrik özelliği gösteren seramikler.
2. Seramik – metal birleşimi ürünler (Sermetler).
3. Seramik-manyetik özellikli ürünler.
4. Saf oksit olan seramikler [5].

Seramik malzemelere uygulanan kutuplama teknikleriyle piezoelektrik özellikleri kazandırılabilir. Seramikler sinterlemeden hemen sonra elektrik yükü dengesi olarak değerlendirildiğinde düzensiz bir dağılım meydana geldiği görülmektedir. İzotropik yük dengesindeki bu malzemelere farklı tip kutuplama teknikleri uygulanarak piezoelektrik özellikli seramik malzemeler elde edilebilir. Kutuplama tekniğinde elektrotun seramiğe temas etmesi ve hemen ardından bir voltaj uygulaması gerçekleştirilir. Kutuplamanın uygulandığı yön malzeme boyutunda kısımla ya da uzamaları sebep verirken, kimi zaman alternatif voltaj metotları tercih edilmektedir [5].

İnsan hayatını kolaylaştıran aparat, araç ve gereçlere kolay adapte edilebilmesinden dolayı uygulanabilirlik açısından oldukça elverişlidir. Ayrıca küçük boyutlu çalışmalarda büyük etken olması, maliyetlerinin oldukça düşük olması sebepleri mühendisler açısından cazip yönlerindedir. Piezoelektrik özellik gösteren seramikler çoğunlukla radyo, televizyon, hidrofona, pikap iğneleri, ultrasonik jeneratör, alarm ve hoparlör sistemleri gibi alanlarda değerlendirilmektedir [5].

2.4. Seramik malzemelerin kullanım alanlarına göre sınıflandırılması

Seramik malzemelerin başlıca kullanım alanları maddeler halinde aşağıdaki gibi yer verilmiştir.

Yapısal seramikler:

1. Baca boruları,
2. Su boruları,
3. Kanalizasyon boruları,
4. Kiremit,
5. Tuğla,
6. Sağlık araç ve gereçleri, (klozet, lavabo vb.)
7. Yer kaplama için plakalar,
8. Duvar kaplama için plakalar.

Ev eşyası olan seramikler:

1. Sofra seramikleri, (bardak, kase, fincan, tabak vb.)
2. Süs eşyaları, (heykel, biblo, vazo)
3. Çanak, çömlek, kil saksı.

Elektrik seramikleri:

1. Buji ve ateşleme seramikleri,
2. Yüksek gerilimli izolatörler,
3. Alçak gerilimli izolatörler,
4. Sigorta parçaları,
5. İzolasyon seramikleri,
6. Şalter parçaları.

Elektronik seramikler:

1. Piezoelektrik özellikli seramikler,
2. Manyetik seramikler,
3. Dielektrik seramikler.

Refrakter özellikte seramikler:

1. Monolitik refrakterler,
2. Grafit,
3. Oksit refrakterler,
4. Silisyum karbür,
5. Karbon tuğla,
6. Bazik tuğla,
7. Seramik elyaflar,
8. Ateş tuğlası,
9. Silika tuğla,
10. Refrakter harçlar.

Aşındırıcı özellikte seramikler:

1. Özel sentetik elmas,
2. Zımpara tozları,
3. Zımpara taşları.

Biyo seramikler:

1. Seramik dişler,
2. Seramik protez tipler,
3. Seramik kemikler.

Nükleer özellikte seramikler:

1. Radyasyon dirençli ağır betonlar,
2. Nükleer enerjili özel yakıt sistemleri.

Mekanik Seramikler:

1. Motor ve gövdesi,
2. Piston ve yatakları.

2.5. Seramik malzemelerin kalitatif sınıflandırılması

Seramik malzemeler kalitatif olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

Kaba seramikler: (Pişirme sıcaklığı 900 – 1000°C)

1. Çömlek seramikleri,
2. Kiremit,
3. Tuğla,
4. Sırlanmamış kırmızı kaba plakalar.

Ak çiniler: (Pişirme sıcaklığı 1000 – 1100°C)

1. İç mekanlar için dekoratif seramikler,
2. Süs eşyaları,
3. Sırlanmış duvar plakaları.

Sert çiniler: (1100 – 1200°C)

1. Dış mekanlar için görsel seramikler,
2. Kanalizasyon ve su boruları,
3. Duvar seramik plakaları,
4. Bahçe için seramikler,

Vitrifiye seramikler: (1250 – 1290°C)

1. Seramik sağlık araçları.

Porselen tipleri: (1300 – 1380°C)

1. Ateşleme sistemleri,
2. Pres porselenler,
3. Yüksek gerilimli izolatörler,
4. Biyoseramikler,
5. Süs eşyaları,
6. Ptt izolatörleri,
7. Sofra ve mutfak araçları,
8. Laboratuvar porselenleri.

Refrakter özellikte seramikler: (1350 – 1700°C)

1. Isı yalıtımı refrakterleri,
2. Fırınlar ve ısıtıcılar için astarlar,
3. Uzay araçları için pist platform refrakterleri,
4. Uzay aracı kılıfları.

Teknik seramikler: (1500 – 2000°C)

1. Farklı tip aşındırıcılar,
2. Oksit seramikler [5].

2.6. Seramik Hammaddeler

Seramik üretiminin vazgeçilmez hammaddeleri malzemeye plastiklik özelliği katan kil, genel olarak plastik olmayan ancak pişirim sırasında ergime özelliği sağlayan feldspat, bir bakıma yapı taşı bir bakıma da iskelet görevini üstlenen ve ergimeye karşı dirençli silika tipleridir.

Seramik hammaddeleri için sınıflandırma özlü ve özsüz hammadde grupları şeklinde yer alır.

Su ilavesi ile kolaylıkla yoğrulabilen, dağılmaksızın şekillendirilebilen ve kurutuldukları zaman verilen şekli muhafaza etmekte olan hammaddeler özlü seramik hammaddeleridir. Kaolen ve kil grubu hammaddeler olmazsa olmaz örneklerindedir.

İnce boyutlarda öğütölseler dahi, su ilavesi ile kolay kolay şekil verilemeyen ve şekil verilseler dahi kurutuldukları zaman şeklini koruyamayıp, dağılan hammaddeler özsüz seramik hammaddeler olarak adlandırılır. Dolomit, mermer, manyezit, talk, feldspat ve kuvars bu hammadde grubuna dahil edilebilir [26].

Üretilecek seramik malzemenin teknik özellikleri ve türlerine göre, hammadde seçimi yapılması gerekir. Hammaddenin temini, fiyatı, güvenilirlik ve homojenlik bu konuda göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerdir. Ayrıca hammaddelerin çıkarıldıkları rezervin standartlara uygunluğu ve hammadde kalitesi tercih sebebi olmaktadır [26].

2.6.1. Kil

Kayaçların aşınması ve ayrışmaları ile 2 mikrondan küçük tane boyutundaki temel bileşeni alüminyum silikat olan kil minerallerinin bir araya gelmesiyle meydana gelen hammaddelerdir. Le Chatelier tarafından 1914'te ilk defa minerallerin birleşmesiyle killerin meydana geldiği ifade edilmiştir [26]. Temelini silikanın

oluşturduğu killeri, alümina su birleşimleriyle yakından ilişkilidir. Ayrıca demir içeren kırmızı tonlardaki alkali ve toprak alkali killeri de mevcuttur. Bu hammaddede türü 4 farklı başlık altında incelenebilir [5]. Bunlar:

1. Bentonit,
2. Kaolin,
3. Ateş killeri,
4. Bağlama killeri.

Kaolinlerin ergime noktaları 1760°C olup, tortul tipli bu hammaddeler refrakter malzeme üretimlerinde tercih edilirler. Kayaçlardan artık yatak ve tortul olarak meydana gelirler [5].

Killerin birçoğu sedimanter killeri grubuna girmektedir. Sedimenter killeri su aracılığıyla doğal ortamda taşınarak meydana geldiği için yapısında emprüte oranı oldukça yüksektir ve kil tiplerinin çoğu da bu gruba dahildir. Birincil killeri beyaz renkli olup kemikli porselenlerin yapımında gözenekliliklerinden dolayı yer almaktadır. Kristal boyut olarak ince olması sebebiyle birincil killere nazaran plastiklik özelliği daha iyidir ve başlangıç mukavemetleri daha yüksektir. İçerdikleri emprüteler ince boyutta olması sebebiyle rafinerasyonunda çöktürme tekniklerinin kullanımına elverişsizdir. Sedimanter kökenli killerden birisi bağlama killeri'dir. Refrakter sektöründe bağlayıcı olarak kullanımları mevcuttur [5,26].

Şiferton olarak da adlandırılan ateş killeri yapısında kireç, alkali elementleri, az miktarda demir oksit ve magnezyumdan meydana gelmektedir. 1500°C gibi yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık gösteren şifertonlar kömür yataklarının altından elde edilirler. Şamot killeri'nin rezervleri volkanik tüflerde mercekler halinde yer alırken, yeşil renkli ve ince taneli yapıdan meydana gelmektedirler. Kömür yataklarında birikimlere dayanarak bağlama kili ana kayaç altında volkanik tüflere bağlı olarak meydana gelmektedir. Sedimanter killerde su ile taşınmalarından kaynaklı içerdikleri emprütelerin genelini serbest kuvarstan meydana gelmektedir. Serbest kuvarstan

miktarı arttıkça yüksek ergime sıcaklığı sayesinde malzemeler refrakter olarak da kullanılmaktadır [5,26].

2.6.2. Kaolen

Kaolen hammaddesi ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) kaolinitli minerallerden meydana gelmektedir. Kaolinit türevlerinin yer aldığı hammaddelerde alüminyum hidra silikatlı bileşenler yer almaktadır. Feldspat içeren volkanik ya da granitik kayaların dönüşüme uğraması sonucunda kaolinit minerallerinin oluşması sayesinde kaolen hammaddesi meydana gelir. Kayaların içerisinde yer alan toprak alkali ve alkalilerin çözünerek tuz şeklinde ortamdan uzaklaşması ile Al_2O_3 içeren kayalardan kaolinitler meydana gelmektedir [5,27].

1. $K_2O Al_2O_3 6SiO_2 + 2H_2O = Al_2O_3 6SiO_2 H_2O + KOH$
2. $Al_2O_3 6SiO_2 + H_2O = Al_2O_3 2SiO_2 H_2O + 4SiO_2$
3. $Al_2O_3 2SiO_2 + H_2O + H_2O = Al_2O_3 2SiO_2 2H_2O$.

Ana kayaların yerinde beklemeleri sonucunda dış etkenler doğrultusunda eğer taşınma gerçekleşmiyorsa kaolinitler birikir. Bu depolanma ve sonrasında gerçekleşen bozunmalar sonucunda kaolinitli kaynaklar hammadde olarak kullanılabilir. Kaolen plastik özellikte beyaz ve yumuşak tipli bir kil tipi olup, tane boyutu 2 mikron olarak literatürde belirtilmiştir. Kaolenin sertlik değeri 1,5-2 aralığında yer alırken, özkütle değeri $2,62 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Kaolenin ideal formülünde %39,5 Al_2O_3 , %46,5 SiO_2 ve %14 H_2O bulunmaktadır [27].

Ana kayaçta yer alan tüfler ya da granit taşlar arasında kaolinitleşmeye yarayan su, SiO_2 iskeletinde MgO , S , Na^+ , Fe_2O_3 , K^+ , SiO_2 'ye benzer nitelikli bileşikler yapıdan uzaklaştırılarak su tesiri ile farklı bileşenlere dönüşümü gerçekleşmektedir. SiO_2 kayaç üstünde yer alan alüminalar ile yan yana gelerek kaolinitleri meydana getirirler, bu süreçte fazla SiO_2 yer alması durumunda suyun sürüklemesine maruz kalarak ortamdan atılırlar. Su kaolinitleşmeye yarayan önemli bir dış etkidir. Ana kayaçlarda yer alan demir ile silis su etkisi ile birleşmeleri sonucunda kabuksu bir

kısım meydana getirir. Dış kısımda kabuk oluşturmamayanları ise içeride silisli bantları meydana getirmektedir. Silislerin kabuk içerisinde kalması istenmezken öte yandan bu kaolinitlerin kalitesini direk olarak etkilemektedir. Çünkü ana iskeletin içindeki serbest killerin süzülerek ayrıştırılabilmesi ona daha kaliteli kaolen niteliği kazandırmaktadır. İnce seramik sektöründe plastikliği ile yakından bilinen kaolen hamurların hazırlanmasında kolaylık sağlayarak tercih sebebi olmuşken, hammadde temini için granit kayaçlardaki çalışmalar devam etmektedir. Ülkemizde Marmara ve Karadeniz bölgelerinde kaolen hammaddesinin üretimi için aynı tip fırınlar kullanılmasına rağmen kaolenlerin kaliteleri farklı tiplerde olabilmektedir. Balıkesir (M.Kemalpaşa), Ordu (Ünye), Eskişehir (Mihaliccik), Nevşehir (Avanos), Çanakkale (Bayramiç, Çan, Biga), İstanbul, Bursa ve Uşak'ta çok büyük kapasitelerde olmasa dahi kaolen türü için üretimlerimiz mevcuttur [5, 10, 28].

Fe_2O_3 'ün Kaolenli hammaddelere etkisi: Kaolen oluşumunda özellikle istenmeyen bileşen Fe_2O_3 doğal ortamlarda ana kayaçlarda muhakkak bulunur. Kaolenin kalitesinin yüksek seviyede olabilmesi için Fe_2O_3 oranı az olmalıdır ve su burada doğal çözücü olabilmektedir. Ana kayaçların iç kısmında kalan Fe_2O_3 kimyasal yöntemlerle uzaklaştırılır [5].

Al_2O_3 ve Alkalilerin Kaolenli hammaddelere etkisi: $Na_2O + K_2O$, Feldspatların zamanla bozunması ile kaolinitler meydana gelmektedir. Feldspat kaynaklı $Na_2OAl_2O_3 \cdot 6SiO_2$ (Albit) ve $K_2OAl_2O_3 \cdot 6SiO_2$ (Potasyum), bozunması Na_2O ya da K_2O atılmalarına sebep olmaktadır. Bunların ortamdan atılması Al_2O_3 oranının fazla olmasına ve kaolinleşmede artışa neden olacaktır. Kaolen içerisinde diğer fazların fazla oranlarda yer alması, Al_2O_3 bileşeninin daha az miktarda yer alacağı anlamına gelmektedir ve Al_2O_3 'ün az bulunması kaolenlerin oluşumuna negatif etki etmektedir. Bu durumda kaolenlerin kaliteleri düşmektedir.

Alunit ve kükürt (SO_3)'ün Kaolenli hammaddelere etkisi: Kaolenlerin elde edilmesi esnasında ortamda kükürtlerin yer alması H_2SO_4 (Sülfirik Asit)'ü meydana getirmektedir. Kaolenlerin oluşumu sırasında ortamda yer alan K_2O gibi alkali bileşenlerinin tamamı atılmadığından dolayı ortamda muhakkak bir miktar K

bulunacaktır. Al ve kayalardaki su içinde çözünen Si(OH)_4 birleşimi kaolenleri meydana getirmektedir. K' nin ortamda bulunması $\text{Al}_2(\text{SO}_3)_3$ ile birleşerek $\text{KAl(SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Alünit)'i meydana getirir. Kaolenin içeriğinde Alunit varsa (SO_3) ve K_2O hammadde yapısını muhakkak etkileyecektir.

Pirit (FeS_2)'nin Kaolenli hammaddelere etkisi: Kaolenlerin oluşumu sırasında Fe'nin ve S'nin ortamda bulunması yan ve taban kısımlarında pirit diye adlandırılan demir sülfürlü bileşikleri meydana getirir. Eğer K ortamdan atılacak olursa, SO_4 bileşeni olacağı için kaolenlerde Alunit' in meydana gelmesi doğal karşılanmakta ve SO_4 'ün sadece bir kısmının ortamdaki atılabildiği vurgulanmaktadır.

Kağıt sanayi tonaj değerleri açısından kıyaslandığında kaolenin en fazla tüketildiği sektör konumundadır. Seramiklerde kaolenlerin tüketimi izolator ve porselen sanayisinde, sıhhi tesisat araçlarının üretiminde oldukça yaygındır.

Günümüzde kaolen tüketimi oldukça fazla olan aktif inşaat sektörüyle direkt olarak bağlantılı çimento üretimi açısından tüketim oranı %35 civarlarına yükselmiştir. Öte yandan kaolen sanayimizde tüketilen dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bunların dışında ilaç sanayi, cam elyaf, boya, kimya endüstrisi, plastik, lastik ve hatta ilaç endüstrisinde bile farklı amaçlarla yer almayı başarmıştır. Kaolenlerin kullanımı maliyet tablosu açısından yükseklerde bulunması kısıtlayıcı faktör olmaktadır [5].

2.6.3. Feldspat

Yeryüzü kayalarının ve yer kabuğunun %60'lık bir bölümünü oluşturan feldspatlar çok değerli mineral grubudur. Doğada bolca bulunmalarına karşılık olarak farklı sektörlerdeki işlerde farklı amaçlarla kullanılmalarını meydana getirmiştir. Feldspatlar kimyasal olarak Na, K ve Ca'yı barındırabilen alüminasilikat grubunu içine almaktadır. Alüminasilikatlar magma kayalarındaki en yaygın minerallerden meydana gelmektedir. Bu sebeple magma kayaç tiplerinin sınıflandırılması için ana unsurlardan birisi olmuştur. Pegmatit tipi kayalarda çok yaygın bulunurlar [26, 29].

Feldspatların sahip olduğu kafes yapısı (tektosilikat) farklı oranlarda K, Ca ve Na'nın birlikteliğinden meydana gelirler. $KAlSi_3O_8$ (Ortoklas), $NaAlSi_3O_8$ (Albit) ve $CaAl_2Si_2O_8$ (Anortit) fazlarının yer aldığı üçlü sistemi feldspatların bir bakıma oluşum tablosudur. Doğada bolca bulunan feldspatlar sanayilerde aktif olarak tüketilmektedir. İnce taneli olması, kırılma indislerinin 1,53-1,59 (plajioklas için), 1,51-1,54 (K-feldspat için) aralığında bulunması, yaklaşık %90'lara kadar parlaklık özelliği, sertlik değerinin 6-6,5 civarı olması bu hammaddelerin sanayide dolgu malzemeleri olarak kullanımına olanak sağlamıştır [26].

Potasyum feldspatlar kristalografik yapılarında farklı dönüşümler göstermektedirler. Monoklinik yapılar çapı büyük olan K'nın bir katyon olarak yer aldığı yapılar, yapıda oldukça zengin Na'lı yapılar triklinik yapıdadır. K ile Na arasında katı çözelti meydana gelmesi ile oluşan bazı alkali feldspatlarda fiziksel şartlar değiştirildiğinde K atomlarının yerlerine Na atomları yerleşebilir. Doğada Na-feldspatlar çoğu zaman K-feldspatlar ile beraber bulunurken, seyrekte olsa Ca-feldspatlarla da bulunabilmektedir. Ortoklaslar bu gruplar içinde seramik sektörü açısından farklı öneme sahiptir [5, 28, 29].

İzomorf olarak Na ve Ca miktarları ile bir seri meydana getirirler. Yer kabuğunda bolca feldspatlar yer almasına rağmen seramik ve cam endüstrisinde hammadde olarak çok az bir kısım kullanılabilir. İnce taneli kayalardan su gibi dış etkilerle K-feldspatlar meydana gelirken, kayaların içinde demirin yer aldığı farklı mineralleri barındırması ve bunların hammadde içine dahil olabilmesi sebebiyle feldspatların çoğunluğu kullanılmamaktadır. Cam ve seramik endüstrisi feldspatların boyutlarına, buna bağlı ergime derecelerine önem vermektedir. Literatürdeki verilere göre izomorf olarak feldspat tiplerinin bulunmaları durumunda ergime derecelerinin düştüğü tespit edilmiştir [5].

Kimyasal formülü $NaAlSi_3O_8$ olan albitler, sodyumlu feldspatlardan kalsiyumu içerisinde bulundurmayan ve plajioklaslar olarak yer alırlar. Albitler doğada K-feldspatlarla birlikte yer almalarına rağmen katı çözelti meydana getirmezler. Seramik ve cam hammaddeleri bakımından kıymetli yeri vardır.

Ticari olarak değerlendirilen feldspatlar farklı tip feldspat mineralleri içerisinde barındıran albitler ve potasyumlu feldspatlardır. Ayrıca sektörde istenmeyen granat, mika, turmalin gibi birtakım empüriteler kaliteyi direkt olarak etkileyeceğinden, manyetik ayırma ve flotasyon gibi ekonomik yöntemlerle bu emprütelerden arındırma işlemi gerçekleştirilir. Sedimanter, magmatik, metamorfik kayaç tiplerinin neredeyse tamamında feldspatların yer alması sebebiyle üretim alanlarında yeterli feldspat oranları sağlandığında direkt endüstriyel kullanımları gerçekleşir. Bazı kayaç türleri günümüzde feldspatların ticari kullanımına sebep olurlar [5, 29].

Pegmatitler kaba taneli ve içeriğinde potasyum feldspatların yer almasının yanı sıra diğer ekonomik mineralleri barındıran önemli magmatik kayaç tipidir. Granit-graodiorit bileşenli iç içe yer alırlar. Endüstride direkt ya da zenginleştirme işlemlerine müteakip kullanımları yer almaktadır.

Aplitler çoğunlukla albitlerden oluşan ve bir damar kayaç tipine sahip olan, minerolojik olarak kayaçların dokusunda granitlerin yer aldığı ticari kayaçları anlatmaktadır. Kaolen içeren tipleri endüstrilerde kullanılmaktadır. Meydana gelen kayaçlar granitlilerle direkt ilişkilidir.

Nefelinli siyenitler mikroklin ve albit tipi feldspatlarla nefelinin birleşmesiyle oluşan, silis oranı düşük kristalin kayaçlardır. Yapısında aksesuar mineralleri ve düşük oranda mafik silikatlar barındırır. Rusya, Kanada, ABD ve Norveç'te ekonomik kazanç maksatıyla işlenmektedir. Cam endüstrisine uyumlu yapısında serbest silis barındırmaması, yüksek alümina ve alkali barındırması ve ergime gücü karakteristik özelliklerinin iyi olmasına sebep olmaktadır. Alkali ve alümina açısından feldspatlara kıyasla daha zengin katılımlıdır. Endüstriyel özellikteki kayaçlardan temin edilebilen $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$ nefelin mineralleri hegzagonal sisteme sahip, özgül ağırlıkları 2,5-2,7 gr/cm^3 olan, sertlik değeri 5,5-6 olan mineral tipleridir. Zeolit çeşitleri, sodalit, analsime ve kankrinit alterasyon sebebiyle dönüşüme uğrar. İyolit, monmoutit, kongressit, laurdalit, fent, raglanit, melteigit, ditroit, regmantit, foyait, ritfiellit, urtit ve miyaskit nefelin tipi siyinitin türlerindedir. Feldspat kaynağı olarak nefelinli siyenit Türkiye bakımından gelecek vaat etmekte olup, Kırşehir masifinde miyaskit

ve sodalitli siyenit kayaç tipleri üstünde çalışılarak, karbonat ve demir oksit bileşenleri azaltılmış yüksek verimli hatta Norveç nefelinli ürünlerine eşdeğer kazanımlar meydana gelmiştir [5].

Feldspatik kumlar denilen kum tipleri sıklıkla kuvars ve feldspat bileşenlerinden meydana gelen işlenmiş ya da doğal kum türleridir. Feldspat oranı yüksek olan kayaçların aşınması, erozyonu ve taşınması hatta depolanması ile zengin plaser yataklar ve büyük rezervler meydana gelebilir. Pegmatitik tipi metalik maden endüstrilerindeki zenginleştirme işlemlerinde bazen yan ürünler olarak oraya çıkmaktadırlar. Ayrıca feldspatik kumlar kaolenlerin yıkanması esnasında da ortaya çıkabilirler [5,29].

Türkiye feldspat rezervleri olarak Dünya feldspat rezervlerinin 1/10'na sahiptir. Kütahya (Emet, Simav), Bilecik (Pegmatit), Aydın (Çine), Çanakkale (Çan, Biga), Manisa (Demirci) ülkemizde yer alan feldspat ocaklarındandır. Bu ocakların %90'ını özel sektör yönlendirmekte olup, feldspat üretimleri ihracatlara dönüştürülmektedir. Dünya genelinde kullanılan feldspatları yeniden kazanabilmek amacıyla araştırmalar devam etmektedir [5,28,29].

Cam endüstrisi feldspatlar ve nefelinli siyenitleri en yüksek oranda tüketen sektör pozisyonundadır. Feldspatlar cam üretiminde flaks olarak kullanılırken aynı zamanda alümina kaynağı olarak tercih edilirler. Farklı camlaşma derecelerindeki seramik bünyelere farklı oranlarda flaks eklenmelidir. Feldspatların porselen reçelerindeki oranları kimyasal-teknik porselenlerde %17-30, sofraya eşyalarında %25-40, elektro porselenlerde %20-28 değerlerindedir. Potasyum ve sodyumlu feldspatların ve ya nefelinli siyenitler gibi flaks katkılarından hangilerinin ne ölçekte kullanılması gerektiğine dair teknik standartlara uyulması sayesinde katkının katabileceği özellikler belirlenecektir. Nihai ürünlerde sır atma ya da tutma, beyazlık dereceleri imalatçıların farklı etkileri hakkında bilgi verecektir. Feldspatların yapısındaki alkaliler ergime düşürmede faydalı olurlar. Alüminalar ise termal şoklara, bükülmelere, çarpmaya karşı dayanım özelliklerini katmaktadır [5].

Feldspatlar seramik endüstrisi alanında formülasyonlara dayalı reçeteli sistemlerin gelişmesinde aktif rol üstlenmiştir. Nefelinli siyenitler ve feldspatlar açısından en önemli gelecekteki alanları olacağından şüphe yoktur. Flakslar, seramik reçetelerinde bünyelerin ergime derecelerinin düşürülmesi hedeflendiğinden kullanılmaktadır.

Boya endüstrisi feldspatlar açısından farklı bir kullanım alanı sağlamaktadır. Boyalar renk veren pigmentlerden, inceltici özellikte solventlerden ve bağlayıcılardan meydana gelmektedir. Boyaların üretim maliyetlerini düşürmek, pahalı pigmentlerin az ikame edilmelerini sağlamak amacıyla katkı olarak boyaların yapısına ekstenderler ya da dolgu maddeleri eklenir. Ayrıca boyalara akma ya da parlaklık arttıracak fonksiyonel katkı maddeleri de eklenebilmektedir. Feldspatlar ve nefelinli siyenitler boya endüstrisinde ekstender olarak kullanılmaktadır [5].

2.6.4. Kuvars

Kuvars çoğunlukla açık beyaz renkli ya da renksiz ve ince tanelerden oluşan bir yapıya sahip mineral türüdür. Kuvars en saf haliyle %46,5Si ve % 53,30'dan meydana gelmekte olup, kimyasal olarak SiO₂ bileşimiyle ifade edilir. Kuvars'ın yoğunluğu 2,65 gr/cm³ olup, Mohs sertlik değeri yaklaşık 7 olarak tespit edilmiştir. 1785°C'de ergiyen Kuvars, doğada bolca rastlanılan mineral tiplerindedir. Ayrıca Kuvars yapısının içerisinde Mg, Ti, Li, Al, Na elementleri katı eriyik olarak yer almasından dolayı, mor, kırmızı, beyaz, pembe gibi renkleri de doğada mevcuttur. Bu açıdan bakılırsa TiO₂, CaCO₃, hidrokarbon, CO₂, H₂O gibi bileşikler kuvarslarda kapanımları meydana getiren bileşiklerdir [30].

Yüksek saflıktaki kuvarslar sanayi uygulamalarında daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda Brezilya değerli kuvars kaynaklarını barındıran ülke pozisyonunda yer almaktadır. Doğal ortamda Çin, Namibya, Madagaskar, Hindistan, Angola ve ABD saf kuvars rezervleri ile bilinmektedir. Yüksek saflık değerindeki kuvarslar kendisine elektronik sektöründe kullanım alanı bulmaktadır. Türkiye' de kuvars kum 65 milyon ton, kuvars barındıran rezervler 6,3 milyar ton civarında yer almaktadır. Fe₂O₃ içeriği açısından Türkiye' de yer alan kuvarslar %0,10-0,95

civarında olduğunu söyleyebiliriz. Ülkemizde kuvars kaynakları Denizli, Muğla, Zonguldak, Adana, Antalya, Yozgat, Aydın, İstanbul ve Kastamonu'da yer almaktadır [30].

Kuvars kumları metamorfik ya da magmatik bazı kayalar 2 mm'den küçük taneli kuvarlar içerirken, bu tip kayaların dış etkilerle ayrışmalarından kuvars kumları meydana gelmektedir. Beyaz kuvars kumları yapısında demir oksit içerirse kahverengi, kırmızı ya da pembe renklerine sahip olabilirler. Kuvars kumları feldspatlar, demir oksitler, kil ya da karbonat tiplerini barındırabilirler [30].

Kuvarsit kaynakları yapısındaki SiO₂ oranı %75'ten fazla olan tabii kaynaklardır. Sanayide hammadde başlığıyla yer alabilmesi açısından %90 üzerinde SiO₂ barındırmaları istenmektedir. Kuvarsit, diğer kumtaşları, kuvars ve kuvars kumları formlarındaki gibi SiO₂'den meydana gelmektedir. Ayrıca rutil ve granat minerallerinin yanı sıra, hematit, mika, manyetit, feldspat, kireçtaşı ya da killeri de barındırabilmektedir. Kuvars mineralojik açıdan değerlendirildiğinde yapısında SiO₂'nin dışında farklı tip safsızlıkları barındırabilmektedir. Yüksek saflık oranlarına sahip olanları endüstriler açısından büyük önem arz etmektedir [30].

Kuvars hammaddeleri endüstriyel anlamda değerlendirilmek amacıyla birçok sektörde aktif olarak yer almaktadır. Kuvars tipi hammaddelerinin Al₂O₃, Fe₂O₃ ve SiO₂ bileşenlerini barındırması sektörde kullanım oranlarını arttırmaktadır. Yüksek saflıktaki kuvars hammaddeleri süs taşları yapımında, optik ya da elektronik alanlarda yer bulmaktadır. Kimya sanayisinde kromların ve silikon metallerinin üretimine katılırlar. Ancak oldukça yüksek saflıktaki kuvarlar elektrik, elektronik ya da optik endüstrilerinde değerlendirilebilmektedir. Kuvarlar farklı öğütme metotları sayesinde seramik, deterjan, boya, cam, zımpara ve dolgu olarak da çeşitli endüstrilerde yer alabilmektedir. Özellikle optik ya da elektronik sektörlerde kuvarların kristalin olarak var olması, %99,99 oranlarında SiO₂ yer alması istenmektedir. Kuvarlı cevherlerde demirli emprüteler barındırabilir. Seramik, optik fiber, cam ve refrakter malzemelerin üretimlerinde, hammaddede yer alan demir, refrakter malzemelerde ergime noktalarını düşürmelerinden, seramik parçalarda renk

kalitelerini etkilemelerinden ve çeşitli fiberlerin iletimlerini bozmalarından dolayı zararlı görülmektedir [30].

Çoğunlukla cam endüstrisinde gördüğümüz kuvars kumları Ti ve Fe gibi farklı oranlarda safsızlık çeşitlerini yapılarında barındırabilir. Kuvars kumlarına bu safsızlıklar büyük ölçülerde zarar vermekte hatta kullanılmama sebebi olarak gösterilmektedir. Kuvarslı hammaddelerdeki demir oranı cam sektöründe beyazlık indeksi olarak bilinen değerlerini direkt etkileyen parametreler içerisinde yer alır. Düşük oranlarda demir içeren kuvarslar düz camların üretimlerinde kullanılabilirken, saflaştırma işlemleri görmüş kuvarslar çok geniş bir üretim yelpazesine sahiptir. Kuvarslı bu tip hammaddelerdeki Fe oranı özel camlar ve optik uygulamalarında 10 ppm, fiber optik uygulamalarında 1 ppm altında olması beklenmektedir [30].

Endüstriyel anlamda kuvars hammaddelerinin tercih edildiği alanlar:

1. Döküm sektöründe kalıp kumları; bentonit, su ve kuvars kumlarından meydana gelmektedir.
2. Refrakter sektöründe tuğlaların ana hammaddesi silikadır. Kuvarsitlerin yerine %25 oranlarında kuvars kum tipleri kullanılmaktadır.
3. Metalurjik açıdan curuf yapıcı niteliktedir.
4. İnşaat sektöründe pres tuğlaların üretimlerinde gaz betondan yapı elemanlarında kullanımları mevcuttur.
5. Elektronik alanda piezoelektrik ya da dielektrik özellikleri farklı tip devrelerde frekans kontrolleri, frekans geçişleri gibi farklı amaçlarla kullanılabilir.
6. Seramik sektöründe fayans imalatlarında %35-38 oranlarında kuvarslı hammaddelerden meydana gelmektedir. Kuvars malzemelerin beyazlamalarına yardımcı olmakta ve farklı pişirim tekniklerinde kırılma, bozulmaları engelleyebilmektedir.
7. %90 SiO₂ içermesi, tane boyutu 0,15 mm olmasıyla ferrosilikon ya da silikon şeklinde tüketilebilmektedir [30].

2.7. Seramiklerin Genel Özellikleri

Seramiklerin fiziksel, mekaniksel, kimyasal, termal, manyetik ve elektriksel açıdan sahip oldukları özellikler, seramikleri metaller ve plastikler grubu malzemelerden ayrı kılmaktadır.

2.7.1. Fiziksel Özellikler

Sert yapıda malzemeler olduklarından dolayı çizilme ya da aşınmalara ciddi oranlarda direnç gösterirler. TiC, SiC, korund, sentetik elmas, WC gibi aşındırıcı olarak üretilmiş bazı seramikler metalleri kesme, aşındırma işlemlerinde dahi kullanılabilirler. Mekanik olarak dayanımları yüksek değerlerde değildir. Çekme dayanımı düşükken, basma dayanımı yüksek mertebelindedir. Gevrek yapılarından dolayı çekme altında kaldıklarında kolaylıkla kırılabilirler [28].

2.7.2. Mekaniksel Özellikler

Seramikler bir yandan oldukça sert ve diğer yandan oldukça gevrek yapıya sahiptir. Çekme mukavemetleri oldukça düşük mertebelerdeyken, basma mukavemetleri aynı şekilde yüksektir. Gevrek oluşları sebebiyle mikro çatlaklar, çizikler, iç yapıdaki kusurlar ve çentikler gerilim yığılmalarına sebep olur dolayısıyla çekme etkileriyle kolaylıkla kırılabilirler [5].

Seramik malzemelerde çekme dayanımları, basma dayanımlarının 8' de biri seviyesindedir. Isıl işlem operasyonlarıyla çekme dayanımları yüzeyinde artık basma gerilimleri oluşturularak artışlar görülebilmektedir. Camların mukavemetini arttırabilmek için yumuşama noktasına kadar ısıtma sonrası hızlı soğutma metotları tercih edilmektedir. Bu yapılara 'duracam' ya da 'temperlenmiş cam' denilmektedir. Camın içyapısındaki kusurlar azaltılabilirse yüksek çekme mukavemeti elde edilebilmektedir. Seramiklerde şekil değişimleri kırılmalara sebep olmaktadır çünkü kaymaya karşı oldukça yüksek dirençleri mevcuttur [5].

Ayrıca metal ve seramiklerin toz karışımları metallerin ergime derecelerine kadar ısıtılır, ergiyen sıvı metaller gözeneklerden sızarak katı parçaların arasına yerleşir, basınç yöntemleriyle boşlukların miktarları düşürülür. %80 seramik, %20 metal içerikli bu tip malzemelere sermetler denilmekte olup, uygulanan teknikler toz metalurjisidir. Aşındırıcı ve kesici takımların üretimlerinde sermetlerin kullanılmaları tercih edilmektedir. Sermetlerin kullanımları ilerleyen teknolojiyle artmaktadır [5].

2.7.3. Kimyasal Özellikler

Seramikler kimyasal etkilere karşı yüksek direnç göstermektedirler. Bazlardan, alkalilerden, HF dışındaki asitlerden kolaylıkla etkilenmemektedirler. Seramiklerin korozyona karşı dirençleri metaller ve plastiklerden daha üst mertebelere sahiptir. Yüksek ergime derecelerine sahip seramiklerden bazıları, ergime derecelerinin hemen altında dahi kullanılabilir [31].

2.7.4. Termal Özellikler

Seramikler mukavemetlerini yüksek sıcaklıklarda dahi korumaktadırlar. Özellikle yüksek miktarda poroziteli seramikler ısı izolasyonu amacıyla tercih edilmektedirler. Grafit, SiC ısıyı iyi iletmesi istenilen metal ergitme potalarında ve fırınlarında işlev görebilmektedirler. Isıya karşı dirençleri yüksek olup, termal şoklara dayanımları iyi ölçülerdedir [32].

2.7.5. Manyetik Özellikler

Fe_2O_3 'ten meydana gelen seramikler kobalt, nikel ve demirin manyetik özelliklerine oldukça yakın manyetik özellikler sergileyebilmektedirler. Altyapısını demir oksitlerin meydana getirdiği bu tip seramiklere ferritler denilmektedir. Baryum, mangan, nikel oksitler manyetik özellikli diğer seramik tiplerindedir. Manyetik özellik barındıran seramikler elektronik devrelerde ve elektrik motorlarında kullanılabilir [28].

2.7.6. Elektriksel Özellikler

Elektriksel açıdan dielektrik ya da yalıtkan özellikli seramikler elektriği direkt iletmezler ancak elektrik alanlarına tepkiler verebilirler. Seramik yüzeylerde elektriksel alanların meydana getirdiği kutuplaşmalar yardımıyla ciddi oranlarda elektron depolayabilme sağlanmaktadır. Değişkenlik gösteren sıcaklık dereceleri kıymetli parametrelerden kabul edilip, porselen tipi seramikler düşük sıcaklık derecelerinde yalıtkan, yüksek sıcaklık derecelerinde iletken özellikli davranışlar sergileyebilmektedirler [5, 28].

Kondansatörlerin üretimlerinde dielektrik özellikleri güçlü olan seramikler tercih edilmektedir. NiO, Fe₃O₄ gibi bazı seramikler yarı iletken özelliktedir. BaTiO₃ ve kuvarz kristalleri elektriksel açıdan uygulanan mekanik kuvvetler doğrultusunda etki tepki işlevlerini gösterebilmektedir. Elektronik endüstrisinden transistörler açısından piezoelektrik özellikteki seramikler sıklıkla kullanılabilir. Ayrıca (MnZn)Fe₃O₄, BaO₆Fe₂O₃ (Baryumferrit) yalıtkan ve manyetik özellikli olduklarından dolayı yüksek frekans uygulanan yerler açısından uygundur [5, 28, 31].

2.8. Seramiklerin Üretim Yöntemleri

Seramik malzemelerin üretimlerinde ilk evre hammadde seçimleri ve hammaddelerin doğru şekilde hazırlanması ile başlayıp, seramik hamurlarının hazırlanması ve farklı tip metotlarla şekillendirilmesiyarından pişirilmeleri olarak ifade edilebilir.

2.8.1. Hammadde Seçimi

Seramiklerin üretimlerinde kullanılacak hammaddeler 4 farklı tip hammadde kategorisi olarak ele alınmaktadır. Bunlar:

1. Özel birtakım kimyasal metotlarla elde edilen inorganik tozlar,
2. Doğal kaynaklardan direkt alınan ve heterojen olan hammaddeler,

3. Kimyasal metotlar yardımıyla fiziksel özellikleri ve saflıkları büyük oranda iyileştirilen hammaddeler,
4. Minerallerin saflık derecelerini ve fiziksel homojenliklerini arttırmak amacıyla rafine edilen hammaddeler.

Seramiklerin üretimleri amacıyla hammaddelerin seçimleri bu kategorilerden yapılabilmektedir. Ürünlerden alınmak istenen performans, üretim teknikleri, hammaddelerin fiyatları, zamansal maliyet, piyasadaki faktörler seçimlerde dikkat edilecek hususlardandır [28].

Seçilen hammaddelerde aranan nitelikler tane boyutunun çoğunlukla 10 mikrondan küçük olması ve %100'e olabildiğince yakın seviyelerde saflıktır. Seramik vitrifiye üretimlerinde 10 mikronluk tane boyutları seçilirken, ileri teknolojik seramiklerde mikron altında seçimler dahi yapılabilmektedir. Geniş boyut dağılımları paketlemeyi hızlandıracağından dolayı dağılımların geniş olması beklenmektedir. Küresele yakın tane şekilleri kompakt yapıları meydana getirecektir. Malzemeler çoklu bileşiklerden meydana geliyorsa fiziksel ve kimyasal homojenlik oranları incelenmelidir [28].

2.8.2. Hammaddelerin Öğütülmesi

Reçetelerde yer alan hammaddelerin bir araya getirilmesiyle elde edilen harman karışımları, bilyalı değirmenlerde susuz ya da sulu öğütme yardımıyla homojenleştirilir. Bu sayede bileşenlerin aralarında etkileşim sağlanmaktadır. Bilye yüzeyleriyle tanelerin çarpışmaları, bilye yüzeylerinden kaymaları işlemi öğütmedir. Öğütme işlemlerinin etkili olabilmeleri amacıyla bilye boyutlarının toz boyutlarına oranlarının %25 olması gerektiği vurgulanmaktadır. Kullanılan değirmenlerin hacminin %50'si bilyelerden meydana gelmelidir. Bu tip öğütme sistemlerinde alümina bilyelerin kullanımları esastır. Fakat öğütülecek hammaddeler ile bilyelerin aynı tip malzemeler olmasıyla verimlilik artarak homojenlik elde edilecektir [28].

2.8.3. Şekillendirme

Özellikle geleneksel seramik üretiminde en çok kullanılan bazı yöntemler aşağıda verilmiştir.

2.8.3.1. Presle Şekillendirme

%4-10 oranında nem barındıran hamurlar presteki kalıba otomatik bir şekilde beslenmektedir. Yeterli miktarda basıncın etkisiyle hamurlar boşluklara doğru akmaya başlar. Numunelerin nem oranları az olması sebebiyle küçülme oranları az olacaktır. Kuruma sırasında çatlama, kırılma gibi deformasyonlar meydana gelmez. Farklı tip kalıplara göre uygulanacak basınç miktarları da arttırılabilir. Çoğunlukla elektro porselenlere, refrakterlere, fayanslara ve karolara bu teknikle şekil verilmektedir [5,28].

2.8.3.2. Plastik Şekillendirme

Yeterli miktarda kil barındıran hamurlara su yardımıyla plastiklik kazandırılabilir. Hamurlardaki kil oranları düşük seviyelerdeyse organik bağlayıcılar kullanılabilir. Plastiklik özelliğini arttıran su küçülme oranlarını arttıracaktır. Belirli kıvamlara getirilen hamurlar dönen tablalara konduktan sonra şablon ya da el yardımıyla şekillendirilebilmektedir. Su oranları az olan plastik çamurlar havası alındıktan sonra sonsuz vida aracılığıyla basılarak şekillendirilebilmektedir [5].

2.8.3.3. Dökümle Şekillendirme

Diğer şekillendirme metotlarıyla şekillendirilemeyen kompleks ya da karmaşık yapıların şekillendirilebilmesine yarayan metot tipidir. Döküm çamurları elde edilmek istenilen şekillere ait kalıpların içerisine dökülür. Alçının suyu emmesiyle yüzeyde çamur kitleleri tabakalaşarak istenilen et kalınlığına ulaşıldığında kalıptaki fazla çamurlar boşaltılabilir. Kurutmadan sonra kalıptan çıkarılarak çapaklardan arındırılmalıdır [5].

2.8.4. Pişirme

Nitelik ve bileşimlerine göre seramik çamurları kimyasal maddelere ve suya karşı dayanıklılıklarını arttırmak amacıyla 700-2000°C sıcaklık aralığında en az bir kez pişirilmektedir. Seramik parçaları sırlanacaksa ikinci defa, dekorların olgunlaşma dereceleri ve sırların cinslerine göre üç hatta dört defa pişirim işlemleri uygulanabilir. Sırlama yapılacak seramikler üç farklı tipte pişirilebilmektedir:

1. Başlangıçta bisküvinin pişirilmesi yüksek sıcaklıklarda olurken, sırlandıktan sonra sırların gelişmesi amacıyla ilk sıcaklık değerlerinin altında tekrar pişirilebilir.
2. Başlangıçta bisküvinin pişirilmesi düşük sıcaklıklarda olurken, sırlandıktan sonra sırlarla bünyenin birlikte olgunlaşabilmesi amacıyla yüksek sıcaklıklarda tekrar pişirilebilmektedir.
3. Sır direkt olarak ham bünyeye uygulandıktan sonra tek seferde pişirme işlemi yapılabilmektedir [5].

Pişirme işlemlerinin süreleri, fırında sıcaklık kavramının homojen etkileri, kullanılan soğutma metotları, pişirilme hızları kaliteli seramiklerin imalatlarında önemli parametrelerdendir. Pişirme süreleri belirlenirken şu faktörler ele alınmalıdır:

1. Bünyelerin türleri,
2. Fırında kaplayacakları alanlar,
3. Bünyelerin kalınlık ölçüleri,
4. Fırında ısı homojenlik durumları,
5. Fırın ölçüleri.

Bünyelerin bileşimlerine dayanan parametreler:

1. Kimyasal ve bünyelerdeki serbest suların atılmaları
2. Organik tipteki safsızlıkların yanarak uzaklaştırılmaları
3. Kükürtlü bileşiklerin bünyeden yanarak atılmaları [5].

2.8.5. Sinterleme

Sinterleme, seramik bünyelerdeki karşılıklı temas etmekte olan tanelerin, çıkılan yüksek sıcaklıklara bağlı olarak tanelerin bağlanıp, yapışmalarından meydana gelen yoğunluk ve boyutlarındaki değişikliklerdir. Yani yüksek sıcaklıkların etkisiyle partiküller arasında bağların meydana gelmesidir. Ergime derecelerinin altlarında atomik transferler aracılığıyla katı-katı arasında gerçekleşmektedir. Ancak sıvı fazlarında meydana geldiği durumlar görülebilmektedir. Birbirine temas eden partiküller boyun vererek bir araya gelirler. Meydana gelen boyunun büyümesi taneler arasındaki köprülerin gelişmesi demektir [5, 25, 32].

Tozların sahip oldukları yüksek seviyeli yüzey enerjilerinin kaldırılmasıyla hareketlenebilen partiküller sinterlenebilecektir. Yüzey enerjisi birim hacimdeki partiküllerin çaplarıyla ters orantıya sahiptir. Yüzey alanlarının geniş olmasıyla küçük partiküller daha hızlı bir biçimde sinterlenebilecektir. Sinterleme açısından yalnızca yüzey enerjisi yetmez. Kristal yapı katılarda taneler etkileşimdeki diğer tanelerle sınırlarında enerji meydana getirerek tane sınırlarını belirlerler. Tane sınırları kusurlu ve yüksek enerjilerinden dolayı yüksek atomik hareketliliklerin meydana geldiği kısımlardır. Sinterleme mekanizmaları atomik hareketliliğin meydana getirdiği kütle akışıyla tanımlanmaktadır [5,25].

Metaller açısından kristal latis yüzeylerinde, tane sınırlarında meydana gelen difüzyonlarla sinterleme gerçekleşmektedir. Sinterleme aşamaları, kinetik ve itici güce dayanmakta olup, matematiksel açıdan gösterilebilmektedirler. Sinterleme esnasında boyun oluşumlarıyla gerçekleşen tane büyümeleriyle meydana gelmekte olan yapılarındaki değişiklikler difüzyonların etkileriyle gelişebilmektedir. Difüzyonlar termal değişikliklerden etkilenmektedir. Atomik boyutta kinetik hareketliliğin spesifik enerjileridir. Atomların kazandıkları aktivasyon enerjileriyle ya da kendi enerjileriyle hareketler sağlanabilmektedir. Atomlar enerjilerini kullanarak boş köşelere hareket etmektedirler. Şekillendirilen numuneler büyük oranlarda poroziteden meydana gelmektedir. Kurutma sayesinde fiziksel suların uçmasıyla tanelerin temas oranlarında artışlar meydana gelir. Sinterleme işlemleri esnasında

taneler arasındaki bağlar güçlenir hatta tane sınırları kaybolabilmektedir. Böylece bazı taneler boyutsal gelişimler gösterirken geriye kalan tanelerse küçülebilirler. İnce ve iri tanelerin yüzey enerjileri prosesin itici gücünü meydana getirmektedir [5].

Sinterleme yüksek sıcaklıklarda atomların hareketlilikleri, yerleşebilecekleri köşe sayıları artacağından dolayı daha hızlı gerçekleşebilecektir. Sinterleme esnasında porların azaltılması, büzülme miktarları, yüzey alanları ve son yoğunluklarıyla aynı bağlamdadır. Sinterleme esnasında gerilim artarak büzülmesi meydana getirir ve boyun büyümeleriyle de özkütle artacaktır. Aynı zamanda yüzey alan kayıplarıyla aradaki partiküllerin oluşturdukları boyunlar büzülme gerçekleşmeden meydana gelebilmektedir. Toz yapısındaki bileşimlerin özellikleri değer kazanmaktadır [5].

Farklı tip tozların bir araya gelerek birleşmeleri amacıyla gerekli olan minimum sıcaklık sinterlemenin meydana geldiği bu sıcaklığa tamman sıcaklığı denilmektedir. Tamman sıcaklığı maddelerin ergime sıcaklıklarının 0,53 katı kadardır. $T_{Erg} > T_{Sin} > T_{Tam}$ bağıntısından sinteleme sıcaklığının, tamman sıcaklığıyla ergime sıcaklığı arasında bulunduğu görülebilmektedir. Atomlardaki hareketliliklerin başladığı ilk sıcaklık tamman sıcaklıklarıdır [5,32].

Tane büyümesi kavramı ısı işlemler esnasında deformasyonlardan arındırılmış tanelerin yüksek sıcaklıklarda boyutlarında meydana gelen artışlar olarak ifade edilmektedir. Metallerde, seramiklerde tanelerde büyümeler gerçekleşebilir. Büyüyen taneler aynı sistemde yer alan diğer tanelerin boyutlarında küçülmelerine hatta kaybolmalarına sebep olabilmektedir [5].

Proseste itici gücün meydana gelmesinde iri ve ince tanelerin yüzey enerji farkları etkili olabilmektedir. Yüzey enerjisi farkları 0,1-0,5 cal/gr civarında olmasıyla yüksek sıcaklıklarda prosesi meydana getirebilmektedir. Sinterlemede asıl itici gücü, yüzey enerjilerinin farklarını meydana getiren yüzey eğrilik farklarının meydana getirdiği serbest enerji farklarından almaktadır. Tane boyutlarıyla yüzey eğrilik çapları orantılıdır. Bu sebeple tane büyümelerinde tane çapları ve itici güçler ters

orantıya sahiptir. Sistem emprüteler barındırıyorsa tanelerin büyümelerine engel olabilmektedir [5].

Sıcaklıklardaki yükselişlerle tane büyümeleri artmaktadır. Sinterleme esnasında ara partiküllerin atomik bağları gelişmektedir. Boyunların büyümesi evresinden sonra atomlar arasında yeni tane sınırları meydana gelecektir. Atomların kinetik enerjileri yüksek sıcaklıklarda daha fazla olmasından dolayı sinterleme daha hızlı meydana gelecektir. Yüzeylerde yer almakta olan atomlar, atomların temas etmiş olmaları sebebiyle gerçekleşebilen difüzyonlar farklı boyutlarda kenetlenmeleri meydana getirmektedir böylece atomlar birleştirilmiş olur. Seramiklerde mukavemet olumsuz etkilenebileceğinden aşırı tane büyümelerinin gerçekleşmelerine müsaade edilmemektedir. Ortama dahil edilen ikincil maddelerle tane sınırları üstünde ince sıvı fazların meydana gelmesi istenmektedir [5].

Sinterleme bir başka açıdan açıklanacak olursa: Partiküllerin birbirleriyle temas noktaları mevcuttur. Partikülleri bir arada tutabilen bağlar sinterlemenin gerçekleşmesiyle büyüme son olarak atomların tamamen birleşmeleriyle sonuçlanmaktadır. Partiküllerin çapları eşit olması halinde, partiküllerin birleştirilmeleriyle 1,26 kat daha geniş küre tipi partiküllerin meydana gelmeleri sağlanacaktır [5].

Sinterlemelerin başlangıç evreleri verdikleri boyunların hızla büyümeleriyle direkt karakterize edilebilmektedir. Orta evredeyse porlu yapılar düzleşmeye geçmektedir. Aynı zamanda atomlar silindirik yapılara sahiptirler. Sinterleme evreleri ilerledikçe tanelerin büyümeleri daha gelişmiş olabilmektedir. Bu düşük sinterleme hızlarında por yalıtımlarıyla meydana gelebilmektedir [5].

Sinterlemede aşamaların net olarak birbirlerinden ayrılmaları güçtür. Başlangıç evreleri eğilimli gradyanlı yapıları ortaya çıkarabilmektedir. Büzülmeler ve boyun boyut oranları küçüktür. Tane boyutları, başlangıçtaki tane boyutlarından yüksekte değildir. Orta evrelerde porların düzleşmeleriyle teorik yoğunluklar %70-92 civarında yer alabilmektedir. Son evredeyse porlar küreselleşerek tanelerdeki

büyümler görülecektir. Yüzey taşınım prosesleriyle bakılacak olunursa porlar küreselleşecektir. Porların yarı çapları küreselleşmelerin artışlarıyla artacaktır. Partiküllerin boyut dağılımları ve paketleme tipleri son evrelerde por boyutsal dağılımlarını meydana getirecektir [5, 32].

Sinterlemede görüntülenebilen por boyutları: büzölmeler, birleşmeler, kabalaşmalara benzeyen kompleks olaylarla yakından ilgilidir. Sinterleme zamanlarının uzun tutulmalarıyla porların küçükleri, büyüklerinden fazla boşluk yayabilecektir [5, 32].



BÖLÜM 3. UÇUCU KÜLLER

3.1. Uçucu Küllerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Uçucu küller, gelişmiş yakma sistemleriyle katı yakıtların ateşlenerek yanmaları sonucunda meydana gelen kıymetli yan ürünlerdir. Düşük kalori değerlerine sahip endüstride kullanılmamakta olan kömürlerin tüketilmelerine sebep olabilmektedir. Değirmenlerde öğütme işlemleriyle toz haline getirilen kömürler, yanma fırınlarına sıcak havayla birlikte püskürtülerek ortalama 1500-1700°C sıcaklıklarında kömür tozlarının verimli olarak yanma işlemleri gerçekleştirilmektedir [33, 34, 35]. Kömür tozlarının yakılmalarıyla elde edilen küllerin ortalama %20'si kazan altlarına düşerek su aracılığıyla uzaklaştırılmakta olup, küllerin %80'i baca gazlarıyla beraber ilerlerken elektro filtreler ve mekanik metotlar yardımıyla atmosfere çıkmaları engellenerek tesislerin dış kısımlarındaki özel haznelerde depolanmaktadır. Küresel yapıdaki uçucu küllerin büyüklükleri 0,5-100 µm aralığında yer almaktadır [33,7].

Termik santrallerde çoğunlukla yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin %20-40'ı küle dönüşmektedir. Ülkemizdeki kaynaklar referans alınırsa uçucu küller iki başlıkta irdelenebilirler:

1. Taş kömürlerinden elde edilen uçucu küller,
2. Linyit kömürlerinden elde edilen uçucu küller [33].

Türkiye elektrik enerjisi ihtiyacının %21,05'ni Termik santraller aracılığıyla sağlamaktadır. 2014 yılında ülkemizin gereksinim duyduğu elektrik enerjisinin %29,2'si bu metottaki tesisler yardımıyla karşılanmış olup, açığa çıkan küller değerlendirilmelidir [8].

Termik santrallerde çok ince boyutlardaki kömürlerin yakılmalarıyla üç farklı tip kül elde edilebilmektedir:

1. Baca gazlarıyla taşınamayan ve kazanların tabanlarına düşmekte olan iri tanelere sahip taban külleri,
2. Siklon biçimindeki ocaklarda yakılan kömürlerin suda soğutulmalarıyla elde edilen ham küller,
3. Baca gazlarıyla taşınabilen oldukça ince taneli uçucu küller [8].

Uçucu küller kimyasal yapılarında barındırdıkları CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 ve Al_2O_3 açısından değerlendirilmektedir. Silikat-alümina esaslı uçucu küller çoğunlukla taş kömürlerinin uçucu külleri olan, büyük oranda SiO_2 ve daha az oranlarda Al_2O_3 'ten meydana gelen uçucu kül tipleridir. Literatürde silikoalüminoz uçucu külleri olarak ifade edilmişlerdir.

Silikat-kalsit esaslı uçucu küller sıklıkla linyit kömürlerinin yakılmalarıyla elde edilen, kimyasal kompozisyonlarında oldukça yüksek oranlarda CaO içerebilen, aynı zamanda yapısında SiO_2 barındıran uçucu kül tipleridir. Literatürde silikokalsit uçucu külleri olarak ifade edilmişlerdir.

Sülfür-kalsit esaslı uçucu küller çoğunlukla linyit kömürlerinin yakılmalarıyla elde edilen, kimyasal kompozisyonlarında oldukça yüksek oranlarda kükürt trioksit SO_3 içerebilen, aynı zamanda yapısında kalsit CaO barındıran uçucu kül tipleridir. Literatürde sülfokalsik uçucu külleri olarak ifade edilmişlerdir. Sınıflandırılmayan uçucu küllerde mevcuttur. Bu uçucu kül tipleri termik santrallerdeki yakma sistemlerinin homojen olamamalarından dolayı kimyasal yapıları sürekli olarak değişkenlik gösterebilen uçucu kül tipleridir [8, 33].

3.2. Uçucu Küllerin Mineralojik ve Kimyasal Yapıları

Uçucu küller, gözenekli ya da dolu camsı küresel tanecikler ve yanmamış minerallerden meydana gelen köşeli ve süngerimsi aglomere taneciklerinden meydana gelmektedir. Kimyasal yapılarında TiO_2 , Na_2O , SO_3 , K_2O , MgO , Fe_2O_3 , CaO , SiO_2 , Al_2O_3 gibi her çeşit oksitleri barındırırlar. Kömürün tipine bağlı olarak oksitlerin yüzde oranları değişiklik gösterebilmektedir. Bu bağlamda silikat-alümina esaslı uçucu küllerde Al_2O_3 ve SiO_2 , silikat-kalsit esaslı uçucu küllerde $CaCO_3$ ve SiO_2 , sülfür-kalsit esaslı uçucu küllerde $CaCO_3$ ve SO_3 temeli meydana getiren oksit tipleridir. Taş kömürlerinden elde edilen uçucu küller, linyit kömürlerinden elde edilen uçucu küllerden daha fazla toprak alkalilerini barındırmaktadır [7].

Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri, yakılan kömürlerin yapılarına, kömürlerin içerisinde bulunan yanıcı özellikte olmayan bileşenlere, yanma reaksiyonlarının etkilerine göre değişimler gösterebilmektedirler [7,33].

Uçucu küller bacalardan toplanırken, içerisinde barındırdıkları yanmamış karbon partikülleri uçucu küllerin bileşenlerinden birisini meydana getirirler. Yakılan kömürlerin tiplerine göre yüksek oranda CaO barındırabilirler. Kızdırma kayıpları, esas olarak kömürlerdeki yanmamış karbonlar, kömürlerdeki karbonatlar ya da hidratların bozunmalarının meydana getirdiği su ya da CO_2 kayıplarını kapsamaktadır. Kızdırma kayıpları, %1-10 arasında değerler alabilmektedir [7,36].

Uçucu küllerin içerisindeki amorf karakterli silikatlar ve alüminatların uçucu küllere puzolanik özellikler kazandırdığı belirtilmektedir. Puzolanik özellikli uçucu küllerse sönmüş kireçlerle hidratasyon reaksiyonlarını meydana getirerek sertleşebilmektedir. Uçucu küllerin yapı malzemelerinde kullanılmalarını sağlayabilmektedir [7,37].

Uçucu küllerin puzolanik olmaları, kimyasal kompozisyonlarından çok mineralojik yapılarıyla alakalıdır. Kireç oranları düşük uçucu küller aktif bileşenleri alüminalar ve silislerden meydana gelen camsı, amorf fazlardır. Sönmüş kireçlerle reaksiyona girebilen bu tipteki uçucu küller puzolanik özelliklidirler. Kireç oranları fazla olan

uçucu küllerde, puzolanik özellik göstermelerinin yanında barındırdıkları serbest kireçler, alüminalar, amorf silisler, trikalsiyum alüminatlar sayesinde bağlayıcı özellik barındırabilirler.

Yüksek oranlarda kireçleri barındıran uçucu küller, düşük seviyelerde kireç içeren kül tiplerine nazaran daha fazla camsı fazdan meydana gelmektedir. Düşük oranlarda kireç barındıran uçucu küllerde kuvars, mullit, manyetit, hematit mineralleri varken, yüksek oranlarda kireç barındıran uçucu küllerdeyse feldspat, trikalsiyum alüminat, serbest kireç, gehlenit, anhidrit, plajyoklas gibi kalsiyumlu silikatlar yer almaktadır [7,33].

Tablo 3.1. Uçucu kül bileşenlerinin maksimum ve minimum miktarları [33].

Kimyasal Bileşik	% (Ağırlıkça max.)	% (Ağırlıkça min.)
SiO ₂	51	45
Al ₂ O ₃	32	24
Fe ₂ O ₃	11	7
CaO	5,4	1,1
MgO	4,4	1,5
K ₂ O	4,5	2,8
Na ₂ O	1,7	0,9
TiO ₂	1,1	0,8
SO ₃	1,3	0,3
Cl	0,15	0,05

Uçucu küllerde mullit, kalsit, manyetit, hematit ve kuvarslar en çok yer alan oksit tipleridir. Mineralojik analizlerle çoğunlukla uçucu küllerde yer alan silislerin bir kısmı kuvars kristalleri, diğer kısmı alüminalarla birleşerek mullitleri, kalan silislerinse camsı faza sahip oldukları gözlemlenmiştir. Demirinse, kısmen hematit ve manyetitlerin bileşimlerinde, kalan demirlerinse camsı fazda olduğu tespit edilmiştir.

İdeal koşullardaki uçucu küller %70-88'i SiO₂ ve Al₂O₃, %66-88' i camsı yapıda geri kalan bölümlerse potasyum, kalsiyum, titanyum, magnezyum, demir ve sodyumdan meydana gelmektedir [33].

3.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

3.3.1. Görünüş

Uçucu küller bej ve açık kahverengi tonlarında olabilirken, siyah ya da koyu gri tonları mevcuttur. Kömürlerin yanış özelliklerine ve barındırdıkları karbon miktarlarına göre uçucu küllerin renk tonları farklılık gösterebilmektedir. Yanmamış karbonları yapılarında ihtiva eden uçucu küller koyu renk tonlarında olabilirler. İyi yanma özelliği gösteren ve yapısında az miktarda karbon barındıran uçucu küller açık renk tonlarında olabilmektedir. Karbon miktarlarındaki artış uçucu küllere koyu renkler kazandırmaktadır [7]. Ayrıca küllerdeki rutubet miktarları ve demir oranları renk tonlarının farklılaşmalarına sebep olabilmektedir. Görüntüleme tekniklerinden uçucu küllerin süngerimsi, gözeneksiz ya da gözenekli, küresel şekilli aglomere tanelerinden meydana geldikleri bulunabilmiştir. Çoğunlukla linyitli kömürlerin uçucu külleri, taş kömürlerinininkinden daha koyu tonlardadır [33].

Literatürde uçucu kül taneleri morfolojik açıdan, diğer deyişleyse dış görünüşlerinin farklı tiplerde olabileceği vurgulanmaktadır. Bunlar:

1. Katı, şeffaf küresel taneler,
2. Şekli olmayan şeffaf taneler,
3. Yuvarlak kabarcıklardan meydana gelen şeffaf taneler,
4. Şekli olmayan opak taneler,
5. Yuvarlak kabarcıklardan meydana gelen (opak, şeffaf) karışık taneler,
6. Şekli olmayan opak ve şeffaf taneler,
7. Delikli, köşeli opak taneler,
8. Yüzeyde ya da iç kısımda yer alabilen küresel taneler,
9. Plerosfer (içi dolu, küresel taneler) [38].

3.3.2. Tane Boyutu

Kömürlerin öğütölme seviyelerine ve cinslerine göre uçucu kül tanelerinin boyutları farklılık gösterebilmektedir. Linyit kömürlerinin yakılmasıyla meydana gelen uçucu küllerin boyutları, taş kömürlerinden meydana gelen uçucu küllere daha büyüktür. Küçük tane boyutundaki uçucu küllerin bacadan kaçmamaları amacıyla mutlaka tedbirler alınmalıdır. Çünkü bacadan gazlar yardımıyla sürüklenen uçucu küller ince tane yapılarına sahiptir [33]. Uçucu küllerin spesifik yüzey alanları 1800-5000 cm²/gr civarlarında olmakta, ortalamaysa 2800-3800cm²/gr değerlerinde yer almaktadır [8]. Hem amorf, hem camsı küresel yapılardaki uçucu küller 0,5-100 µm aralıklarında elde edilebilmektedirler [7].

3.3.3. Özgül Ağırlık

Uçucu küllerin barındırdıkları karbon, demir, alümina, kuvars oranlarıyla özgül ağırlıkları kolaylıkla değişebilmektedir. Demir elementinin artışıyla uçucu küllerin özgül ağırlıkları artabilmektedir. Uçucu küller farklı tip taneciklere sahip olmalarından dolayı uçucu küllerin içlerinde değişimler gösterebilmektedir. Uçucu küller yaklaşık 2150 kg/m³'lük özgül ağırlıklarıyla bilinmektedirler [33].

3.3.4. Karbon Miktarı

Termik santrallerin yakma sistemleri gelişmişse yanma olayları iyi gerçekleşebileceğinden dolayı kömürlerdeki karbon miktarları düşük mertebelere düşmektedir. Yeni tip santrallerde %3'ün altında oranla gerçekleşmektedir. Karbon miktarları yüksek antrasitleri yakan santrallerde yanma problemleri çıkabileceğinden karbon miktarları oldukça yüksektir. Kızdırma kayıpları açısından uçucu küllerin karbon miktarları düşük seviyelerde olmalıdır. Kısaca kızdırma kayıplarının 0,9 katı karbon miktarlarını verebilmektedir.

Uçucu küller, karbonları ayrı taneler ya da yanmayan tanelerin yüzeyleri üzerinde karbon tabakaları olarak barındırabilmektedir. Uçucu küllerdeki karbonların meydana getirdiği taneler diğer tanelerden büyük olabilmektedir [33].

3.4. Uçucu Küllerin Manyetik Özellikleri

Uçucu küllerde manyetik özelliklerin tespiti amacıyla, uçucu küllerin bulunduğu ortamlara mıknatısların yaklaştırılmalarıyla, uçucu küllerin bir kısmı mıknatıslara yapışabilmektedir. Mıknatıslar hava akımları sayesinde manyetik olmamasına rağmen yapışabilen uçucu kül tanelerinden arındırılabilir. Uygulanan testlerin birdaha tekrarlanmasıyla %25 oranında uçucu küllerde mıknatıslanma görüldüğü belirlenmiştir. Fe_2O_3 oranıyla uçucu küllerin mıknatıslanabilme özellikleri direkt bağlantılıdır. Fe_2O_3 barındırabilen uçucu küllerin az bir bölümü mıknatıslara yapışmayarak kalabilmektedir [33].

3.5. Uçucu Küllerin Puzolanik Özellikleri

Kimyasal kompozisyonlarına nazaran uçucu küllerin mineralojik yapıları puzolanik özelliklerinin belirlenmesinde daha etkilidir. Amorf, camsı fazları meydana getiren alümina ve silisler uçucu küllerin temel yapı taşlarını meydana getirirken, düşük kireç oranlarındaki uçucu küllerde barındırılabilir. Nemli ortamlarda farklı tipteki uçucu küllerin sönmüş kireçlerle reaksiyonlara girmelerinden kaynaklanan özellikler onların puzolanik özelliklerindedir [7,8].

CaO'dan meydana gelen uçucu küller, hematit, manyetit ve minör camsı faz olarak kuvarslı mullit ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) barındırabilmektedir. CaO oranı yüksek olan uçucu küller serbest kireçlerin yanında kuvars, anhidrit, mervinit, hematit, mellit gibi yapısında kalsiyum barındıran mineral fazlarından meydana gelmektedir. Bol kireçli uçucu küller, trisülfoalüminat, kalsit, portlandit fazlarından da meydana gelebilmektedir. Uçucu küllerin reaktivitesinde amorf, camsı fazların etkinliklerini arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca düşük oranlarda kireç ihtiva eden uçucu küller,

alüminyum ya da polimerize silisleri yapısında barındırarak alimünosilikat tipindeki SiO₂'li ağlarını meydana getirebilirler [38].

Uçucu küller, kireç bileşenlerini yapılarında ihtiva ederlerse suyla etkileşimleri sonucunda mukavemetlerinde artışlar görülür ve dayanıklılık kazanabilirler. Uçucu küllerde çok yavaş meydana gelebilecek mukavemet değerlerindeki artışlar aslında uçucu küllerin puzolanik özellik temellerini meydana getirmektedir. Zamansal açıdan artan sürelerle puzolanik özelliklerde önemli ölçülerde iyileşmeler meydana gelebilmektedir. Kireç bileşenlerini az barındıran uçucu küller az puzolanik özellikler sergileyebilirken, yüksek kireç oranlarındaki uçucu küller çok daha kararlı puzolanik özellikler sergileyebilmektedirler [33].

3.6. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları kömürlerin sahip oldukları bileşenlere ve bu bileşen tiplerinin yanıcı ya da yanıcı olmama parametrelerine göre değişiklikler göstermektedir. Temel yapıyı oksitli bileşenlerin meydana getirdiği uçucu küller açısından SiO₂, CaO, Fe₂O₃ ve Al₂O₃ bileşenleri oldukça fazla yer alarak kimyasal davranışlarını etkileyebilmektedir [7].

Uçucu küllerin kimyasal davranışları değerlendirilirken, asitlerin etkileri ve suda çözünürlükleri şeklinde değerlendirilebilirler [33].

1. Uçucu küllerin suda çözünürlükleri: Çoğunlukla uçucu küller %2-3 oranlarında suda çözünme davranışları göstermektedir. Uçucu küllerden meydana gelen çözeltilerde sülfatlar ve kalsiyumlar sebebiyle alkali reaksiyonlar gerçekleşebilmektedir. MgO, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, Fe₂O₃ ve SiO₂ gibi uçucu kül bileşenlerinin suda çözünürlükleri minimum seviyelerde yer almakta ve uçucu küllerin sıcaklık artışlarıyla sudaki çözünürlükleri artmaktadır.

2. Uçucu küllere asitlerin etkileri: Çoğunlukla uçucu küllerle asitlerin etkileşimleri oldukça az gerçekleşmektedir. Uçucu küllerin seyreltik asitlerle etkileşimlerinden en fazla %15 civarında çözünebildiği tespit edilebilmiştir. Fakat uçucu küllerin farklı kimyasal, mineralojik kompozisyonlardan meydana gelebilmesiyle çoğunlukla daha düşük oranlarda gerçekleşebilir [33].

3.7. Termik Santrallerde Atık Uçucu Küllerin Toplanması

Termik santrallerde kömürlerin yakılma işlemleriyle elektrik üretilirken meydana gelen uçucu küllerdeki çeşitlilikler aşağıdaki sebeplerden kaynaklanmaktadır:

1. Elektrik üreten kömürlerin yakıldıkları kazanların tiplerine,
2. Kazanları doldurma sistemlerine,
3. Külleri temizleme işlemlerine,
4. Kimyasal kompozisyonlarına,
5. Barındırdıkları kül miktarlarına,
6. Kömürlerin tiplerine.

Parça ve toz halindeki farklı tipteki kömürler termik santrallerde yakılabilmektedir. Toz kömürlerle çalışabilen termik santraller 0,09 mm tane boyutunun altındaki öğütülmüş kömürlerle çalışarak elektrik enerjisi üretirler. Izgaralı kazanlardaysa tam parçalı kömürler yakılabilmekte ve meydana gelen kömür küllerinin %1-5'i uçucu küllerdir. Toz kömürlerin kullanılmasıyla %80 oranlarında uçucu küller meydana gelebilmektedir.

Uçucu küller termik santrallerde toplanırken aşağıdaki metotlar uygulanmaktadır:

1. Filtreler
2. Nemlendirme
3. Siklonlar
4. Ultrasonik çöktürme
5. Elektrofiltreler
6. Kontrol prosesleri.

Termik santrallerde çoğunlukla siklonlar ve elektrofiltreler külleri tutmak amacıyla kullanılmaktadırlar. Uçucu küllerin tane boyutlarının küçük olması halinde elektrofiltrelerin, tane boyutlarının büyük olmaları durumlarında siklon benzeri mekanik kül tutucuları kullanılmaları uygundur. Günümüzde yüksek maliyetleri, toplanabilen uçucu küllerin değerlendirilememeleri ve fazla su tüketimleri sebeplerinden dolayı uçucu küllerin suyla çöktürülmesi tekniğine dayanan nemlendirme metotları kullanılmamaktadır. Filtrelerle kontrol prosesleriyle ve mekanik çöktürmelerle 1 µm tane boyutlarındaki uçucu küllerin toplanmalarını sağlayabilmektedir. Çevre kirliliklerine sebep veren küller bu sistemlerle yakalanarak bacadan çıkışları önlenmektedir fakat oldukça maliyetli metotlardır [33].

Uçucu kül atıklarının pratikte depolanmaları ve atılmaları karasal dolgular ve havuzlama metotlarıyla gerçekleştirilmektedir. Uçucu küllerin suyla karıştırılmalarıyla elde edilen bulamaçlar havuzlama tekniğinde borular aracılığıyla farklı kısımlara akıtılır. Uçucu kül taneleri havuzların dibine çökerken, üstte kalan su yeniden termik santrallere yönlendirilir ya da farklı alanlarda değerlendirilebilir. Havuzların kullanımları seri olarak gerçekleşmektedir. Bir havuzda arındırılmış su, diğer havuzdaysa uçucu küllerle suyun birleşimi bulamaçlar yer almaktadır. Bu metotla uçucu küllerin bulamaçlar halinde yer aldığı havuzda çökmeler gerçekleşirken, diğer havuzda daha az oranlarda uçucu küller bulunabilmektedir. Bulamaç halindeki uçucu küllerden suyun diğer tarafa akıtılmalarıyla havuz uçucu küllerle dolacaktır ve elde edilen uçucu küller değerlendirilmek amacıyla başka alanlara gönderilecektir.

İşlemlerin pratikliği, maliyetlerinin ucuz olması sebeplerinden dolayı ıslak havuzlar yaygın olarak kullanılabilir. Ancak karasal dolgular metodu son zamanlarda boş arazilerdeki kullanımlarında havuzlamalara göre artışlar gerçekleşmiştir. Yeraltı sularına karışmaları çevresel açıdan istenmediğinden ıslak havuzların ve bu tip doldurulmuş alanların üzerlerinin örtülmesi beklenmektedir. Uçucu küller zirai olarak pratikte bu tip farklı alanlarda değerlendirilebilmektedir [39].

3.8. Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Kullanım Alanları

Termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin yaygın kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

1. Dolgu malzemeleri olarak yol yapım çalışmalarında,
2. Agregaların yerine beton üretimlerinde,
3. Çimento üretmek amacıyla çimento endüstrisinde,
4. Enjeksiyon malzemeleri olarak farklı dolgularda,
5. Katılaştırma, atıkların stabilizasyonlarında,
6. Kil tipi ek olarak çimento klinkerleri üretiminde,
7. Madenlerde ıslah amacıyla,
8. Yumuşak zeminlerde stabilizasyonlar amacıyla,
9. Temel alt malzemeler olarak yol inşaatlarında,
10. Agregalar malzemeler olarak tuğlaların üretimlerinde,
11. Mineralojik dolgular olarak asfaltik betonlarda,
12. Tarımsal alanlarda: Gübreler, tarımsal kazıklar, yem bahçelerinde, sığır besiciliklerinde, toprak formu değişikliklerinde.

Ayrıca uçucu küller karayollarında ses bariyerleri, PVC borular, peyzaj, deniz kazıklarında, tavan ve zemin döşemeleri, flotasyon cihazlarında, alet saplarında, sıvalarda, geopolimerlerde, hücresel betonlarda, çatı granüllerinde, kiremitlerde, mutfak araçlarında, yapı mantolamadaki elektrik direklerinde, parktaki banklarda, taşlar, demiryolu traverslerinde, izolasyon panellerinde, bowling topları vs. üretimlerinde yer alabilmektedirler.

1964 yılında uçucu küllerin ülkemizde ilk defa Devlet Su İşleri'ndeki çalışmalarda kullanımları mevcuttur. 1971 yılında yapımı tamamlanan Gökçekaya Barajı'nın inşaatında uçucu küllerden faydalanılmıştır. Türkiye' de yıllık termik santrallerden 15 milyon tonun üzerinde uçucu kül elde edilebilirken, uçucu küllerin %25'i betonların üretiminde yer alabilmektedir. Yüksek fırın curufları ve uçucu küller gibi atıkların değerlendirilmesi amacıyla beton üretimlerinde 2013 senesinde 1,5 milyon ton uçucu kül kullanılmıştır [8].

3.8.1. Uçucu Küllerin Tuğla Üretiminde Kullanımı

Tuğla üretimlerinde kullanılan killeri Na_2O , K_2O , MgO , Fe_2O_3 , CaO , SiO_2 , TiO_2 ve Al_2O_3 oksitli bileşiklerini barındırmaktadır. Tuğla üretimlerinde uçucu küllerde killeri gibi benzer içeriklerden meydana geldiklerinden rahatlıkla kullanılabilir. Uçucu küller tuğlaların pişme ve kuruma küçülmelerini tuğla üretimleri esnasında düşürebilmektedir. Uçucu küller yapılarındaki karbonun pişirim özelliklerini etkilemesiyle tuğla üretimlerinde enerji tasarrufu sağlayabilmektedir [33].

Uçucu küller farklı tip kimyasal kompozisyonlara sahip olduklarından tuğlaların üretimlerinde kullanılacak uçucu küller ve killeri açısından genellemeler yapılmamalıdır. Yapılacak deneylerle uçucu küllerin tuğla üretimlerinde hangi tip killeri birlikte kullanılabilceği sonucuna varılabilmektedir. Kullanılan aynı tip uçucu küller olsalar dahi değişik killeri tiplerine göre farklı sonuçlar meydana gelmektedir.

Kil tuğlaların üretim aşamaları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

1. Ögütme işlemleri.
2. Killeri çamur kıvamına getirme.
3. Bekletme.
4. Kalıpla şekil verme.
5. Nem giderme.
6. Pişirim ve ambalajlama [33].

Uçucu küllerle tuğla üretimleri, uçucu küllerin oranlarına göre iki farklı açıdan incelenebilmektedir. İlk durumda killer ana malzemeyi meydana getirirken, uçucu küller bünyelerinde barındırdıkları karbonların yanma değerlerinden yararlanabilmek ve killerin özelliklerini geliştirebilmek amacıyla kullanılabilirler. İkinci durumdaysa uçucu küller ana malzemeler olup, plastiklik özelliklerini sağlamak amacıyla farklı tip killer bağlayıcı malzemeler gibi kullanılabilirler. Uçucu küller iki durumda tuğlaların üretimlerinde yer alabilmiştir.

Uçucu küllerin killerle optimum seviyelerde verim sağlayabilecekleri oranların tespitiyle önemli avantajlar ortaya çıkabilmektedir. Bunlar:

1. Kolay pişirim özellikleri ve yakıtta sağlanan tasarruflar,
2. Kolay kurutma işlemleri,
3. Daha az kuvvet etkisiyle kalıplama,
4. Yapışkan ya da yağ killerle çalışıldığında öğütme işlemlerinde değirmenlerin hızlı beslenebilmesi.

Tuğla üretimlerinde uçucu küllerin tane boyutları üretilecek tuğlaların özelliklerine direkt etkileyebilmektedir. Basma mukavemetleri ve bulk yoğunluklarında artışlar istenmesi halinde tane boyutu küçük uçucu küllerin kullanımları uygun olabilmektedir. Uçucu küllerin tane boyutları büyükse bu parametrelerdeki değerler düşebilir. Ayrıca küçük tanelerden meydana gelen uçucu küller tuğlalarda su emme, pişme küçülmesi değerlerini düşürebilmektedir. Küçük tanelerden oluşan uçucu küller, tuğlaların üretimlerinde tanelerdeki teması maksimum seviyede gerçekleştirdiklerinden dolayı yoğunluk artmakta yüksek kaliteli tuğlalar üretilebilmektedir.

Ayrıca killi tuğlaların pişirilmesinde kullanılan geleneksel fırınlar yerine sıkıştırma özelliği gösterebilen fırınların kullanımları çok daha verimli sonuçlar verebilmektedir. Uçucu küllerin barındırdıkları karbonların yanma enerjileri, termal verimlilikleri yüksek düşük maliyetlerdeki sıkıştırılmalı fırınlarda daha iyi değerlendirilebilmektedir [33].

Literatürde uçucu küllerin tuğla üretimlerinde kullanımlarıyla alakalı çalışmalarda uçucu küllerden elde edilen tuğlarla başlangıçta referans gösterilen tuğlalar arasında çok büyük farklar bulunmamaktadır. 0,1-10 mikron aralığındaki tane boyutlarındaki uçucu küllerin önemli ölçülerde durabilitelerin gelişmesine sebebiyet verdikleri açıklanabilmiştir. Uçucu küllerin tuğlalara ilavesiyle, hacimsel ağırlıklarında belirli oranlarda artışlar görülürken, pişme küçülmesi, kuruma küçülmesi ya da toplam küçülme değerlerinde az miktarlarda değişimler meydana gelmiştir. Uçucu küllerle üretilen tuğlalarda su emme özelliklerinin düşmesinin yanında referans tuğlalardaki mukavemet değerlerine ulaşabilmesi gerçekleşmemiştir. %70-100 oranlarında uçucu küllerin tuğla üretimlerinde kullanımlarıyla gerçekleştirilen farklı bir çalışmada uçuşucu küllerin yüksek oranlarda olmasıyla referans tuğlalara nazaran daha düşük ısı iletimlerinin, birim ağırlıklarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Hatta uçucu küllü numune tuğlalarının ısı iletim katsayılarının gazbetonlara yakın olabilecekleri sonucuyla açıklanabilmiştir [40].

3.8.2. Uçucu Küllerin Çimento ve Beton Yapımında Kullanımı

Çimentoya katkı olarak eklenebilen uçucu küller, betonların özelliklerini iyileştirmekte çimentolardan tasarruf edilmesini sağlayabilmektedir. Isıl işlem görmüş, doğal ya da yapay mineralojik katkı malzemeleri çimentolarda değerlendirilmektedir. Betonlarda ve çimento üretimlerinde yapay puzolanik olarak uçucu küllerde kullanılabilir. Puzolandaki reaktif silisler, çimento yada betonlarda kullanılabilen mineralli katkıların puzolanik aktivitelerini tetikleyerek, puzolanik özellikte olmalarını sağlamaktadır. Puzolanik aktiviteler açısından silisler ve alüminli mineraller tipleri ve oranlarıyla belirleyici olabilmektedirler. Puzolandaki kalsiyumhidroksitle, alüminasilikatlar arasında gerçekleşen reaksiyonların kapasiteleri ve hızları puzolanik aktiviteyi meydana getirmektedir. Uzun süreçlerde puzolanik aktivite, puzolanların mineralojik ve kimyasal kompozisyonlarına bağlı gelişirken, kısa süreçlerdeyse yüzey alanlarına bağlı gelişmektedir.

Uçucu küllerin puzolanik özellikli olabilmeleri silisli, demir oksitli, alüminalı bileşenleri barındırması ve küçük tane boyutlarından meydana gelmeleri

gerekmektedir. Ayrıca puzolanik aktivite aynı kimyasal kompozisyonlarda dahi farklılıklar gösterebilmektedir. Çoğunlukla betonlarda kireç oranları düşük uçucu küller kullanılmaktadır. Uçucu küllerin yüksek oranlarda CaO'dan meydana gelmeleri durumundaysa betonların stabilite ve dayanımları düşebilmektedir. Sülfürler ve karbonlardan meydana gelen uçucu küllerse, betonların içerisinde reaksiyonlara girerek alkali oranlarını attırdıklarından dolayı oluşabilecek korozyonları hızlandırabilmektedir. Uçucu küllerdeki karbonların artışıyla betonlar kara görüntü meydana getirebilir ve elektrik iletimleri de hızlanabilmektedir. Fakat uçucu küllerin karbon miktarlarındaki artışları, betonlarda su gereksinimlerini arttırmaktadır. Diğer yandan %20-30 oranlarında uçucu küllerin betonlarda kullanımlarıyla, betonlarda korozyon direnci ve dayanımlarının geliştirilmesini sağlayabilmektedir [40].

Uçucu küllerin çimentolara ilavesiyle, betonların klor geçirgenliğinin büyük ölçülerde azaldığı, kimyasal reaksiyonlara karşı dayanıklılığın arttığı ve geçirim oranlarının azalarak stabiliteyi arttırdığı tespit edilmiştir. Ancak uçucu küller betonların kısa süreli mukavemetlerini azaltmaktadır. Aynı zamanda belirli oranlarda uçucu küllerin kullanımlarıyla elde edilen betonlarda, hiç uçucu kül barındırmayan betonlara nazaran dayanımları daha uzun süreli artışlar gösterebilmekte, betonlarda kılcallıklar ve su geçirimsizliklerinde azalmalar meydana gelmektedir. Puzolanik özellikli uçucu küller barındıran çimento harçları, klasik çimentolara nazaran daha kısa sürelerde öğütülebilmektedir. Çoğunlukla uçucu küller barındıran puzolanik özellikli çimento harçları, klasik özellikteki çimento harçlarına göre daha yüksek dayanımlar sergileyebilmektedirler.

Uçucu küllerin portland çimentolarına ilaveleriyle çimentolarda hidrasyon gerçekleşmekte, betonların erken dayanımları düşebilmektedir. CaCl_2 , Na_2SO_4 gibi aktivatörler kullanılarak, uçucu küllerle serbest kireçler arasındaki puzolanik reaksiyonları hızlandırarak dayanım değerlerinde iyileşmeler sağlanabilmektedir. %40-60 oranlarında uçucu küller barındıran çimentolara %3 Na_2SO_4 ilaveleriyle hidrasyon hızlarının büyük ölçülerde arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca %30-40 oranlarında uçucu kül barındıran çimentolarda uçucu küllerin mukavemet gibi

mekanik değerlerin gelişmesini sağladıkları belirlenmiştir. %50 oranlarındaki uçucu küllü bileşimlerdeyse, 35 MPa üzerinde dayanım değerlerine ulaşılabilir [40,41]. Uçucu küller, betonlarda aşağıdaki sebeplerden dolayı sıklıkla kullanılmaktadır:

1. Betonlarda istenilen mukavemetlerin elde edilmesi,
2. Şekil verilebilirliği arttırmak,
3. Hidratasyon ısılarını düşürebilmek,
4. Maliyeti düşürebilmek.

Uçucu küllerin farklı tipteki kompozisyonları betonların özelliklerine direkt etki etmektedir. Uçucu küllerin bu farklılıklarını karışım oranlama metotları sayesinde betonlar üzerinde olumlu sonuçlar verebilmeleri amacıyla kullanılmaktadır.

Çoğunlukla yüksek oranlarda uçucu küllerin kullanıldığı çimentolarda dayanım değerleri uçucu kül içermeyen betonlara nazaran daha düşük dayanımlarda oldukları tespit edilmiştir. Fakat düşük oranlarda uçucu küllerin kullanımlarıyla referans çimentolara nazaran daha yüksek dayanımların elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca uçucu küllerin oranlarında yapılabilecek oynamalarla betonların ileriki süreçlerde verebilecekleri dayanım değerlerinin daha erken meydana gelebileceği düşünülmektedir.

Pratikte betonların içerisinde uçucu küller 2 farklı tipte kullanılabilir:

1. Uçucu küllerin, betonların yapısına ilaveler olarak eklenmesi,
2. Çimentoların yerine uçucu küllerin yer aldığı çimentoların üretilmesi.

Sertleşmiş yeni betonlarda uçucu küller, ince agregalar olarak yer alabilirken, su gereksinimlerini düşürebilmektedir. Sertleşmiş betonlardaysa uçucu küller, matrisin bir parçası gibi hareket ederek mukavemet ve stabiliteyi artırabilmektedir. Uçucu küllerin betonlarla karışım oranları bu açıdan iyi değerlendirilmelidir [42].

3.8.3. Uçucu Küllerin Hafif Agregada Yapımında Kullanımı

Uçucu küllerden elde edilen agregalar sayesinde daha ucuz ve çevreyle uyumlu hafif betonlar üretilmektedir. Uçucu küllerden elde edilen agregalarda tıpkı uçucu küller gibi kimyasal kompozisyonlarına göre farklı davranışlar sergileyebilirler. Düşük oranlarda öğütülmüş kömürler, suyla karıştırılarak 1100-1200°C’ de sinterlenmesiyle nodül yada peletler elde edilmektedir. Yüksek mukavemet değerlerine sahip agregalar betonlara ilave edilerek, yüksek dayanımlı blokları meydana getirebilirler. Ayrıca binalardaki temel masraflar, işçiliklerle birlikte ses ve ısı iletimleri azalmaktadır [33,40].

Uçucu küller betonların üretimlerinde çimentoların yerine belirli miktarlarda ilave edilerek kullanılabilir. Hacimce ya da ağırlıkça uçucu küllerler birebir oranlarında çimentoların yer değiştirmeleriyle elde edilen betonlarda basınç ve eğilme mukavemetlerinin kısa süreçlerde azalırken, uzun zaman dilimlerinde artışlar elde edilebilmiştir. Aslında uçucu küller betonlarda hidrasyon ısısının düşürülmesinde önemli parametlerin yakalanmasını sağlamalarından dolayı tercih edilirken, ilerleyen süreçlerde dayanım değerlerinin arttığı tespit edilebilmiştir. Uçucu küller betonlarda hafif agregalar olarak yer alırken, belli oranlarda bağlayıcılık özelliklerini etkileyebilmektedir. İlk zamanlarda bağlayıcılık özelliklerine uçucu küllerin katkısı azken, uzun süreçlerde bağlayıcılık değerleri, dayanımları gelişebilmektedir [42].

3.8.4. Uçucu Küllerin Zemin Uygulamalarında Kullanılması

Uçucu küller, dolgu malzemeleri niteliğinden dolayı yol yapımlarında ya da toprakta stabilizasyonu sağlayabilmek amacıyla temel malzemeleri gibi farklı alanlarda değerlendirilebilmektedir [33].

Uçucu küller farklı tip zeminlerde, zeminlerin özelliklerini ve ürünleri iyileştirebilmek ve aynı zamanda geliştirebilme amacıyla kullanımları mevcuttur. Ayrıca uçucu küller molibden, bor, alüminyum, selenyum elementlerini çekme

eğilimleri olduğundan, insanlar açısından ürün alınabilecek havasız topraklarda zararlı maddelerin seviyelerini düşürerek, insan ve hayvan sağlığının korunmasını sağlayabilmektedir. Killi zeminlerde farklı tipteki uçucu küllerin değerlendirilmesi, serbest basınçtaki mukavemetlerinin ve su ihtiva seviyelerinin artışıyla olurken, plastiklik özellikler olumsuz olarak etkilenmemektedir. Yolların yapımında uçucu küllerin, düşük oranlarda ve farklı kimyasal katkılarla dolgu gibi kullanılmasıyla, yol yapımlarında istenilen mukavemetlerin elde edilmesi hızlı gerçekleşmektedir [40].

3.8.5. Uçucu Küllerin Gaz Beton Yapımında Kullanımı

Gaz betonlar; kum, kireç, alüminyum tozları, farklı tip çimentolarla uçucu küllerin birleşimlerinden meydana gelmektedir. Karışımlara sıcak su ilavesiyle, kireç ve alüminyum tozları reaksiyona girer. Beton bloklarda belirli boyutlarda hidrojen kabarcıkları meydana gelirken, havanın içeri girebilmesiyle hafif, dayanıklı yapı malzemeleri üretilebilmektedir. Hafiflikleri ve binalarda ısı yalıtımları amacıyla kullanılabilen bloklar otoklavlarda buharın etkisiyle istenilen özelliklere ulaşmaktadır [33].

Uçucu külleri barındıran gaz betonlarda, % 75 civarında kullanımları uygun görülmektedir. Çoğunlukla uçucu küller yeterli inceliklerde olduklarında agrega kullanımları açısından öğütülmelerine gerek duyulmamaktadır. Ayrıca mukavemet ve ısı yalıtımları açısından uçucu küllerden meydana gelen gaz betonların kuvars kumlarıyla üretilen betonlara nazaran daha iyi özellikler gösterdikleri tespit edilmiştir. Puzolanik özellikli uçucu küller, kireçlerle reaksiyonlarıyla mikro yapılarında güçlü yeni bağlar meydana getirebilmektedirler. Uçucu küllerin betonların renklerine etkilemeleri siyah yada gri olmalarıyla açıklanabilmektedir [40].

3.8.6. Uçucu Küllerin Diğer Alanlarda Kullanımı

Uçucu küllerin kullanıldığı diğer uygulama alanları aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1. Asfalt ve beton yolların yüzeylerinde kaymaları önlemek amacıyla,
2. Yolların temel kısımlarında filler olarak,
3. Farklı tip zeminlerin stabilizasyonlarında,
4. Refrakterler ve cam seramik endüstrisinde,
5. Farklı tip boyaların elde edilmesinde,
6. Atık maddelerin stabilizasyonlarında,
7. Bitkilerin yetiştirilmelerinde,
8. Farklı yapılarda taşkınların önlenmesinde,
9. Barındırdıkları nadir elementlerin alınabilmesinde,
10. Döküm sektöründe farklı döküm kumları olarak,
11. Püskürtmeyle metalik yüzeylerin temizlenmesinde,
12. Petrol kuyu sondajlarında [33,40].

BÖLÜM 4. KARO SERAMİK YAPI MALZEMELERİ

4.1. Karo Seramik Yapı Malzemelerinin Tanımı

Seramik karolar yüksek oranlarda porozite ve su emme değerlerindeki iki ana katmandan meydana gelen seramik esaslı malzemelerdir. Seramik karolar farklı tip ve farklı özelliklerde bulunabilirler [43,44]. Sıklıkla kullanımdaki karo seramikler şunlardır:

1. Yer karoları.
2. Dış cephe seramikleri.
3. Fayanslar.
4. Mozaikler.

Tablo 4.1. Karo seramik türleri [5].

Bünye Türleri	Bünye Renkleri	Su emme davranışları %	Pişirim sıcaklıkları °C	Bünyelerin Özellikleri	Elde edilen ürünler
Fayanslar	Beyaz ya da renkli	10-22	1000-1200	Yumuşak, opak, poroz.	İç yüzey seramikleri.
Pekişmiş Çiniler	Beyaz ya da renkli	1-10	1200-1300	Az porozite, sert ve opak.	Yer karoları, dış cephe seramikleri, iç yüzey seramikleri.
Porselenler	Beyaz	0-1	1250	Sert, yoğun.	Karolar, dış cephe seramikleri.

Seramik karoların alt kısımlarını toz karışımlarının sinterlenmelerinden meydana gelen bünyeler, üst kısımlarını inorganik ve camlaşabilen oksitli ince tabakalardan meydana gelen sırlar oluşturmaktadır. Konutların duvarlarında ve yer yüzeylerinde kullanılabilen, inorganik malzemelerden meydana gelen seramik karolar, teknolojinin gelişmesiyle birlikte sırlı yada sırsız, iç yada dış, duvarlar yada yerler gibi farklı tiplerde elde edilip, uygulanabilmektedirler [26,44].

4.2. Karo Seramik Bünyelerinin Hazırlanması

Seramik karoların üretimlerinde iki grup hammaddeler kullanılabilir. Bunlar:

1. Feldspat grubu hammaddeleri.
2. Kaolen yada kil grubu hammaddeleri.

Seramik karo bünyelerinin neredeyse tamamı feldspat, kuvars ve kaolen karışımlarından meydana gelmektedir. Bünye hazırlamanın ana prensibini oluşturmaktadırlar [5].

Ayrıca cam, glazür ve çimento üretimlerinde CaCO_3 (kalsit) barındıran hammaddelerin kullanımları yaygındır [5,26].

4.3. Seramik Karoların Hammaddeleri

Fayanslar beyaz hamurlardan meydana gelen, yüzeyinde sırları barındıran gözenekli seramiklerdir. Muhtelif tipleri 1050-1250°C sıcaklık aralıklarında pişirilerek elde edilirler. Fayanslarla porselenler arasındaki en önemli farklardan birisi porselenlerin sertleşme gösterirken fayanslarda böyle bir durumun gerçekleşmemesidir [5,26].

Doğal mineralleri yapısında barındıran fayanslar, üst kısımlarında yarık, çatlak gibi açıklıkları buldurmeyen sırlardan meydana gelmektedir. Fayanslar farklı geometrik şekillerden meydana gelebilirken, mat yada parlak tonlarda olabilmektedir. Çoğunlukla krem yada beyaz renkli fayansların sır yapılarından

kaynaklı uzun süreli dayanımlar gösterebilmektedirler. Çoğunlukla fayanslarda aranan özellikler:

1. Fayansların köşeleri 90 derece olmalıdır.
2. Fayanslar düzgün ebatlarda olmalıdır.
3. Glazürler fayansların üst kısımlarını iyice kapatmalıdır.
4. Sırlarla fayansların uzama katsayıları uyumluluk göstermelidir.
5. Glazürlerin renkleri heterojen olmamalıdır.
6. Glazürler yapılarında kabarcıkları, çöküntüleri, benekleri barındırmamalıdır.

Bu nitelikli seramik karoları üretebilmek açısından topraktaki hammaddelerin elde edilmesinde ve üretim proseslerinin oldukça hassas gerçekleştirilmesi gerekmektedir. İyi pişirilmiş fayanslar sert yapılardır. Sert fayanslara sivri uçların temaslarında bile yıpranma, çizikler meydana gelmez. Fayanslarda sertlik dereceleriyle direkt gözenek miktarlarıyla alakalıdır [5].

4.3.1. Kaolenler

Kaolen hammaddeleri çoğunlukla $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ kimyasal kompozisyonundan meydana gelmektedir. Kaolenleri meydana getiren en önemli bileşenlerse kaolinitlerdir [45]. Seramik karolar açısından:

1. Kaliteli bir kaolinit yapısında %39 Al_2O_3 barındırabilmelidir.
2. Farklı renklerdeki killerin renklerini absorbe edebildiğinden, masseye beyazlık katmak amacıyla kullanımları mevcuttur.
3. Massenin temellerini kaolinitler meydana getirir.
4. Kaolenler kristal suyunu $300-450^{\circ}C$ 'de atabilmektedirler. $1430^{\circ}C$ 'de sinterleşme gerçekleşirken, $1710^{\circ}C$ 'de eriyebilmektedirler.
5. Massedeki oranları arttıkça termal ısı değişikliklerine karşılık dirençleri artabilir ve pişirilme sıcaklıkları yükselebilmektedir.
6. Massedeki artış oranlarıyla yüksek mukavemetler elde edilebilir.

7. İnce taneli kaolenler massede poroziteyi düşürebilir, kuru küçülme değerleri artabilmektedir. İri taneli kaolenlerin tercihindeyse ters sonuçlar elde edilecektir.

Uzama katsayıları yüksek olduğundan sırlarda çatlamalara etki edebilirler. Massede kırık bisküviler ve pişirilmiş kaolenler kullanılabilir. Böylece çoğunlukla massenin iskelet yapısını güçlendirebilmekte, yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir [5].

4.3.2. Killer

Çoğunlukla ince tanelerden ve topraklardan meydana gelen killer, feldspatlar, grovaklar, kil şistleri, kaolenleri barındıran kayalardaki aşınmalarından ve sulu havzalarında çökelmelerinden meydana gelmektedir [46].

1. Killerin kullanımlarındaki verimliliği arttırabilmek amacıyla 3 yada daha fazla tipteki killerin birlikte kullanımları massedeki direkt etkileri azaltabilecektir.
2. Killerin plastiklik özelliklerinden dolayı massedeki kuru mukavemet değerlerinde artışlar meydana gelebilmektedir.
3. Çoğunlukla killer sıkı biçimde pişirilebilmektedirler.
4. Killerin pişirilmeleri poroz, sarımsı yada beyaz renklere gerçekleştirilirken, masselere % 7 civarlarında eklenebilmektedirler [5,46].

4.3.3. Kuvars

Kuvars hammaddelerinin zenginleştirilme işlemleriyle yüksek saflıklara (%99 SiO₂) yakın elde edilebilen kaynaklar çok kıymetli olabilmektedir [47].

1. Kuvarslı hammaddeler ucuz olduklarından dolayı diğer hammaddelerle birlikte kullanıldıklarında yüksek oralarda masselere eklenebilmektedirler.

2. Massedeki kuvarsların oranı arttıkça sertlik değerlerinde artışlar meydana gelebilmektedir.
3. Farklı modifikasyonlara sahip kuvarsların ısıtma yada pişirilmeleriyle birbirlerine dönüşümleri gerçekleştirilebilmektedir. Masselerde %7 civarlarında hacim değişiklikleri meydana gelebileceğinden yarıklar, çatlamlar gerçekleşebilmektedir.
4. Kuvarlı hammaddelerin massedeki işlevleri önemli olup, tanelerin ince olmasıyla işlevsellikleri arttırılabilmektedir.
5. Yapısında bolca kuvars barındırabilen bisküvilerde soğuma işlemleri gerçekleştirilirken, glazürlemede çekme fazla gerçekleşebileceğinden bombeli fayanslar meydana gelebilmektedir.
6. Masselere mermer, dolomit, feldspatlar eklenerek, kuvarslı hammaddelerin zararları engellenebilmektedir.
7. Kuvarsların ergimesi esnasında camlaşmalar meydana gelirken, uzama katsayıları küçülebilmektedir. Glazürlerde düşük katsayılı uzama katsayılarında yer almalarından çatlamalara engelleyebilmektedirler [5].

4.3.4. Feldspat

K_2O , CaO , Na_2O bileşiklerini barındıran alkali hammaddelerden en önemlisi feldspatlardır. Feldspatlar tabiatta saf olarak yer almamaktadırlar [5,48].

1. Feldspat oranları arttıkça ergime noktalarında düşmeler gerçekleşmektedir.
2. Ak çinilerdeki feldspatlar $1165^{\circ}C$ 'de ergimelerine rağmen, $1040^{\circ}C$ 'lerinde sertleştirici (pekiştirici) görevini üstlenmişlerdir.
3. Feldspatlar $1250^{\circ}C$ 'lerde ergimekte, masselere akışkanlık özelliği katabilmektedir.
4. Maddelerin plastikliklerini düşürebilmektedir.
5. Masselerde feldspatların oranları artarsa kaolenlerinde ergime dereceleri düşebilmektedir.

6. Kuvarsların uzama katsayılarını düşürmelerinden dolayı meydana gelebilecek olumsuz etkileri gidermek amacıyla kullanılırlar ve yarılmaların, çatlamaların meydana gelmesine engel olabilirler.
7. Belirli oranlarda masselerin üzerinde ergiyerek, poroziteleri düşürebilir ve mukavemetlerini arttırabilmektedir.
8. Feldspatları barındıran masselerde pembe benekleri meydana getirmektedir.
9. Masselerde pahalı olmaları nedeniyle belirli oranlarda kullanılabilirler.
10. Kalsiyumlu, sodyumlu feldspatlara pişirme işlemleri gerçekleştirilirken, 1200°C'de yumuşayabilir, 1220°C'de ergiyebilmektedir [5,48].

Potasyumlu feldspatların pişirilmesindeyse ergime dereceleri ve yumuşayabilme dereceleri birbirlerine yakın değildir. Bu sebeple potasyumlu feldspatların kıymetleri seramiklerde üst seviyededir. Potasyumlu feldspatların ilavesiyle fırınlarda farklı bölgelerin farklı zamanlarda ısınabilmelerinden dolayı yumuşayabilme, ergime dereceleri yakın olan hammaddeler bir taraf ergiyebilirken, diğer tarafta gerçekleşmediğinden potasyumlu feldspatlarla denge kurularak masselerde deforme olması engellenebilmektedir [5,48].

4.3.5. Pegmatitler

1. Pegmatitler, %70 civarlarında feldspatlarla %30 oranlarında serbest kuvarsların birleşimlerinden meydana gelmektedir.
2. Pegmatit, titan ve demirleri barındıran renklendirici özelliğindedir. Titan ve demirlerin massede az oranlarda yer almasıyla sarılıklar meydana gelebilmektedir. Fayanslar açısından önemsiz ancak seramik yer karoları açısından önemli etkenlerdendir.
3. Saf feldspatların az bulunabildiği ülkemizde pegmatitler yeterli miktarlarda bulunmaktadır [5].

4.3.6. Kalker-mermerler ve dolomit

Mermerler, kalkerli ve dolomitli kaynakların basınçlar ve ısı yardımıyla metamorfozundan meydana gelmektedir. Mermerler %90-99 oranlarında kalsitleri barındırabilmektedirler [49,50].

1. Dolomitler masselere mermerlerin etkilerine benzer etkiler sergilerler.
2. Kuvarslı hammaddelerin uzama katsayılarını düşürmelerinden dolayı olumsuzlukları gidirmek amacıyla eklenebilmektedirler.
3. Masseler fazla mermer barındırmaları durumunda pembeleşmeler ve sarı beneklenmeler gerçekleşebilir.
4. Fayanslarda kuvarsların zararlı etkilerini giderebilmek amacıyla 1200°C'den aşağılara inildikçe mermer oranları artabilmektedir. Aksi durumdaysa mermer oranları düşecektir.
5. Masselerin mermer barındırmaları durumunda hızlı yumuşayabildiklerinden kolaylıkla deforme olabilmektedirler.
6. Masselere çoğunlukla %0,5-1 oranlarında mermerler yada dolomitlerin eklenmesiyle masselerde zararlı etkilerden korunmalar gerçekleştirilebilir.
7. Alkali özellikli mermer barındıran masseler suyla birleşimleriyle meydana gelebilecek hacimsel değişiklikler glazürlerde yarılmalara, çatlamalara sebep olabilmektedir.
8. Dolomitleri yada mermerleri barındıran masseler otoklavlarda 3 atmosferlik basınç altında 2 saat süreyle tutulmalarından meydana gelebilecek çatlamalar ve yarımlarla dolomitlerin ve mermerlerin ideal oranları tespit edilebilmektedir [5,49,50].

4.3.7. Magnezit

MgCO₃ bileşiminden meydana gelen magnezitler, karbonatlı kalsitler grubundadır. Saf magnezitler %52,2 CO₂, %47,8 MgO barındırmaktadır. Magnezitler Fe⁺² gibi bileşenlerle katı-eriyikleri meydana getirirler. Amorf yada kristalin magnezitler çoğunlukla beyazdan siyaha renkleri alabilmektedir. Kalsitli ve dolomitli

hammadeleri magnezitli hammaddelerden ayırabilmek amacıyla HCl kullanılması yaygın metottur. HCl ilavesiyle dolomitli hammaddeler az oranlarda köpürebilir, kalsitli hammaddeler fazlaca köpürebilir ancak magnezitli hammaddelerde köpürmeler yok denebilecek kadardır. Magnezitlerin barındırdıkları karbonatlar 900°C'de parçalanarak fayansların bünyesinden ayrılırlar [26].

4.4. Fayans (ak çini) türleri

4.4.1. Feldspatik fayans

Feldspatik fayansların hamurları 1140-1300°C sıcaklık aralıklarında pişirim işlemleri gerçekleştirilmektedir. Pratikte feldspatik fayanslar 1230°C'de pişirilmektedir. Sağlık gereçleri alanında feldspatik fayanslar kullanıldığından pişirilmeleri yüksek ısılarla gerçekleştirilmektedir.

Feldspatik fayanslar, kaşkerli fayanslara nazaran daha sert ve sağlamdır. Sağlamlıkları ston, feldspat yada pegmatitlerden ileri gelmektedir. Feldspatik fayanslarda safsızlıklar kireç, kil ve magnezitlerden sağlanabilmektedir. Ayrıca feldspatik fayanslar, kalkerli fayanslardan daha az porozite barındırırlar. Feldspatlı fayanslarda silis gereksinimleri silis kumları ve pişmiş çakıllardan karşılanabilmektedir. Fayanslardaki alkalileri ston, kum, feldspatlar yada pegmatitler meydana getirmektedir [51].

Feldspatik fayanslar en verimli fayans tipleridir. Feldspatlar yaklaşık 1040°C'de sertleştirici görevini gerçekleştirirler. Ak çinilerin pişirilmeleri 1040°C'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilirse feldspatların eklenmelerine gerek duyulmamaktadır. Feldspatik fayanslar çoğunlukla %42-55 kuvars, %40-55 killer, %3-5 feldspatların karışımlarından meydana gelmektedir [5,51].

4.4.2. Kalkerli fayans

Kalkerli fayansların hamurları 960-1140°C sıcaklık aralıklarında pişirim işlemleri gerçekleştirilmektedir. En düşük sıcaklıklarda pişirilme işlemlerinin gerçekleştirildiği fayans tipleridir. Tabiattaki kiler yeterli alkali barındırmadığından kalkerli fayanslara MgO, CaO ilaveleri yapılmaktadır. Kalkerli fayanslarda MgO ilavesiyle ergime dereceleri düşürülebilmektedir [51].

Kalkerli fayanslar çoğunlukla %40-55 kiler, %40 kuvars, %20-25 mermerlerden meydana gelmektedir. Ak çinilerde 2-3 farklı tip kaolenit karışımlarından kalkerli fayanslar meydana gelmektedir. Kalkerli fayanslardaki mermer oranları 1190°C'nin altlarında artmaktadır.

Kalkerli ak çiniler %19-25 oranlarında mermer barındırabilmektedir. Bu sebepten dolayı 950-1200°C sıcaklık aralığında pişirmeleri gerçekleştirilebilmektedir. Kalkerli fayanslarda bünyeyle sırların uyumları oldukça önemlidir. 1050°C'de pişirilmesi amaçlanan kalkerli fayanslar:

1. %10 saf mermerler,
2. %30 kuvars,
3. %60 kaolenlerden meydana gelmektedir [5,51].

Ayrıca feldspatlı, kalkerli fayans hamurları hazırlanabilmektedir. 1100°C'de pişirimi gerçekleştirilecek fayans hamuru:

1. %3 feldspatlar,
2. %6 mermerler,
3. %41 kuvars,
4. %50 kilerden meydana gelmektedir [5].

Hazırlanan hamurlara mermerlerin yada feldspatların eklenmeleriyle fayansların sertlikleri doğru orantılı biçimde arttırılabilmektedir. Duvar karoları yaklaşık

1050°C'de pişirilebilmektedir. Bu seramik tipi karolar %10'a kadar mermer, %5'e kadar feldspatları barındırabilmektedir [5,51].

4.4.3. Magnezitli fayans

Magnezitli fayansların bisküvileri 1260°C'de seramik yer karolarıyla birlikte üretilmektedir. %5 oranındaki magnezit ilavesiyle hammaddelerin sinterleşmeleri gerçekleştirilmektedir. Feldspatlı, kalkerli bisküvilerle magnezitli bisküviler tek tipte sırlanarak 1050°C civarlarında aynı fırınlarda pişirimleri gerçekleştirilebilir [5].

4.5. Yer ve Duvar Karolarının Üretimi

Başlangıçta duvar karolarını üretebilmek amacıyla hammaddeler reçetelere göre belirlenmektedir. Yer karolarının reçeteleriyle duvar karolarının reçeteleri bisküvi pişirimlerinin gerçekleştirilebilmeleri açısından ayrı gruplarda elde edilmektedir. Fayansları meydana getiren hammaddelerden killeri, feldspatlar, mermer, kaolenler ve diğerlerinin ağırlıkları belirlenerek değirmenlere yerleştirilmektedir. Aynı oranlarda flint taşlarıyla su eklenerek belirli kıvamlarda sulu çamurlar elde edilmektedir. Ardından sulu çamurlara homojenizasyon ve dinlendirme işlemleri gerçekleştirilerek, basınçlı süzme aparatlarında (fitler pres) su süzülüp, ayrılmaktadır. Çamurlar üzerinde barındırdığı rutubetle birlikte kurutma arabalarıyla, kurutma kamaralarına gönderilmektedir. Nemli çamurlar kurutma kamaralarındaki sıcak havalarla yapılarındaki suları kaybederek, bütünüyle kurutulabilmektedir [5,26].

Seramik karoların şekillendirilmeleri kuru presleme metoduyla hidrolik preslerle gerçekleştirilebilmektedir. Boyutsal kararlılıkları, yoğunlukları fazla seramikler elde edilebilmektedir. Seramik karolara pişirim işlemleri gerçekleştirildikten sonra meydana gelen küçülmeler her açıdan eşit olabilmektedir. Şekillendirilen karolara homojen basınç dağılımları yapılabilmektedir.

Preslemenin basamakları:

1. Kalıbın reçetelerdeki hammaddelerle doldurulması
2. Ön presleme işleminin gerçekleştirilmesi
3. İlk preslemelerle granüllerden hava çıkışları
4. İkinci kez sıkıştırılarak gerçek presleme işlemi
5. Karoların kalıplardan çıkarılarak eldesi.

Seramik karolar kurutma işlemlerinde başlangıçta barındırdıkları %6 civarındaki nemin, %1 ve altına indirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Seramik karolarda sırların kurumalarını engellemek amacıyla 75-95°C'de sırlama işlemlerine geçilebilmektedir [26].



Şekil 4.1. Yapısal karo seramikler [53].

Seramik karoların üretimlerinde fırınlardan çıkarılmış, pişirilme işlemi gerçekleştirilmiş fayanslar bisküvi fayanslarıdır. Kırıklar, çatlaklar barındıran bisküvi fayanslar ve sağlam bisküvi fayansları birbirinden ayırma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Sağlam bisküvi fayansları sırlama makinelerine sırlama amacıyla nakledilmektedir. Sırlama makinelerinde sırlama işlemleri gerçekleştirildikten sonra seramik karolar arabalara dizilmektedir. Ardından seramik karolara yaklaşık 1000°C'de ikinci pişirilme işlemi uygulanmaktadır. Fırından çıkarılan karoların mutlaka kalite kontrol işlemleri gerçekleştirilmelidir [5,26]. .

Seramik karolar ile ilgili Avrupa ve Türk Standartları aşağıdaki Tablo 4.2.'de verilmiştir.

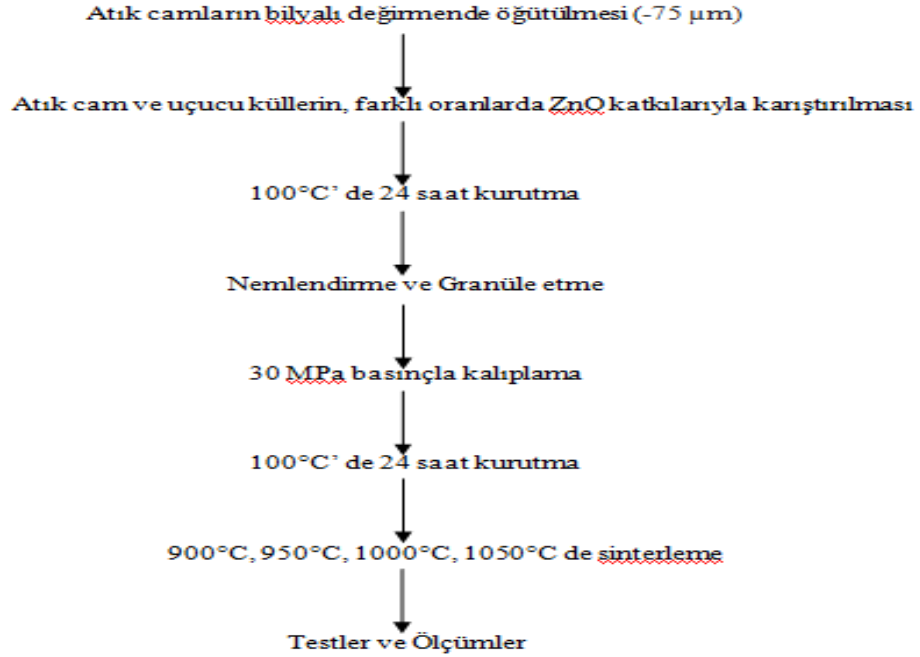
Tablo 4.2. Seramik karolar ile ilgili Avrupa ve Türk Standartları [15].

Seramik Karolarla ilgili Avrupa ve Türk Standartları		
Seramik Duvar Karoları		
Ebat Toleransı	uzunluk	$\pm \% 0,5$
	ve	
	genişlik	
	kalınlık	$\pm \% 10$
Gönyeden Sapma		Max. $\pm \% 0,5$
Kenar Düzgünlüğü		Max. $\pm \% 0,3$
Düzlemden Sapma		+ $\% 0,5$ - $\% 0,3$
Yüzey Kalitesi		Max. $\% 5$
Su Emme		$\% 10$ - $\% 20$
Eğilme Dayanımı (N/mm ²)		Min. 15

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Çalışma Programı

Deneysel çalışmalarda Kütahya Seyitömer termik santrali atık uçucu külü ve atık pencere cam tozu karışımından üretilen seramiklerin özelliklerine ZnO ilavesinin (%0, %5, %10, %20) etkileri incelenmiştir. Ağırlıkça %50 atık uçucu kül ve %50 atık pencere camından meydana gelen ana karışıma ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 ZnO ilave edilerek 4 bileşim hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan presleme yöntemiyle silindirik numuneler hazırlanmış ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiştir. ZnO katkısının ve sinterleme sıcaklıklarının (900°C, 950°C, 1000°C, 1050°C) atıklardan üretilen seramik malzemelerin özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarla ilgili akım şeması Şekil 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmaların akım şeması.

5.2. Numunelerin Üretimi

5.2.1. Numune hazırlama

Deneyleerde kullanılan uçucu küller, Kütahya’da bulunan Seyitömer Termik Santrali ‘nden temin edilmiştir. Diğer atık malzeme olarak ise; pencere camları değerlendirilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan Seyitömer Termik Santrali uçucu küllerinin ve kullanılan atık pencere camlarının ağırlıkça (%) kimyasal bileşimleri Tablo 5.1.’de verilmiştir.

Tablo 5.1.Seyitömer uçucu külleri ve atık pencere camlarının ağırlıkça (%) kimyasal bileşimleri.

Kimyasal Bileşik	Uçucu kül	Atık cam
SiO ₂	56,90	72,00
Al ₂ O ₃	17,25	2,00
TiO ₂	0,70	-
Fe ₂ O ₃	10,63	-
CaO	4,32	12,00
MgO	5,14	-
Na ₂ O	0,31	14,00
K ₂ O	1,55	-
MnO	0,23	-
P ₂ O ₅	0,12	-
K .K .	2,85	-

Atık pencere camları için ilk önce bilyalı değirmende 250 devir/dk ile 2 saat süreyle öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından atık cam tozları ve uçucu küller elek setinden (75 µm) geçirilerek eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Atık cam tozları ve uçucu küllerden elde edilen ana bileşime ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 ZnO ilave edilerek 4 yeni karışım hazırlanmıştır. Homojen karışımların elde edilebilmesi

amacıyla 250 rpm’de 2 saat süreyle mikserde karıştırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan numunelerin kodları ve ağırlıkça (%) ZnO oranları Tablo 5.2.’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 5.3.’de 4 farklı bileşimde hazırlanan numuneler için hesaplanan kimyasal analizler gösterilmiştir.

Tablo 5.2.Deneyde kullanılan ZnO oranları ve numune kodları.

Numune kodu	ZnO katkısı ağırlıkça (%)
Zn00	-
Zn05	5
Zn10	10
Zn20	20

Tablo 5.3.Hazırlanan bileşimlerin ağırlıkça (%) hesaplanan kimyasal analizleri.

Bileşim ağırlıkça (%)	Numune Kodları			
	Zn00	Zn05	Zn10	Zn20
SiO ₂	64,45	61,23	58,01	51,56
Al ₂ O ₃	9,63	9,14	8,66	7,70
TiO ₂	0,35	0,33	0,32	0,28
Fe ₂ O ₃	5,31	5,05	4,78	4,25
CaO	8,16	7,75	7,34	6,53
MgO	2,57	2,44	2,31	2,06
Na ₂ O	7,16	6,80	6,44	5,72
K ₂ O	0,78	0,74	0,70	0,62
MnO	0,12	0,11	0,10	0,09
P ₂ O ₅	0,06	0,06	0,05	0,05
ZnO	-	5,00	10,00	20,00
K. K.	1,43	1,35	1,28	1,14

5.2.2. Harmanlama ve kalıplama

Karışımlara yaklaşık %5 oranında su eklenerek nemlendirilmiş ve daha sonra elekten geçirilerek granülüzasyon yapılmıştır. Granüle tozlar çelik kalıpta 30 MPa basınç altında preslenerek 15 mm çapında silindirik numuneler elde edilmiştir.

5.2.3. Kurutma ve sinterleme

Preslenerek hazırlanan numunelerin tamamı 100°C'de 24 saat süreyle kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler kurutulduktan sonra 900°C, 950°C, 1000°C ve 1050°C sıcaklıklarda 2 saat süreyle sinterlenmiş ve fırın içerisinde oda sıcaklığına soğutulmuştur.

5.3. Deney numunelerine uygulanan testler

Sinterlenmiş numunelerin pişme küçülmesi, bulk yoğunluğu, görünür gözenekliliği, su emme miktarları hesaplanmıştır. Ayrıca donma, pamuklaşma özellikleri ve basma mukavemeti belirlenmiştir. Daha sonra X-ışınları difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleriyle de sinterlenen numuneler karakterize edilmiştir.

5.3.1. Pişme küçülmesi

Sinterlenmiş silindirik numunelerin çap ölçülerine göre pişme küçülmeleri hesaplanmıştır.

h_k = numunenin kurutma sonrası çap uzunluğu.

h_p = numunenin pişme sonrası çap uzunluğu.

$$\% \text{Pişme Küçülmesi} = [(h_k - h_p) / h_k] \times 100 \quad (5.1)$$

5.3.2. Gözeneklilik ve yoğunluk ölçümü

Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk ölçümleri Archimedes metoduyla gerçekleştirilmiştir. 100°C’de kurutulan numuneler tartılırlar. Bu veriler W_a olarak kaydedilmiştir. Ardından numuneler temiz kap içerisine alınarak numunelerin yarı ölçüsü kadar su eklenerek 5 dk bekletilmiştir. Daha sonra kap bir ısıtıcının üzerine konulmuştur ve kap içerisindeki numuneler tamamen batacak şekilde su eklenerek 5 dk kaynatılıp oda sıcaklığına soğutulmuştur. Bu veri W_b olarak elde edilmiştir. Numuneler daha sonra sudan çıkarılarak yüzeyindeki ıslaklıkları gidermek amacıyla kâğıtla silinmiştir ve oda koşullarında tartılmıştır. Bu veriyse W_c olarak kaydedilmiştir. Elde edilen veriler aşağıda verilen denklemler kullanılarak bulk yoğunlukları ve gözenek miktarları hesaplanmıştır [53,54].

$$\% \text{ Gözenek Miktarı} = [(W_c - W_a) / (W_c - W_b)] \times 100 \quad (5.2)$$

$$\text{Bulk yoğunluk} = [W_a / (W_c - W_b)] \times d_s \quad (5.3)$$

d_s : Saf suyun yoğunluğu olup, 1 g/cm³ olarak alınmıştır.

5.3.3. Su emme

100°C’de kurutulan numuneler tartılmıştır. Ardından numuneler temiz bir kaba konularak tamamı su içerisinde kalacak biçimde 24 saat bekletilmiştir. Doymun haldeki numunelerin yüzeyleri kabaca silinerek tartılmıştır.

W_d = Numunenin 24 saat suda bekletilmesiyle elde edilen ağırlığı (gr)

W_k = Numunenin 100°C’de kurutulmasıyla elde edilen ağırlığı (gr)

$$\% \text{ Su Emme Miktarı} = [(W_d - W_k) / W_k] \times 100 \quad (5.4)$$

5.3.4. Donma testi

100°C’de kurutulan numuneler tartılmış ardından tamamı suyla doldurulmuş kaplarda -20°C’de 2 saat süreyle dondurulmuş takiben 1 saat süreyle oda sıcaklığında suda bekletilmiştir. Bu şekilde 10 çevrim yapılan numuneler 24 saat süreyle oda koşullarında kurutulmuş, tartım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Donma çevrimleri sonrasında numunelere ait ağırlık kayıpları aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

W_k = Numunenin başlangıçta oda sıcaklığında ağırlığı (gr)

W_d = Numunenin donma çevrimleri sonrasında oda sıcaklığında ağırlığı (gr)

$$\% \text{ Ağırlık kaybı} = [(W_k - W_d) / W_k] \times 100 \quad (5.5)$$

5.3.5. Pamuklaşma testi

Pamuklaşma suda eriyebilen tuzları barındıran seramik malzemelerde tuzların küçük kılcal gözenekler yardımıyla dışarı çıkmaları ve suyun buharlaşmasıyla da tuzların birikmesinden meydana gelmektedir. Klorürler, karbonatlar, sülfatlar ve nitratlar pamuklaşmaya neden olan tuzlardandır. Meydana gelen pamuklaşma dereceleri zayıf pamuklaşma, orta pamuklaşma, ağır pamuklaşma ve ciddi pamuklaşma olarak sınıflandırılmaktadır [33]. Bu sebeple ZnO içeren ve içermeyen deney numunelerinde pamuklaşma meydana gelip gelmediği ve eğer pamuklaşma olmuşsa, meydana gelen pamuklaşmaların seviyeleri tespit edilmiştir.

5.3.6. Basma testi

Farklı oranlarda ZnO içeren silindirik numunelerin basma mukavemetleri Instorn modeli çekme – basma cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. ZnO katkılı seramik esaslı silindirik numunelerin kırılmasına kadar artan yükler altında basma dayanımları belirlenmiştir. Basma mukavemetleri aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

F_b = Basma dayanımı (N/ mm²),

P_k = Kırılma anındaki yük (N),

A_0 = Yük etkisi altında kalan numunelerin yüzey alanı (mm²),

$$F_b = P_k / A_0 \quad (5.6)$$

5.3.7. X- ışını difraksiyon analizi (XRD)

Sinterlenen numunelerin yapısında yer alan kristal fazları belirlemek maksadıyla RIGAKU XRD D/MAX/2200/PC cihazda X-ışınları difraksiyon analizleri(XRD) yapılmıştır. X- ışınları analizleri esnasında dalga boyu $\lambda=1,54054$ olan $CuK\alpha$ ışın demetlerinden yararlanılmış ve tarama açıları (2θ) 0-90° arasında belirlenmiş, tarama hızı 2°/dk olarak ayarlanmıştır.

5.3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS Analizi

Sinterlenen silindirik numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Ayrıca SEM cihazına entegre EDS ünitesiyle mikroyapılar üzerinden elementel analizler de yapılmıştır. Bu analizlerde deney numunelerinin yüzeyleri çok ince bir altın tabakasıyla kaplanmıştır. Numunelerin görüntüleri 10 kV' da EDS (Enerji Dağılımlı X-Işınları Spektroskopisi) bağlantılı Jeol Markalı, JSM-5410 Model cihazı yardımıyla elde edilmiştir.

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

6.1. Pişme Küçülmeleri

Deney numunelerinin kuru ve pişme çapları Tablo 6.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1.Kurutma ve pişme işlemi sonrası ölçüm sonuçları.

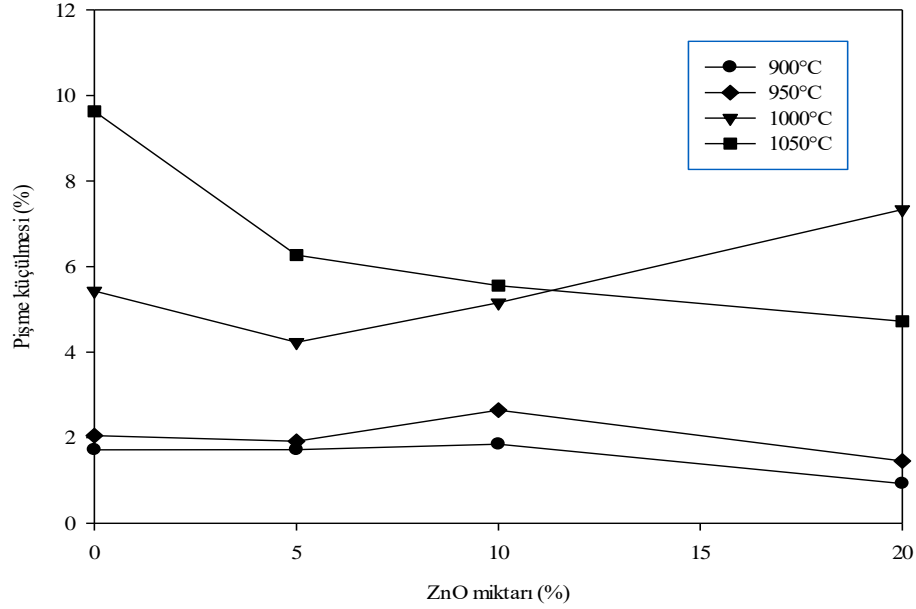
Bileşim No	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Kuru çap (mm)	Pişmiş çap (mm)
Zn00	900	15,16	14,90
	950	15,15	14,84
	1000	15,10	14,28
	1050	15,16	13,70
Zn05	900	15,12	14,86
	950	15,13	14,84
	1000	15,14	14,50
	1050	15,15	14,20
Zn10	900	15,15	14,87
	950	15,14	14,74
	1000	15,14	14,36
	1050	15,12	14,28
Zn20	900	15,12	14,98
	950	15,12	14,90
	1000	15,13	14,02
	1050	15,12	14,40

Seramik malzemelerin üretimlerinde pişme küçülmesi önemli parametrelerdendir. Çünkü pişme küçülmesi üretimin sonucu olarak elde edilecek mamullerin şekil ve boyutlarının belirlenmesini direkt olarak etkileyebilmektedir [5]. Numunelerin çaplarına göre denklem (5.1) ile hesaplanan % pişme küçülme oranları Tablo 6.2.'de gösterilmiştir.

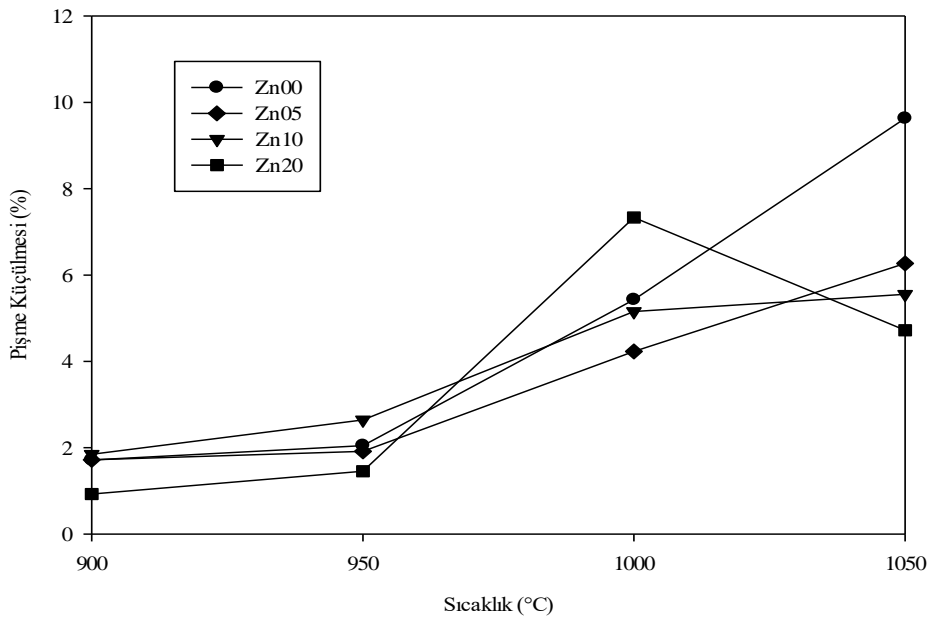
Tablo 6.2.Numunelerin % pişme küçülmeleri.

Bileşim No	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Pişme Küçülmesi (%)
Zn00	900	1,715
	950	2,046
	1000	5,430
	1050	9,630
Zn05	900	1,720
	950	1,916
	1000	4,227
Zn10	1050	6,270
	900	1,848
	950	2,642
Zn20	1000	5,152
	1050	5,555
	900	0,926
Zn20	950	1,455
	1000	7,336
	1050	4,720

Farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin ZnO miktarına ve sinterleme sıcaklığına göre % pişme küçülmesi değişimleri Şekil 6.1.ve 6.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1.Farklı sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunelerin ZnO miktarındaki artışına bağlı olarak pişme küçülmesindeki değişim.



Şekil 6.2.Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak pişme küçülmesindeki değişimi.

Sinterleme esnasında porların küçülmesiyle tanelerin birbirlerine yakınlaşmaları meydana gelmektedir [5]. Deney numuneleri arasında en küçük pişme küçülmesi değeri %0,92 ve en büyük pişme küçülmesi değeri %9,63 olarak ölçülmüştür. %0,92'lik en küçük pişme küçülmesi değeri ZnO %20 bileşiminde 900°C'de elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artması ile bileşimdeki alkalilerin ergimesi ve silika ile sıvı faz yapması sonucunda gözenekler azalmakta ve pişme küçülmeleri artmaktadır. ZnO katkısıyla da genel olarak pişme küçülmelerinde ciddi bir değişim gözlenmemekle birlikte yüksek ZnO'lu bileşimlerin sinterleme sıcaklığı artışıyla pişme küçülmeleri daha fazladır. Bu da muhtemelen ZnO'in sıvı faz sinterlemesine katkı yaparak poroziteyi azaltmasından kaynaklanmaktadır [55, 56, 57]. Zaten bu durum gözeneklilik ve su emme değerlerinde de gözlenmiştir.

6.2. Numunelerin Su Emme, Gözenek ve Bulk Yoğunluk Ölçümleri

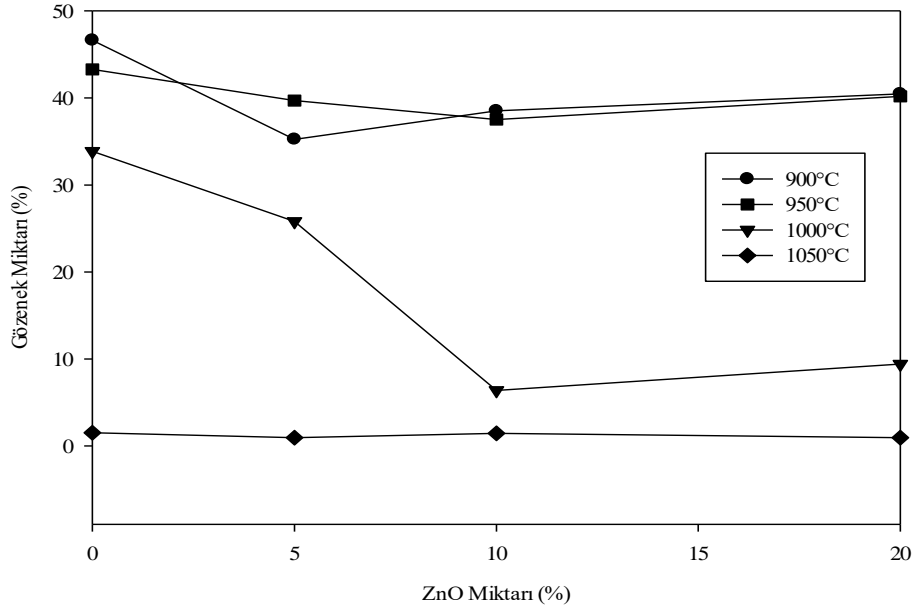
Numunelerin gözenek miktarları, su emme oranları ve bulk yoğunluk değerleri denklem (5.2), (5.3) ve (5.4) yardımıyla hesaplanmış ve Tablo 6.3.'de verilmiştir.

Tablo 6.3. Numunelerin gözenek miktarı, su emme ve bulk yoğunlukları.

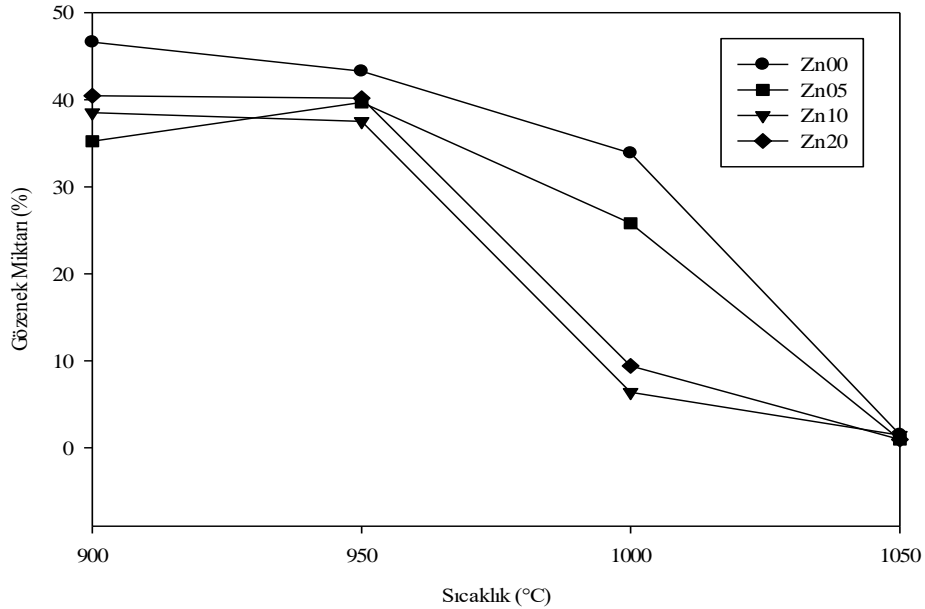
Bileşim No	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Gözenek Miktarı (%)	Bulk Yoğunluk (g/cm ³)	Su Emme Miktarı (%)
Zn00	900	46,63	1,245	29,57
	950	43,28	1,372	31,69
	1000	33,87	1,525	22,29
	1050	1,52	1,532	1,38
Zn05	900	35,24	1,378	25,94
	950	39,70	1,434	27,67
	1000	25,80	1,588	16,25
	1050	0,94	1,670	0,41
Zn10	900	38,52	1,465	26,20
	950	37,51	1,540	24,36
	1000	6,38	1,735	3,75
	1050	1,45	1,547	0,62
Zn20	900	40,46	1,502	26,85
	950	40,18	1,528	26,06
	1000	9,40	1,958	4,64
	1050	0,93	1,797	0,23

Aşağıda verilen Şekil 6.3. ve 6.4.'de sinterleme sıcaklığı ve ZnO miktarına bağlı olarak % gözenek miktarlarının değişimleri verilmiştir. En fazla gözenek 900°C'de

sinterlenen Zn00'da %46,63 olarak görülürken, en az gözenek miktarıysa 1050°C'de sinterlenen Zn20'de %0,93 olarak tespit edilmiştir. Diğer numunelerin gözenek miktarları % 0,93-46,63 aralığında yer almıştır.



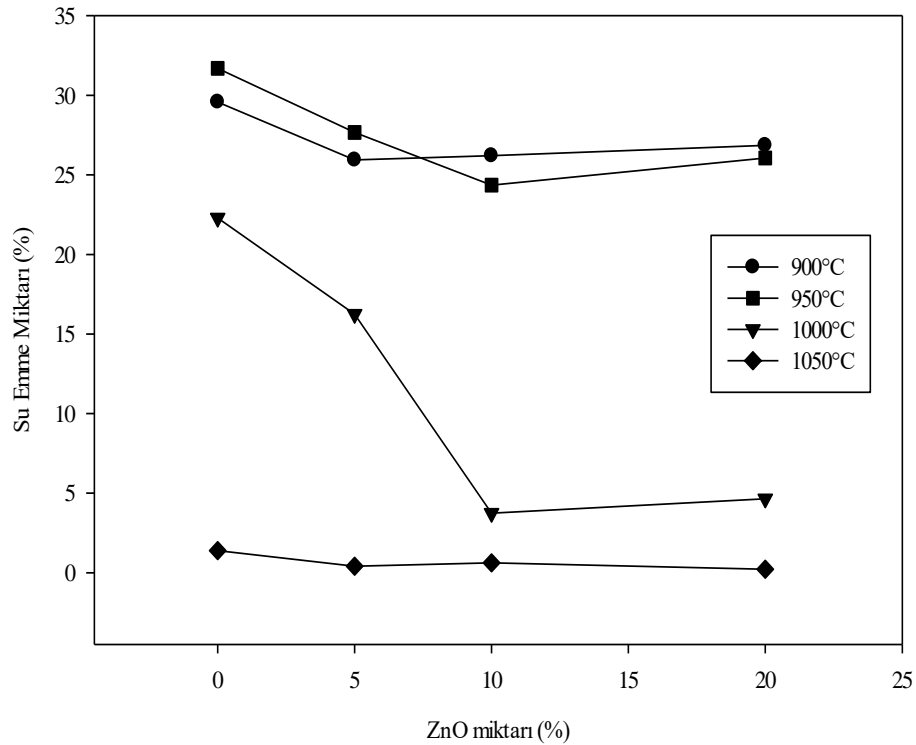
Şekil 6.3.Farklı sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunelerin ZnO miktarındaki artışına bağlı olarak gözenek miktarındaki değişim.



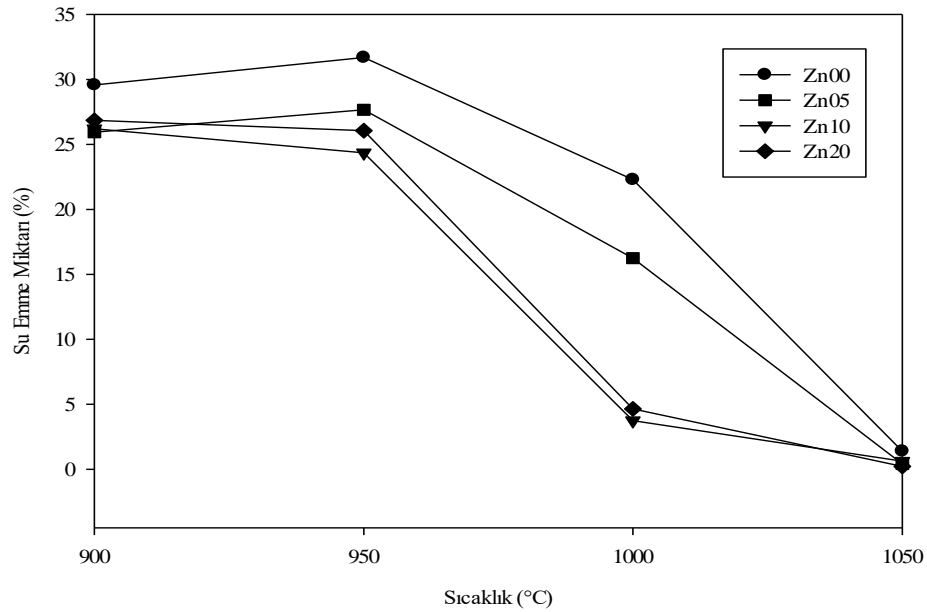
Şekil 6.4.Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak gözenek miktarındaki değişimi.

Şekil 6.3.'te görüldüğü gibi ZnO katkısının gözenek miktarına etkisi genel olarak azaltıcı yönde olmuştur. ZnO katkısı numunelerde meydana gelen sıvı fazı arttırdığından dolayı [5, 55, 56, 57] % gözenek miktarlarında genel olarak düşüşler meydana gelmiştir. Sıcaklık artışıyla birlikte gözenek miktarlarında önemli ölçüde azalmalar meydana gelmiştir (Şekil 6.4.). Sinterleme sıcaklığının artmasıyla daha iyi sinterlemenin olması, ZnO, alkaliler ve silikatların yaptığı camsı fazın artması [55, 56, 57] nedeniyle % gözenek miktarlarında azalma meydana gelmektedir.

Literatürde seramik duvar karolarının içerdikleri gözenek miktarlarının düşük seviyede olması istenmektedir [5,15]. ZnO katkısı ve yüksek sinterleme sıcaklıklarında gözenek miktarlarının az oluşu üretilen numunelerin seramik duvar karoları olarak kullanılabilmesine imkan vermektedir [5, 15].



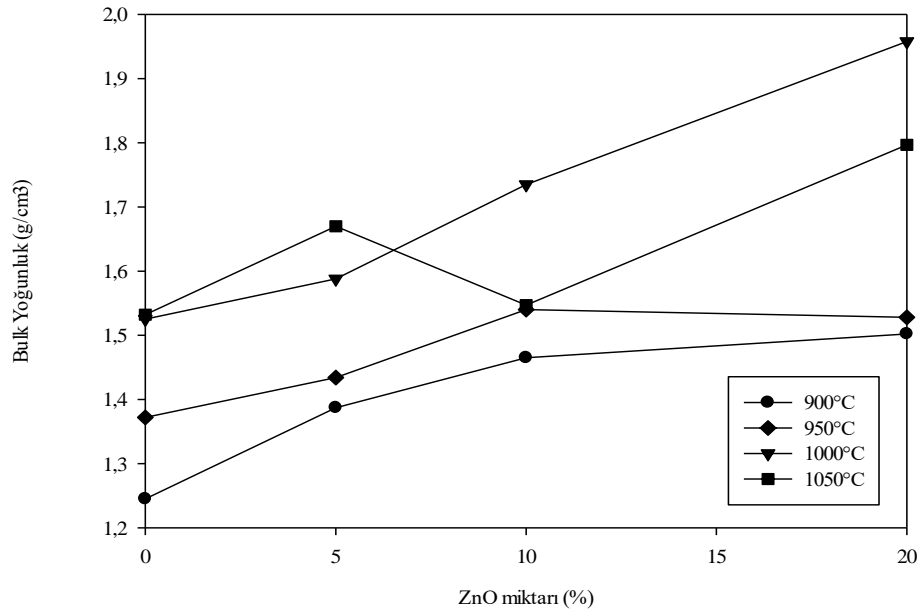
Şekil 6.5.Farklı sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunelerin ZnO miktarındaki artışına bağlı olarak su emme miktarındaki değişim.



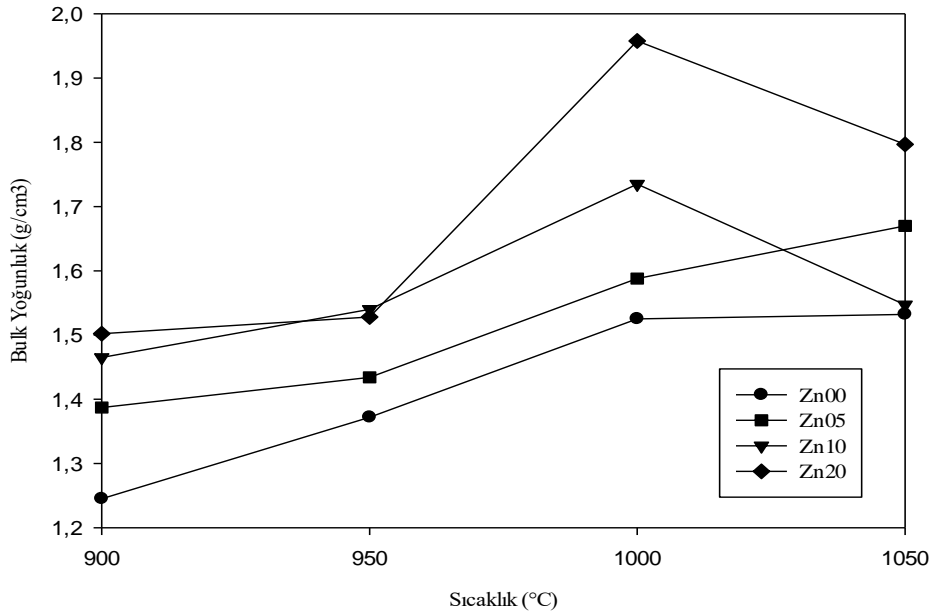
Şekil 6.6.Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak su emme miktarındaki değişimi.

Şekil 6.5. ve 6.6.'da sinterleme sıcaklığı ve ZnO miktarına bağlı olarak % su emme miktarlarının değişimleri verilmiştir. En yüksek su emme 950°C'de sinterlenen Zn00'da %31,69 olarak tespit edilmişken, en az su emme de 1050°C'de sinterlenen Zn20'de, % 0,23 olarak belirlenmiştir. Diğer numunelerin su emme miktarları %0,23-31,69 aralığındadır. Sinterleme sıcaklığı artışı ve ZnO katkısı ile artan sıvı fazın gözenekleri azaltmasından dolayı [55, 56, 57] % su emme değerleri azalmaktadır.

Literatürde seramik duvar karolarının su emme miktarları %10-20 arasında verilmektedir [5,15]. Literatürde verilen bu değerler [5,15] ile yapılan çalışmada 1000°C ve 1050°C' de sinterlenen deney numunelerinden elde edilen % su emme verileri önemli ölçüde uyum göstermektedir. Su emme miktarında meydana gelen azalmanın sisteme ilave edilen ZnO miktarıyla camsı fazda meydana gelen artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 6.7. ve 6.8'de ZnO miktarı ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak bulk yoğunluk değişimleri verilmiştir.



Şekil 6.7.Farklı sinterleme sıcaklıklarında ZnO miktarındaki artışa bağlı olarak bulk yoğunluk değişimi.



Şekil 6.8.Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak bulk yoğunluk değişimi.

En yüksek bulk yoğunluk değeri 1000°C'de sinterlenen Zn20 numaralı numunede 1,958g/cm³ olarak tespit edilmiştir. En düşük bulk yoğunluk değeri 900°C'de sinterlenen Zn00 numunesi için 1,245g/cm³ olarak ölçülmüştür. Diğer numunelerin

bulk yoğunlukları 1,245-1,958g/cm³ aralığında ölçülmüştür. ZnO ilavesi ve sinterleme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak artan sıvı fazın % gözenek miktarlarını azaltmasından dolayı bulk yoğunluk değerleri artmıştır [55, 56, 57].

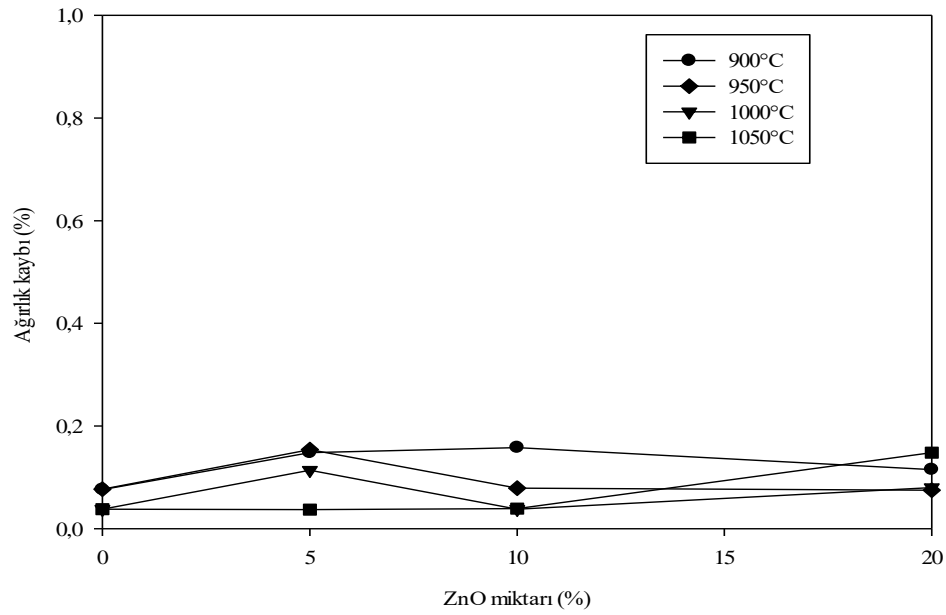
6.3. Numunelerin Donma Testi Sonuçları

10 donma-çözünme çevrimi sonucunda numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları denklem (5.5) yardımıyla hesaplanmış olup sonuçlar Tablo 6.4.'te verilmiştir. Ayrıca donma testinden elde edilen ağırlık kayıplarının sinterleme sıcaklığı ve ZnO katkısına bağlı olarak değişimleri grafiksel olarak Şekil 6.9. ve Şekil 6.10.'da gösterilmiştir.

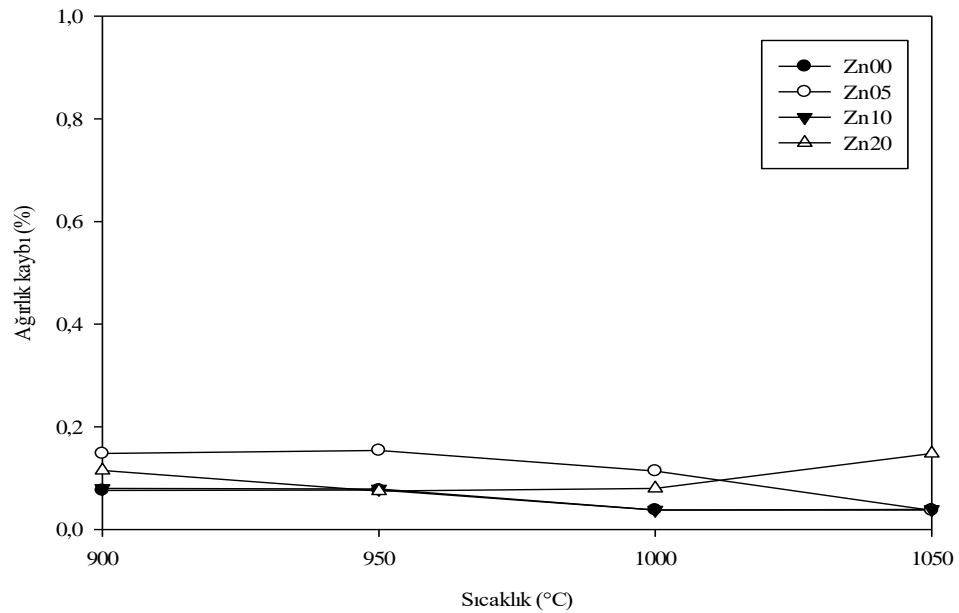
Tablo 6.4. Numunelerin donma testi öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri.

Bileşim No	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Başlangıç ağırlıkları (gr)	Donma testi sonrası ağırlıklar (gr)	Ağırlık Kaybı (%)
Zn00	900	2,607	2,605	0,076
	950	2,592	2,590	0,077
	1000	2,628	2,627	0,038
	1050	2,612	2,611	0,036
Zn05	900	2,680	2,676	0,148
	950	2,586	2,582	0,154
	1000	2,694	2,664	0,114
	1050	2,658	2,657	0,037
Zn10	900	2,538	2,534	0,158
	950	2,534	2,532	0,079
	1000	2,636	2,635	0,038
	1050	2,556	2,555	0,035
Zn20	900°C	2,617	2,614	0,115
	950°C	2,670	2,668	0,075
	1000°C	2,656	2,614	0,080
	1050°C	2,672	2,668	0,148

Yapılan 10 donma-çözünme çevrimi sonucunda en fazla ağırlık kaybı 900°C’de sinterlenmiş Zn10 kodlu numunede %0,15 olarak hesaplanmıştır. En az ağırlık kaybıysa 1050°C’de sinterlenen Zn10 kodlu numunede %0,03 olarak görülmektedir. Diğer numunelerin ağırlık kayıpları %0,03-0,15 aralığında yer almıştır.



Şekil 6.9.Farklı sinterleme sıcaklıklarında ZnO miktarındaki artışa bağlı olarak donma % ağırlık kaybı.



Şekil 6.10.Farklı kompozisyonlardaki numunelerin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak donma % ağırlık kaybı.

ZnO'lu numunelere yapılan 10 donma-çözünme çevrimi sonrasında numunelerde genel olarak çatlama, kopma, pullanma ya da dağılma gözlenmemiştir. ZnO barındıran numunelerin hesaplanan % ağırlık kayıplarının genel olarak birbirine yakın ve düşük seviyelerde olduğu ortaya çıkmıştır. Ağırlıkça (%0, %5, %10, %20) oranlarında ZnO içeren ve 900°C, 950°C, 1000°C, 1050°C'de sinterlenen deney numunelerinde ağırlık kayıpları genel olarak düşük seviyelerde gerçekleşmiş ve ZnO katkısının donma-çözünme özelliklerine etki etmediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, çok az da olsa yüksek ZnO katkılı ve yüksek sıcaklıklarda sinterlenen numunelerde donma-çözünmeye bağlı olarak daha az ağırlık kayıpları göze çarpmaktadır. Bu durum muhtemelen donma sonucunda daha az suyun gözenekleri doldurma etkisinden kaynaklanmaktadır.

6.4. Numunelerin Pamuklaşma Testi Sonuçları

Sinterlenmiş deney numuneleri 24 saat suda bekletildikten sonra oda sıcaklığında 24 saat süreyle kurumaya bırakılarak pamuklaşma özellikleri gözlemlenmiştir. Tablo 6.5.'te numunelerin ZnO oranları ve sinterleme sıcaklıklarına göre pamuklaşma dereceleri verilmiştir.



Şekil 6.11.Pamuklaşma testi sonrası zayıf pamuklaşmanın gerçekleştiği numunelerin görüntüsü.

Tablo 6.5. Numunelerin ZnO oranları ve sinterleme sıcaklıklarına göre pamuklaşma testi sonuçları.

Bileşim No	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Pamuklaşma Derecesi	Pamuklaşma Tipi
Zn00	900	Zayıf	Yüzeyde %10' u geçmeyen ince tuz tabakası
	950	Zayıf	Yüzeyde %10' u geçmeyen ince tuz tabakası
	1000	Zayıf	Yüzeyde %10' u geçmeyen ince tuz tabakası
	1050	Yok	Yok
Zn05	900	Yok	Yok
	950	Yok	Yok
	1000	Yok	Yok
	1050	Yok	Yok
Zn10	900	Yok	Yok
	950	Yok	Yok
	1000	Yok	Yok
	1050	Yok	Yok
Zn20	900	Yok	Yok
	950	Yok	Yok
	1000	Yok	Yok
	1050	Yok	Yok

ZnO içeren ve ZnO içermeyen deney numunelerinde genel olarak ciddi bir pamuklaşma gözlenmemiştir. 900°C, 950°C, 1000°C'de sinterlenen Zn00 kodlu

numunelerde zayıf seviyede pamuklaşma olduğu tespit edilmiştir. Zayıf pamuklaşmanın görüldüğü ZnO içermeyen deney numunelerinin pamuklaşma sonrası görüntüleri Şekil 6.11.'de verilmiştir. Ancak görüldüğü gibi pamuklaşma dereceleri oldukça düşük miktarlardadır ve ZnO katkısının pamuklaşmaya sebebiyet vermediği gözlemlenmiştir. ZnO katkısıyla artan sıvı faz etkisine bağlı olarak gözeneklerin ve kılcal çatlakların azalmasından dolayı muhtemelen ZnO içeren numunelerde pamuklaşma gözlenmemiştir.

6.5. Basma Testi

Deney numunelerinin ölçüleri ve denklem (5.6) yardımıyla hesaplanan basma mukavemetleri Tablo 6.6' da verilmiştir.

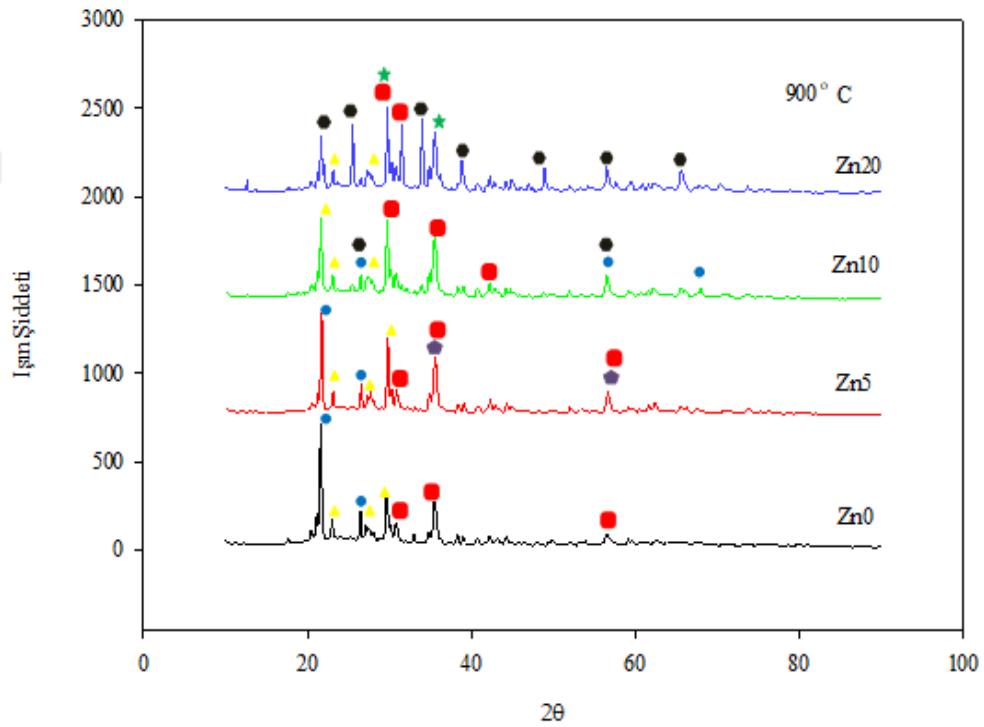
Tablo 6.6.Numunelerin ZnO oranları ve sinterleme sıcaklıklarına göre basma testi sonuçları.

Bileşim No	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Dış çap (mm)	Yükseklik (mm)	Basma Dayanımı (MPa)
Zn00	900	14,90	8,25	16,32
	950	14,80	10,73	29,61
	1000	14,44	10,92	29,77
	1050	13,62	9,80	103,61
Zn05	900	14,76	10,60	51,25
	950	14,76	10,74	32,42
	1000	14,38	10,62	75,37
	1050	14,32	10,40	88,33
Zn10	900	14,90	10,14	52,87
	950	14,72	10,40	56,21
	1000	14,08	10,10	62,85
Zn20	1050	14,64	10,75	69,36
	900	15,34	9,96	59,98
	950	14,90	9,46	56,09
	1000	14,12	8,75	60,11
	1050°C	14,48	9,42	42,70

Basma mukavemetleri en küçük 16,32 MPa ve en yüksek 103,61 MPa olarak tespit edilmiştir. Diğer ZnO'lu numunelerin basma dayanımı değerleri 16,32-103,61 MPa aralığında dağılım göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda sinterlenen numunelerde ZnO katkısının basma mukavemetine önemli oranda etkisinin olmadığı gözlenirken, 1050°C'de sinterlenen numunelerde ise ZnO katkısı ile artan camsı fazlara bağlı olarak basma mukavemetlerinin düştüğü tespit edilmiştir.

6.6. X - Işınları Difraksiyon Analizleri (XRD)

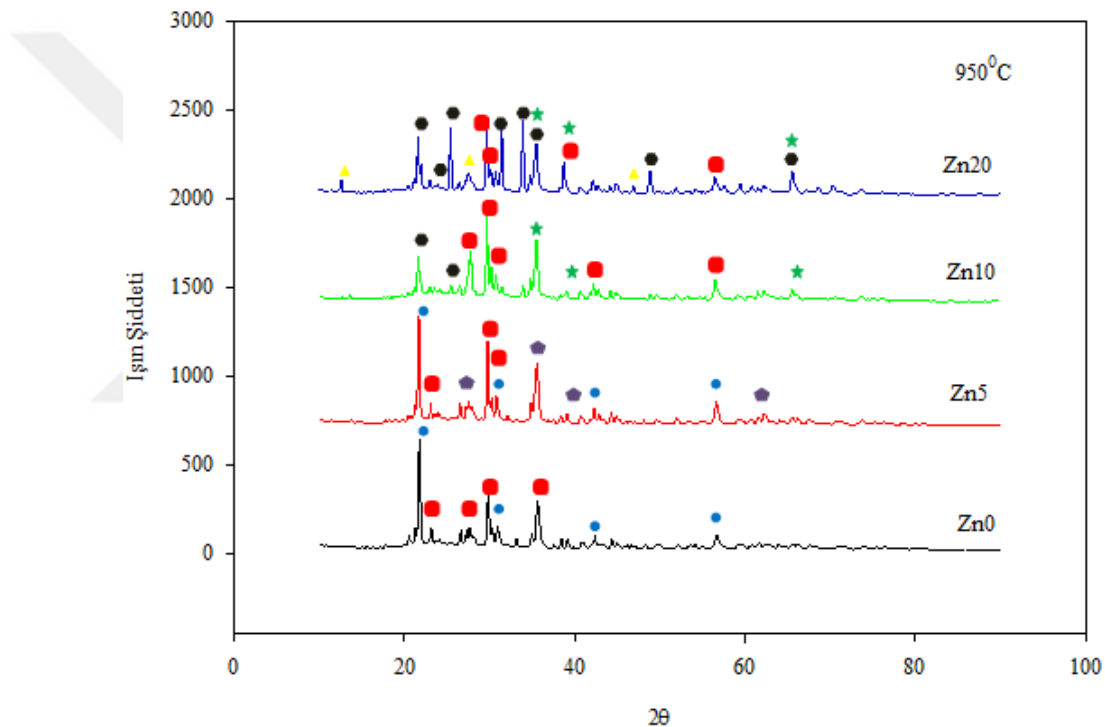
ZnO katkısı ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak oluşan kristal fazlar XRD analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 6.12.-6.15.'de 900°C, 950°C, 1000°C ve 1050°C'de sinterlenen numunelerin XRD grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 6.12.900°C'de sinterlenen dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO içeren numunelerin XRD grafiği.

[● Kuvars (SiO₂), ● Ojite (Ca(Fe,Mg)Si₂O₆), ▲ Nefelin (Na_{6.65}Al_{6.24}Si_{9.76}O₃₂), ◆ Kyanit (Al₂SiO₅), ● Diçinko silikat (Zn₂SiO₄), ★ Petedünit (CaZn(Si₂O₆)).]

900°C’de sinterlenen numunelerin XRD analizlerinin verildiği Şekil 6.12. incelendiğinde ZnO katkısıyla Zn içeren fazların oluştuğu görülmektedir. ZnO bileşiminde Kuvars (SiO_2), Ojit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$) ve Nefelin ($\text{Na}_{6.65}\text{Al}_{6.24}\text{Si}_{9.76}\text{O}_{32}$) fazları mevcutken Zn05 bileşiminde ise bu fazlardan başka Kyanit (Al_2SiO_5) fazı da oluşmuştur. Zn10 bileşiminde artan ZnO katkısıyla birlikte Diçinko silikat (Zn_2SiO_4) fazı oluşmaya başlarken Kyanit (Al_2SiO_5) fazı diğer fazlara dönüşmüştür. Yüksek ZnO’ lu bileşim olan Zn20’ de ise Diçinko silikat (Zn_2SiO_4) fazı ile birlikte Petedünit ($\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) fazı da tespit edilmiştir.

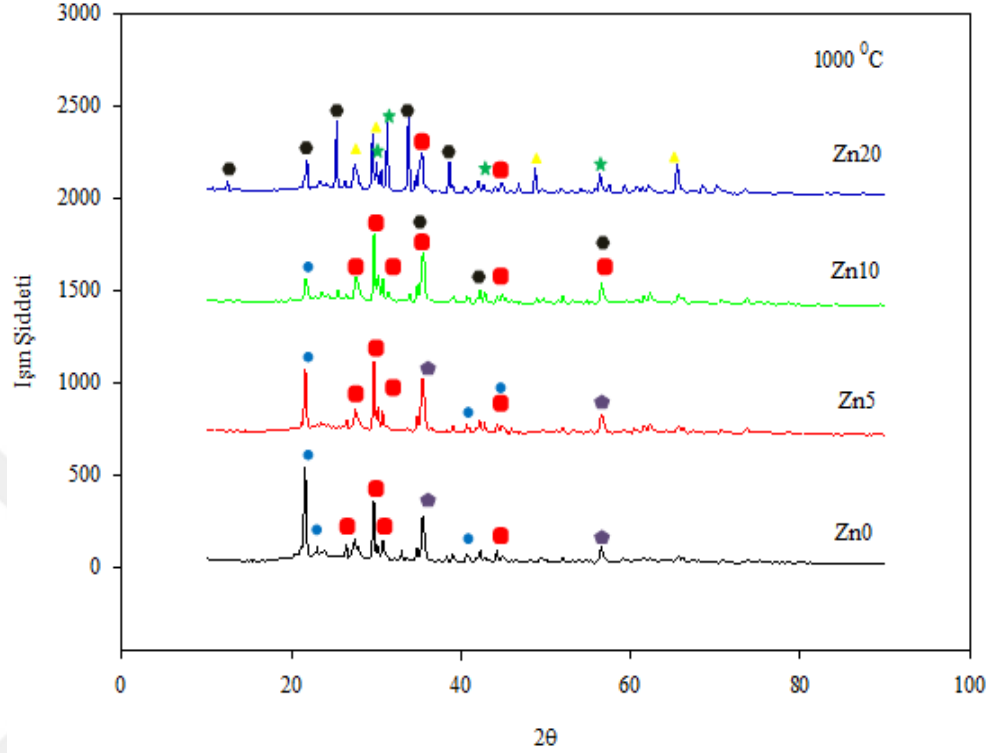


Şekil 6.13.. 950°C’ de sinterlenen dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO içeren numunelerin XRD grafiği.

[● Kuvars (SiO_2), ● Ojit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$), ▲ Nefelin ($\text{Na}_{6.65}\text{Al}_{6.24}\text{Si}_{9.76}\text{O}_{32}$), ◆ Kyanit (Al_2SiO_5), ● Diçinko silikat (Zn_2SiO_4), ★ Petedünit ($\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$).]

Şekil 6.13.’te 950°C’de sinterlenen numunelerin XRD analizleri verilmiştir. ZnO bileşiminde Kuvars (SiO_2) ve Ojit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$) fazları, Zn05 bileşiminde ise bu fazlardan başka Kyanit (Al_2SiO_5) fazı da oluşmuştur. Zn10 bileşiminde ise Diçinko silikat (Zn_2SiO_4) ve Petedünit ($\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) fazları tespit edilmiştir. Zn20’de ise Zn10 bileşiminde tespit edilen Diçinko silikat (Zn_2SiO_4) ve Petedünit

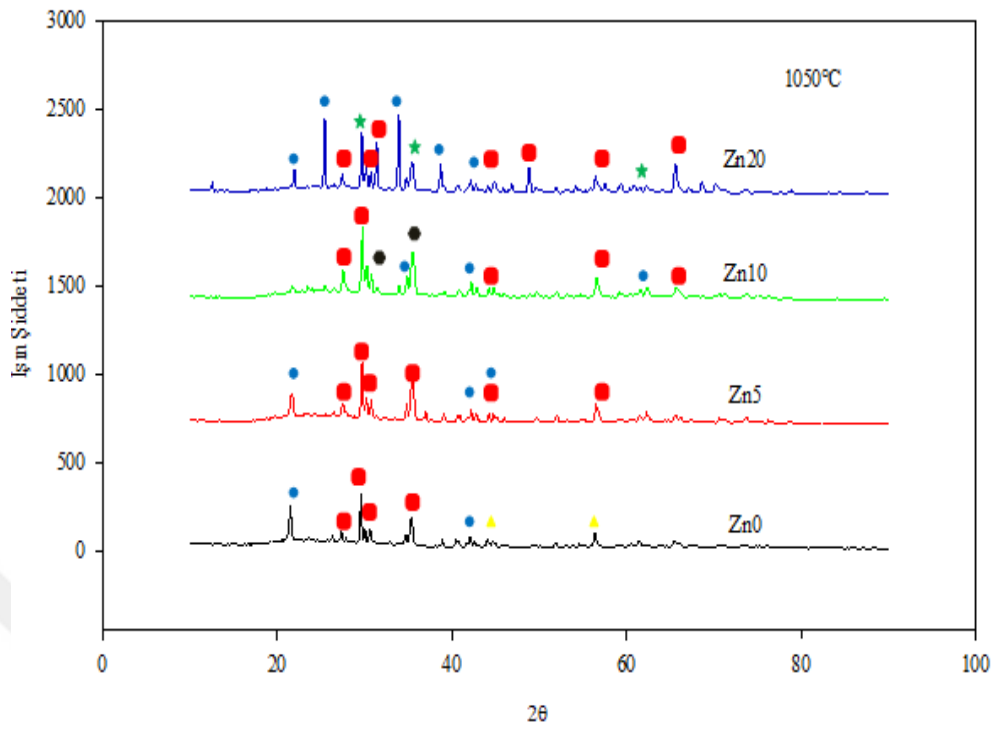
(CaZn(Si₂O₆)) fazları daha fazla belirlenmiştir. Ayrıca Nefelin (Na_{6.65}Al_{6.24}Si_{9.76}O₃₂) fazı da bu bileşimde tespit edilmiştir.



Şekil 6.14.1000°C' de sinterlenen dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO içeren numunelerin XRD grafiği.

[● Tridimit (SiO₂), ● Ojit (Ca(Fe,Mg)Si₂O₆), ▲ Nefelin (Na_{6.65}Al_{6.24}Si_{9.76}O₃₂), ◆ Kyanit (Al₂SiO₅), ● Diçinko silikat (Zn₂SiO₄), ★ Petedünit (CaZn(Si₂O₆)).]

1000°C'de sinterlenen numunelerin XRD analizleri Şekil 6.14. incelendiğinde ZnO ve Zn05 bileşimlerinde Tridimit (SiO₂), Ojit(Ca(Fe,Mg)Si₂O₆) ve Kyanit (Al₂SiO₅) fazlarının mevcut olduğu görülmektedir. Zn10 bileşiminde ise artan ZnO katkısının etkisiyle bu fazlardan başka Diçinko silikat (Zn₂SiO₄) fazı da oluşmuştur. Yüksek ZnO'lu bileşim olan Zn20'de ise Diçinko silikat (Zn₂SiO₄) fazı daha fazla oluşmuştur. Ayrıca bu bileşimde Petedünit (CaZn(Si₂O₆)) ve Nefelin (Na_{6.65}Al_{6.24}Si_{9.76}O₃₂) fazları da tespit edilmiştir.



Şekil 6.15.1050°C’ de sinterlenen dört farklı oranda (%0, %5, %10, %20) ZnO içeren numunelerin XRD grafiği.

[● Tridimit (SiO_2), ● Ojit ($\text{Ca(Fe,Mg)Si}_2\text{O}_6$), ▲ Nefelin ($\text{Na}_{6.65}\text{Al}_{6.24}\text{Si}_{9.76}\text{O}_{32}$), ◆ Kyanit (Al_2SiO_5), ● Diçinko silikat (Zn_2SiO_4), ★ Petedünit ($\text{CaZn(Si}_2\text{O}_6$)).]

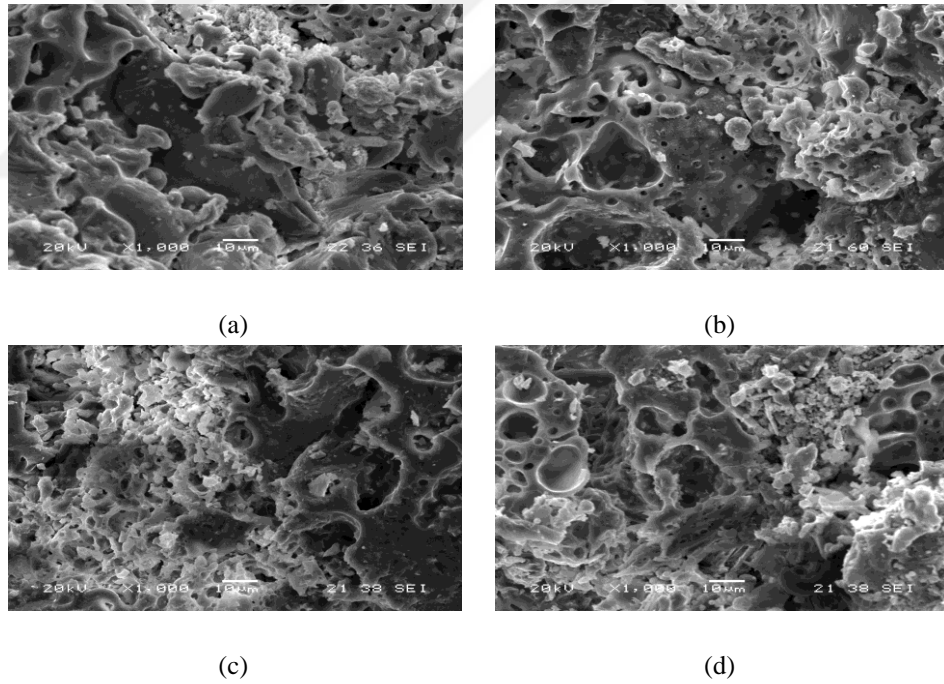
Şekil 6.15.’ te 1050°C’de sinterlenen numunelerin XRD analizi görülmektedir. ZnO bileşiminde Tridimit (SiO_2), Ojit ($\text{Ca(Fe,Mg)Si}_2\text{O}_6$) ve Nefelin ($\text{Na}_{6.65}\text{Al}_{6.24}\text{Si}_{9.76}\text{O}_{32}$) fazları tespit edilmiştir. Zn05 bileşiminde Nefelin ($\text{Na}_{6.65}\text{Al}_{6.24}\text{Si}_{9.76}\text{O}_{32}$) fazı diğer fazlara dönüşmüştür. Zn10 bileşiminde ise Diçinko silikat (Zn_2SiO_4) fazı tespit edilmiştir. Zn20’de ise Diçinko silikat (Zn_2SiO_4) fazı diğer fazlara dönüşmüştür ve ayrıca Petedünit ($\text{CaZn(Si}_2\text{O}_6$) fazı tespit edilmiştir.

Genel olarak ZnO içermeyen ve düşük oranda ZnO içeren bileşimlerde Kuvars (SiO_2), Ojit ($\text{Ca(Fe,Mg)Si}_2\text{O}_6$), Nefelin ($\text{Na}_{6.65}\text{Al}_{6.24}\text{Si}_{9.76}\text{O}_{32}$), Kyanit (Al_2SiO_5) fazları mevcutken yüksek ZnO içeren bileşimlerde Diçinko silikat (Zn_2SiO_4) ve Petedünit ($\text{CaZn(Si}_2\text{O}_6$) fazları tespit edilmiştir. Artan ZnO katkısıyla Zn içeren fazlardan Petedünit ($\text{CaZn(Si}_2\text{O}_6$) fazı daha fazla görülmektedir. ZnO ‘nun bir kısmı kristalin fazların oluşumunda yer alırken bir kısmında sıvı faz oluşturarak sinterlemeyi teşvik etmekte [55, 56, 57] ve daha önce bahsedildiği gibi porozitenin azalmasına

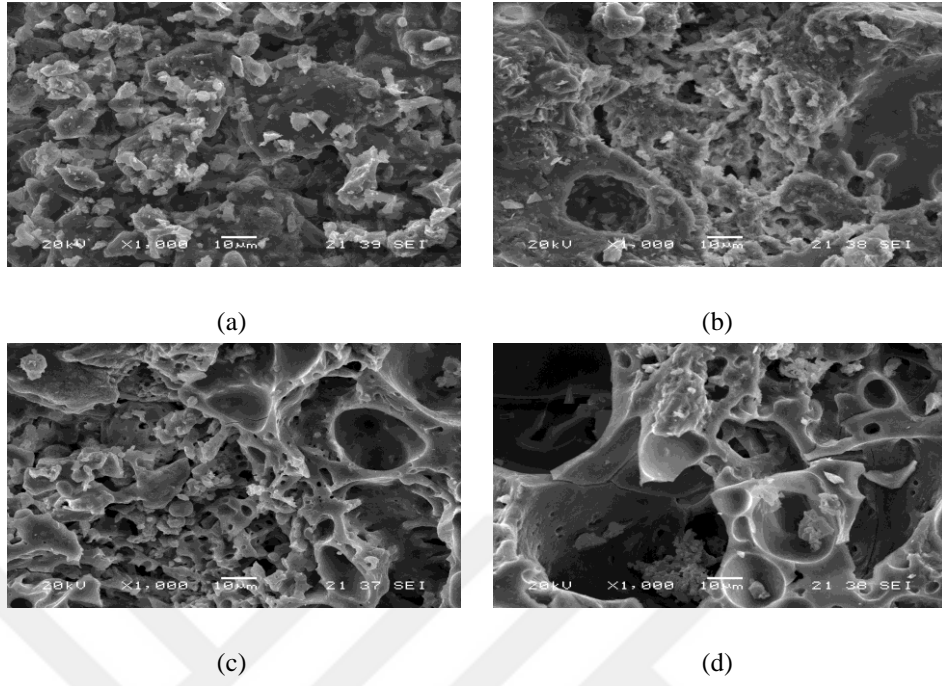
katkı sağlarken, yoğunluk artışı da teşvik etmektedir. Yüksek sinterleme sıcaklıklarında Kuvars'ın polimorfu olan Tridimit fazı meydana gelmiştir. Fe içeren doğal kayaç ve atıklarda Fe'in çekirdeklendirici etkisiyle Ojit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$) fazı meydana gelmekte olup [58] benzer etki ZnO içeren ve içermeyen sinterlenen numunelerde de tespit edilmiştir.

6.7. Numunelerin Mikroyapı Analizleri

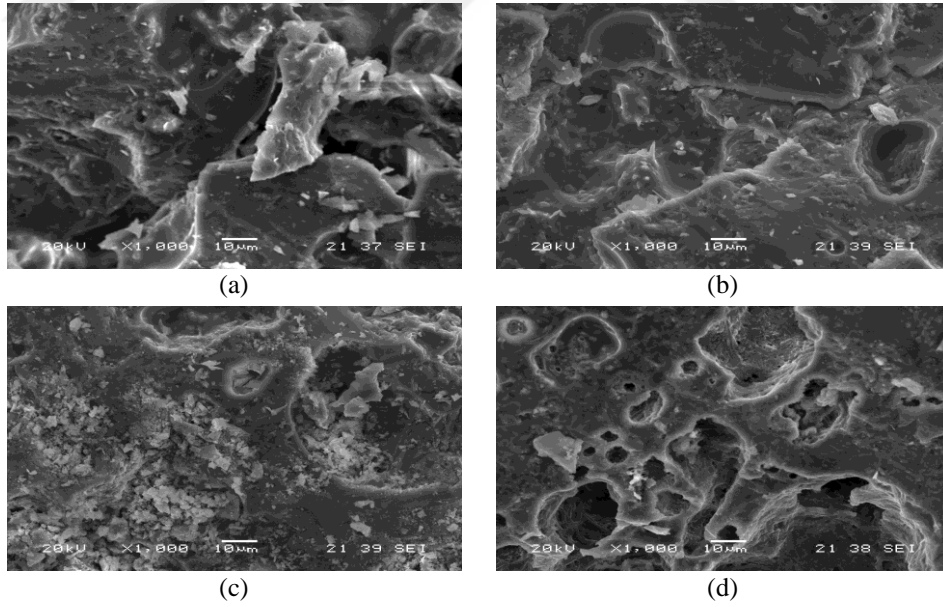
Dört farklı bileşimde hazırlanan ve dört farklı sıcaklıkta sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı incelemeleri Şekil 6.16–6.19'da gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi camsı matrikste XRD analizlerinde tespit edilen kristalin oluşumlar ve gözenekler mevcuttur. Artan sinterleme sıcaklığıyla daha iyi sinterlemenin olması ve gözeneklerin azalması mikroyapılarda da gözlenmektedir.



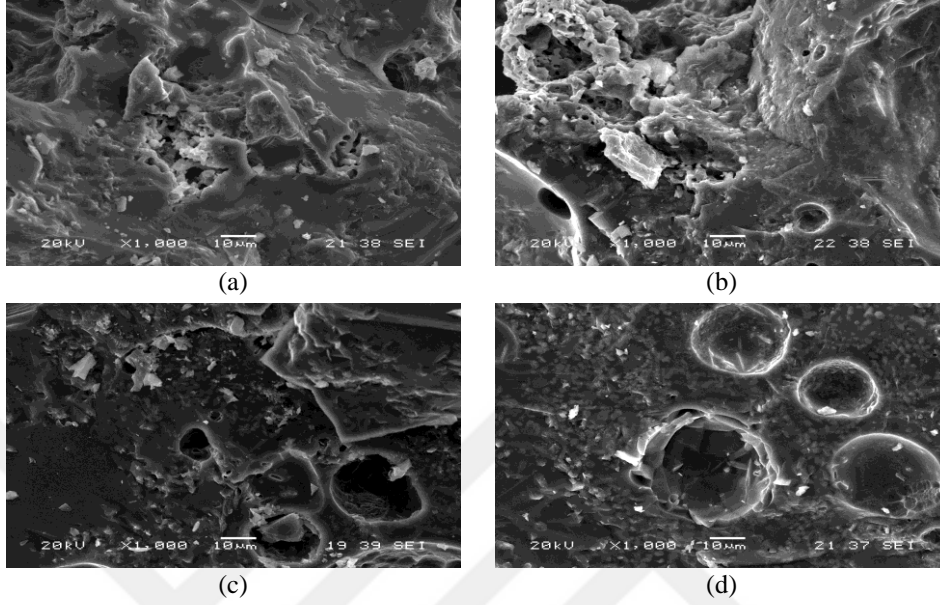
Şekil 6.16. 900°C'de sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri; (a) Zn00, (b) Zn05, (c) Zn10, (d) Zn20.



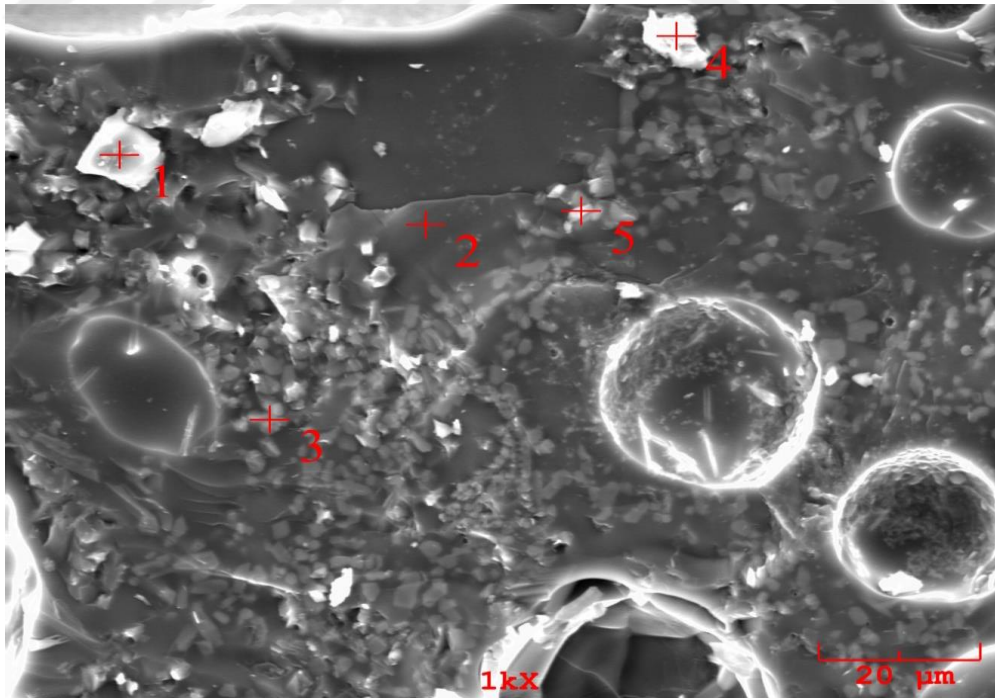
Şekil 6.17. 950°C'de sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri; (a) Zn00, (b) Zn05, (c) Zn10, (d) Zn20.



Şekil 6.18. 1000°C'de sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri; (a) Zn00, (b) Zn05, (c) Zn10, (d) Zn20.



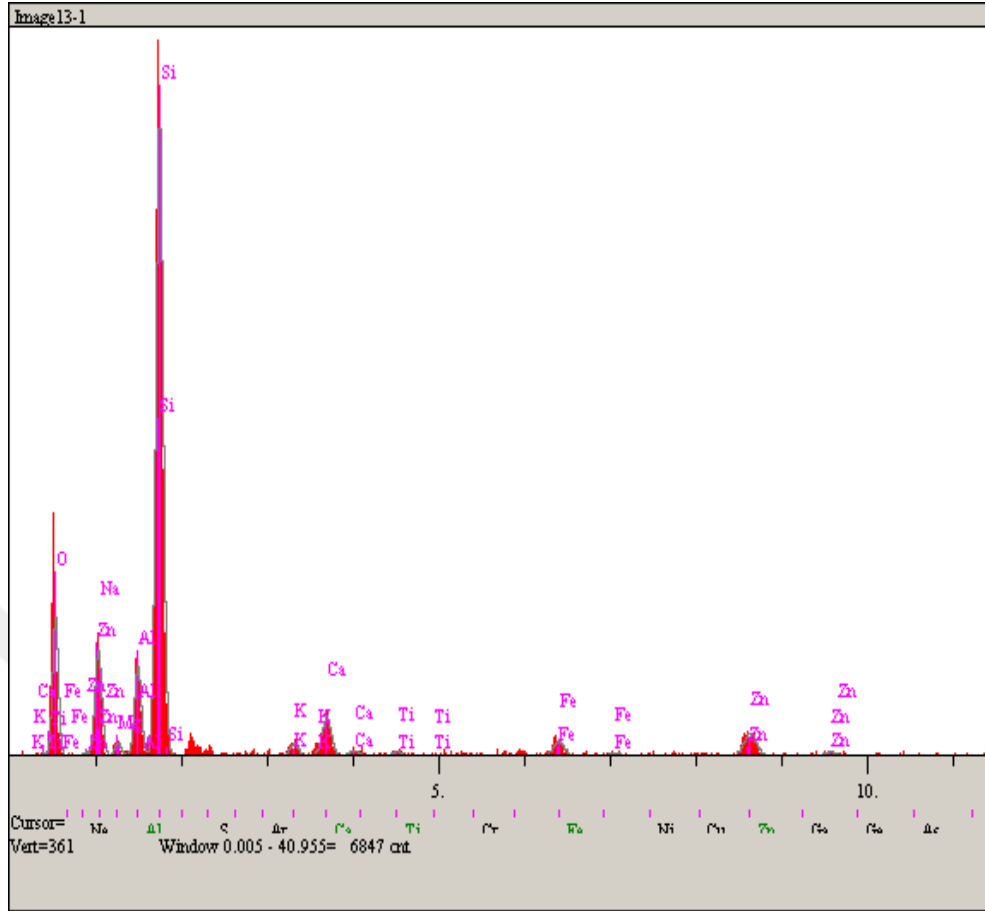
Şekil 6.19. 1050°C'de sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri; (a) Zn00, (b) Zn05, (c) Zn10, (d) Zn20.



Şekil 6.20. 1050°C'de sinterlenen Zn20 numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü.

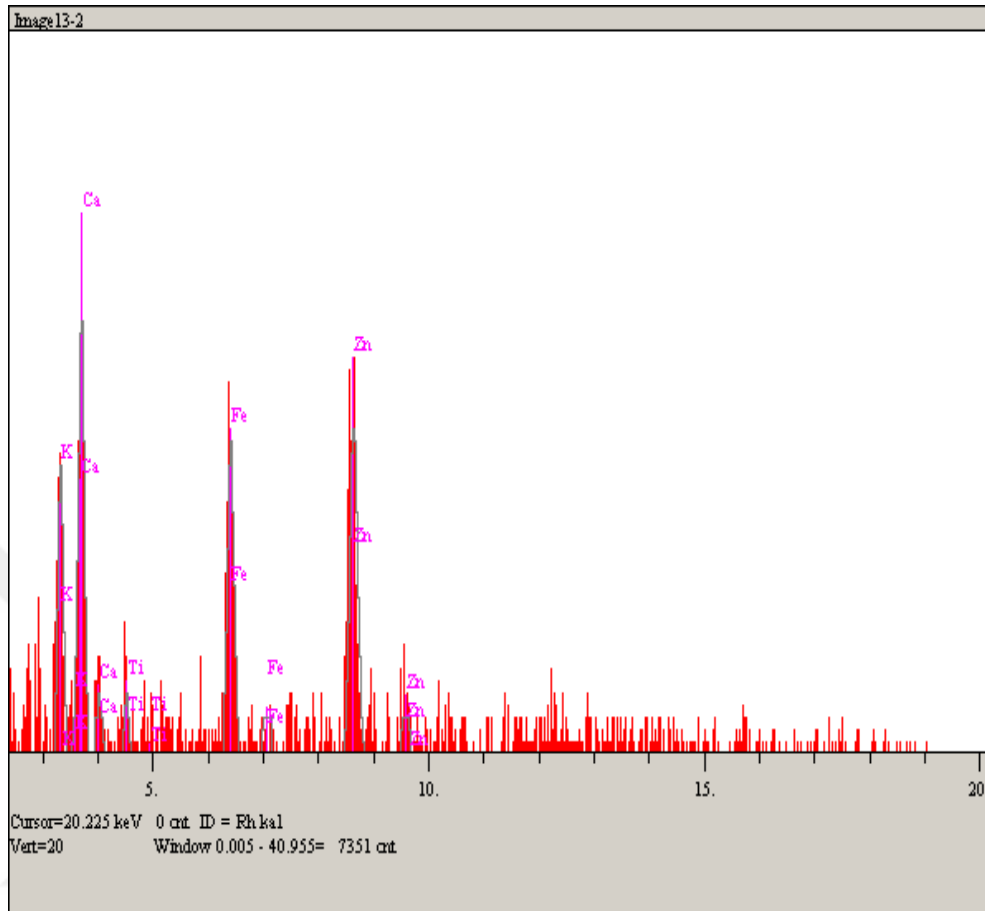
Şekil 6.20.'de 1050°C'de sinterlenen Zn20 numunesinin SEM mikroyapısı ve Şekil 6.21.–6.25.'de Zn20 numunesi üzerinden alınan EDS analizleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi 1 nolu bölgede Si pikleri çok şiddetli olup muhtemelen Tridimit (SiO_2) fazını işaret etmektedir. 2 nolu bölgede Ca, Fe ve Zn pikleri şiddetli olup muhtemelen Petedünit ($\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) ve Ojit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$) fazlarının yoğun olduğu bölgedir. 3 nolu bölgede Zn ve Si piklerinin yüksek oluşu Diçinkosilikat (Zn_2SiO_4) fazının olduğunu göstermektedir. 4 nolu bölge 1 nolu bölgeyle aynı olup Tridimit (SiO_2)' e aittir. 5 nolu bölgede ise Zn ve Si piklerinin yüksek oluşu Diçinkosilikat (Zn_2SiO_4) fazının mevcut olduğunu göstermektedir.





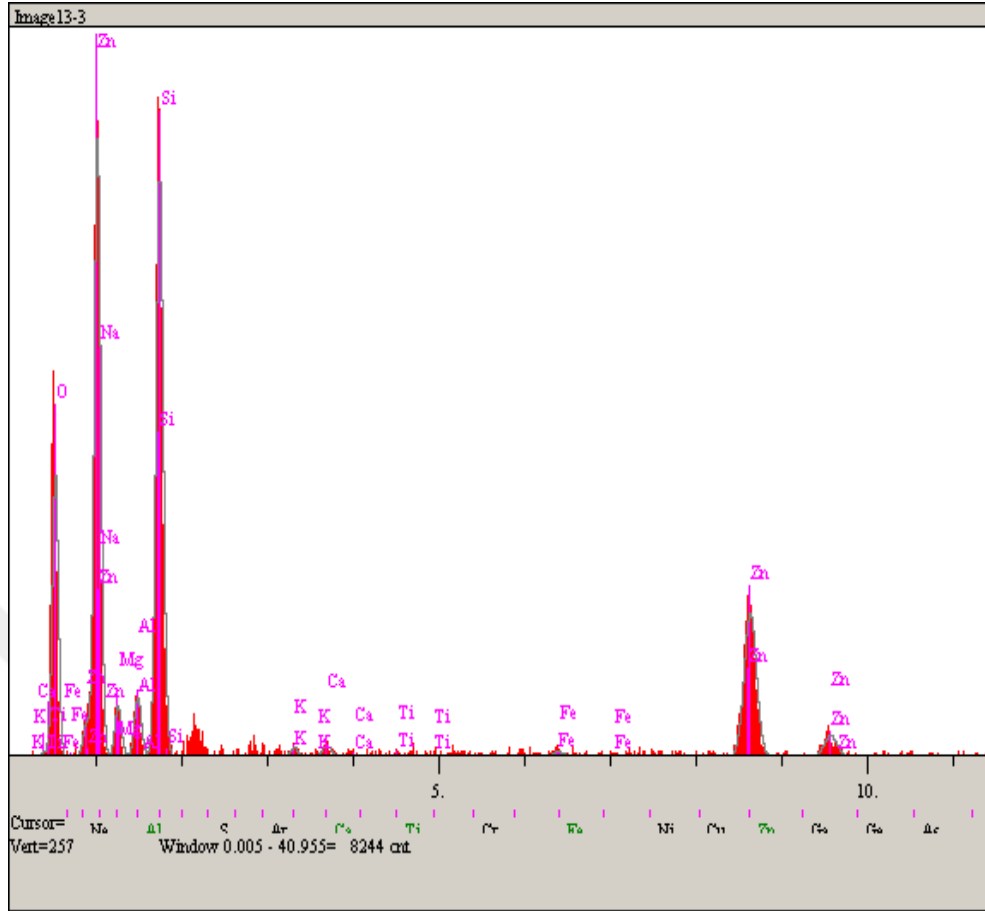
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	59.29	4.870	30.619	wt.%	
Na	Ka	19.16	2.769	3.865	wt.%	
Mg	Ka	5.87	1.532	0.927	wt.%	
Al	Ka	44.26	4.208	5.856	wt.%	
Si	Ka	330.19	11.492	41.333	wt.%	
K	Ka	7.56	1.739	1.031	wt.%	
Ca	Ka	25.20	3.175	3.439	wt.%	
Ti	Ka	2.46	0.991	0.403	wt.%	
Fe	Ka	11.12	2.109	2.657	wt.%	
Zn	Ka	19.83	2.816	9.869	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Şekil 6.21. 1050°C'de sinterlenen Zn₂₀ numunesinin Şekil 6.20'de verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 1 nolu bölgenin EDS analizi.



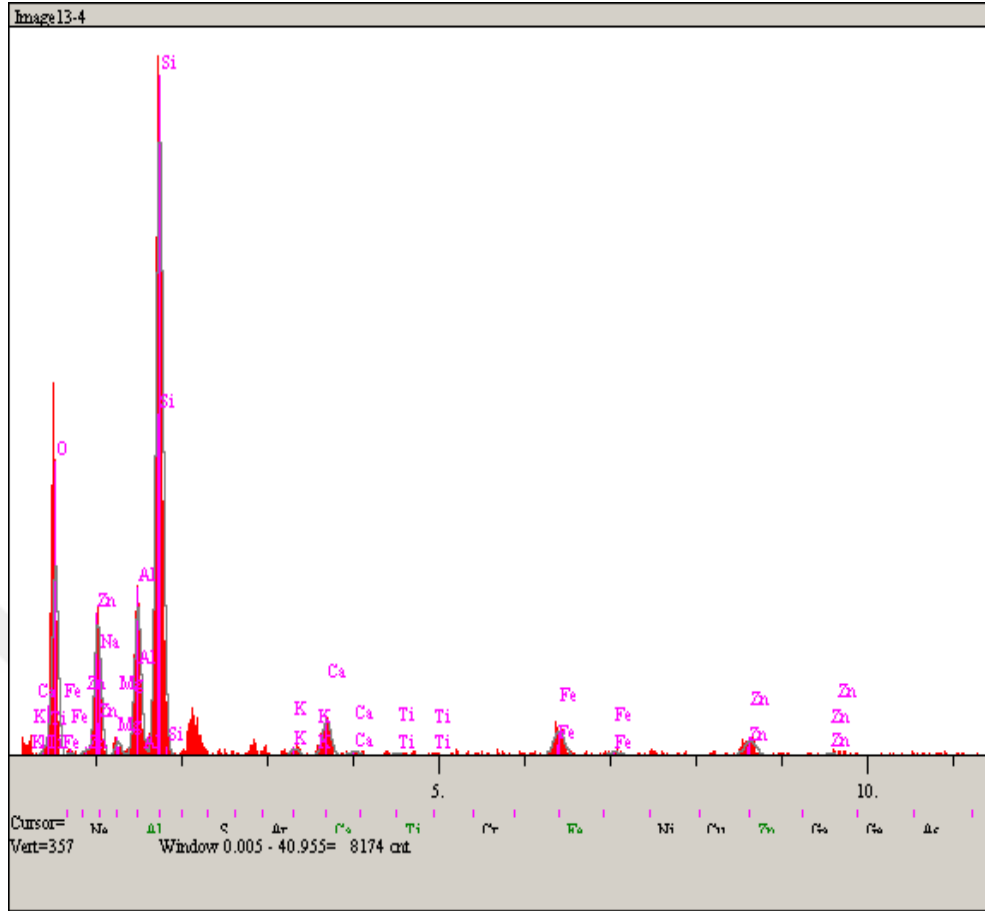
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	58.83	4.851	30.289	wt. %	
Na	Ka	12.55	2.241	2.482	wt. %	
Mg	Ka	4.71	1.372	0.711	wt. %	
Al	Ka	63.08	5.023	8.038	wt. %	
Si	Ka	343.60	11.723	43.120	wt. %	
K	Ka	10.05	2.005	1.392	wt. %	
Ca	Ka	16.08	2.536	2.225	wt. %	
Ti	Ka	2.06	0.907	0.340	wt. %	
Fe	Ka	13.06	2.285	3.160	wt. %	
Zn	Ka	16.41	2.562	8.243	wt. %	
				100.000	wt. %	Total

Şekil 6.22. 1050°C'de sinterlenen Zn₂₀ numunesinin Şekil 6.20'de verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 2 nolu bölgenin EDS analizi.



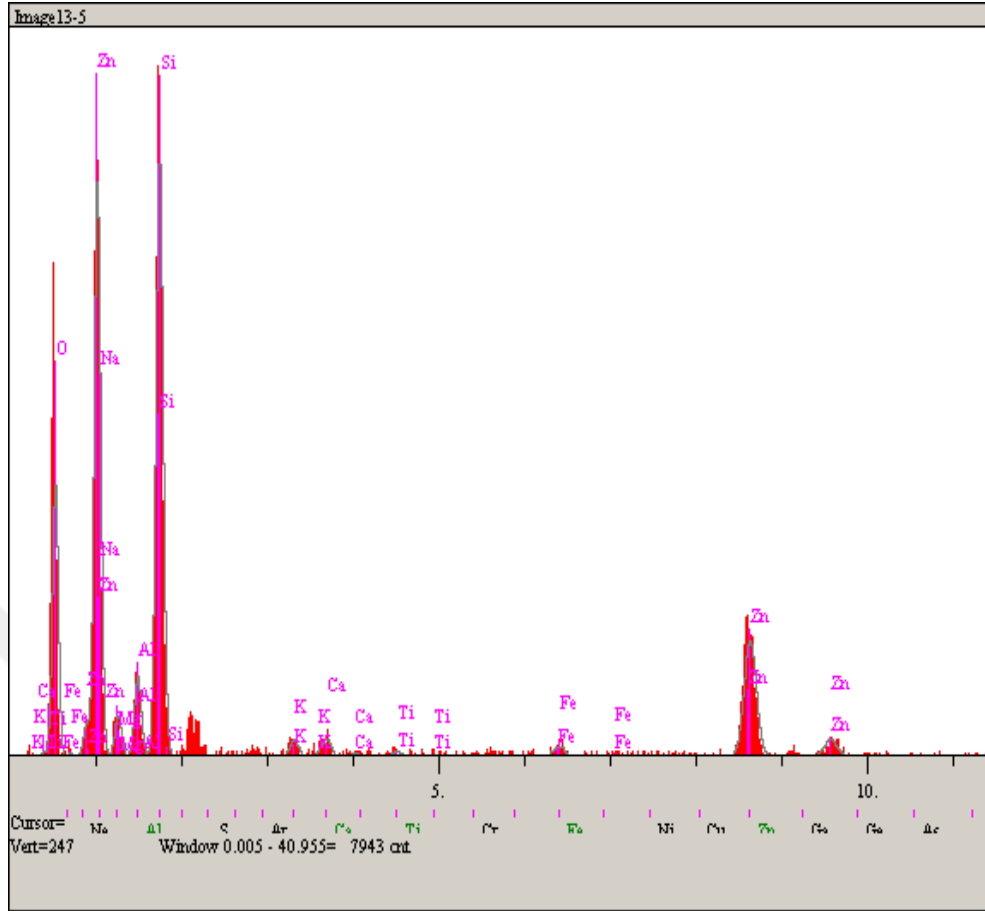
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	85.34	5.841	29.563	wt. %	
Na	Ka	0.00	0.000	0.000	wt. %	
Mg	Ka	17.01	2.608	3.083	wt. %	
Al	Ka	20.45	2.859	3.011	wt. %	
Si	Ka	215.30	9.277	27.173	wt. %	
K	Ka	3.18	1.127	0.352	wt. %	
Ca	Ka	4.72	1.373	0.517	wt. %	
Ti	Ka	0.91	0.604	0.118	wt. %	
Fe	Ka	2.66	1.031	0.461	wt. %	
Zn	Ka	89.77	5.990	35.722	wt. %	
				100.000	wt. %	Total

Şekil 6.23. 1050°C'de sinterlenen Zn20 numunesinin Şekil 6.20'de verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 3 nolu bölgenin EDS analizi.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	79.77	5.647	36.120	wt.%	
Na	Ka	8.67	1.862	1.676	wt.%	
Mg	Ka	6.80	1.649	0.968	wt.%	
Al	Ka	73.01	5.403	8.805	wt.%	
Si	Ka	319.41	11.300	38.075	wt.%	
K	Ka	4.32	1.314	0.554	wt.%	
Ca	Ka	22.61	3.006	2.903	wt.%	
Ti	Ka	1.64	0.810	0.254	wt.%	
Fe	Ka	19.70	2.806	4.510	wt.%	
Zn	Ka	12.94	2.275	6.136	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Şekil 6.24. 1050°C'de sinterlenen Zn₂₀ numunesinin Şekil 6.20'de verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 4 nolu bölgenin EDS analizi.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	79.17	5.626	31.027	wt.%	
Na	Ka	0.00	0.000	0.000	wt.%	
Mg	Ka	13.30	2.306	2.498	wt.%	
Al	Ka	26.84	3.276	4.111	wt.%	
Si	Ka	213.11	9.231	28.564	wt.%	
K	Ka	6.72	1.639	0.816	wt.%	
Ca	Ka	7.45	1.726	0.899	wt.%	
Ti	Ka	2.21	0.941	0.315	wt.%	
Fe	Ka	5.49	1.482	1.075	wt.%	
Zn	Ka	69.98	5.290	30.695	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Şekil 6.25. 1050°C'de sinterlenen Zn₂₀ numunesinin Şekil 6.20'de verilen SEM mikroyapı görüntüsünde 5 nolu bölgenin EDS analizi.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Atık pencere camı ve uçucu kül karışımına % 0-20 oranlarında ZnO katkısı ile hazırlanan silindirik numunelerin farklı sıcaklıklarda (900°C, 950°C, 1000°C, 1050°C) sinterlenmesi ile üretilen malzemelerin özelliklerine ZnO katkısının ve sinterleme sıcaklığının etkilerinin incelendiği çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

1. Genel olarak ZnO katkısı ile pişme küçülmelerinde büyük değişimler meydana gelmemiştir. Sinterleme sıcaklığının artması ve ZnO'in sıvı faz sinterlemesine katkı yapması sonucunda pişme küçülmeleri bir miktar artmaktadır.
2. ZnO katkısı ve sinterleme sıcaklığının artması ile numunelerin gözenek (%0,93-%46,63) ve su emme (%0,23-%31,69) miktarları azalmıştır. Bu durum sinterleme sıcaklığının etkisi ile birlikte ZnO katkısının sıvı faz sinterlemesini arttırması ve camsı fazlarda meydana gelen artışlardan kaynaklanmaktadır. Deney numunelerinin su emme değerleri literatürdeki seramik duvar karolarının su emme değerleriyle kıyaslandığında seramik duvar karoları olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir.
3. Artan sinterleme sıcaklığı ve ZnO katkısının etkisi ile gözenek miktarlarındaki azalma ve sıvı faz artışından kaynaklı deney numunelerinin bulk yoğunlukları (1,245-1,958g/cm³) artmıştır.

4. Genel olarak ZnO içeren ve içermeyen deney numunelerine yapılan donma-çözünme testleri sonucunda numunelerde çatlama, kopma, pullanma ya da dağılma olmamıştır.
5. Pamuklaşma testlerinde ZnO içermeyen ve düşük sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin yüzeylerinde ince %10'u geçmeyen ince tuz tabakası görülürken, ZnO katkısı yapılan numunelerde pamuklaşma gözlenmemiştir.
6. ZnO katkısının basma mukavemetine (16,32-103,61MPa) etkisi düşük sinterleme sıcaklıklarında oldukça az miktarda görülmüştür ve ZnO katkısı 1050°C' de sinterlenen deney numunelerinde ise camsı fazları arttırdığından dolayı basma mukavemetlerinin düştüğü tespit edilmiştir.
7. Dört farklı oranda ZnO katkısı içeren deney numunelerinin XRD ve EDS analizleri sonucunda düşük ZnO katkılı deney numunelerinin Kuvars (SiO_2), Ojit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$), Nefelin ($\text{Na}_{6,65}\text{Al}_{6,24}\text{Si}_{9,76}\text{O}_{32}$), Kyanit (Al_2SiO_5) fazlarından meydana geldiği tespit edilmiştir. Ojit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$) fazı ise Fe' in çekirdekendirici etkisiyle ortaya çıkmıştır. Artan ZnO katkısıyla birlikte deney numunelerinde çoğunlukla Zn içeren Diçinko silikat (Zn_2SiO_4) ve Petedünit ($\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) fazları tespit edilmiştir. ZnO katkısı kristalin fazların oluşumunda yer almakla birlikte sıvı fazı da oluşturmaktadır.
8. Dört farklı ZnO bileşiminde hazırlanan ve dört farklı sıcaklıkta sinterlenen numunelerin SEM mikroyapı incelemelerinde camsı matrikste kristalin oluşumlar ve gözenekler belirlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığıyla sinterlemenin daha iyi gerçekleşmesi ve gözeneklerin azalması mikroyapı görüntülerinde gözlenmiştir.

7.2. Öneriler

1. Deneysel numunelerinin ZnO miktarında değişiklikler yapılarak çalışmalar gerçekleştirilebilir.
2. ZnO yerine farklı katkıları ile çalışmalar yapılabilir.
3. Farklı atıklar ile benzer çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Rashidi S., Esfahani J. A., Karimi N., Porous materials in building energy technologies: A review of the applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 229-247, 2018.
- [2] Memon S., A., Phase change material sintegrated in building walls: A state of the art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 870-906, 2014.
- [3] Yılmaz Ş., Termik Santraller ve Çevresel Etkileri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu ve Enerji Çalışma Grubu, 2017.
- [4] Roh S., Tae S., Suk S., J., Ford G., Evaluating the embodied environmental impacts of major building tasks and materials of apartment buildings in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 135-144, 2017.
- [5] Özdemir, İ., Yüksek Fırın Curuflarından Yapı Malzemesi Üretim Koşullarının Araştırılması ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2003.
- [6] Yılmaz Ş., Özdemir İ., Processing of unglazed ceramic tiles from blast furnace slag, *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 13-17, 2007.
- [7] Çinçin Y., Linyit Yakan Termik Santral Uçucu Küllerinden Kireç Katkısı ile Hafif Tuğla Üretiminin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015.
- [8] Kaya M., Farklı Tür Uçucu Küller Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2016.
- [9] Bentli İ., Uyanık A., Demir U., Şahbaz O., Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, 2005.

- [10] Tolun R., İnce Seramik Hammaddeleri ve Porselen İmali, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 439-444, 1999.
- [11] Sümer G., Seramik Sanayisinde Üretim Teknolojisi, Yarımca Seramik Madencilik Dergisi, Cilt (Vol): 15 No:3, 37-43, 1980.
- [12] Uluçergüven E., Seramik Yer ve Duvar Kaplama Sektöründe Toz Maruziyetinin İş Hijyeni Açısından Değerlendirilmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2015.
- [13] Dehghanpour H., İleri Seramiklerin Özellikleri ve Kullanım Alanları, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Notları, 1-7, 2017.
- [14] Çevikel İ. Ü., Özel Betonarme Yüzme Havuzlarında Kaplama Malzemesi Olarak PVC, Cam Mozaik ve Seramik Karoların Uygulama Yönünden Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [15] <http://www.ankaseramik.com.tr/teknik-ozellikler>, Erişim Tarihi: 01.08.2018.
- [16] Önder S., Seramik Cam Birlikteliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü, İzmir, 2011.
- [17] Gürlelel C., Seramik Sektörü Makro Pazar Araştırması Ekonomi ve Strateji Raporu, İstanbul, 120-180, Kasım 2017.
- [18] T.C. İhracat Genel Müdürlüğü, Ticaret Bakanlığı İnşaat Malzemeleri Sektör Raporu, Maden, Metal ve Orman Ürünleri Daire Başkanlığı, 3-5, 2018.
- [19] <http://www.dunyainsaat.com.tr/haber/seramik-sektoru-2018-yilinda-cifthaneli-buyume-hedefliyor/24257>, Erişim Tarihi: 08.07.2018.
- [20] <https://www.egeseramik.com/dosya/6d3dc0e1c4pdf>, Erişim Tarihi: 11.08.2018.
- [21] Argun S., Car E., Refractory Selection for Aluminium Reverberatory Furnaces, Metkim and NRL Sirma Refractories, 1-3, 2010.
- [22] Birben Ö. K., Alümina Bazlı Nitrür Bağlı Dökülebilir Refrakterlerin Özelliklerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.

- [23] Çakı M., Karasu B., Karaveli K., Mühürücü E., The Properties of Artvin Borçka Region Red Clay and Its Uses in Ceramic Slip and Engobes, Seres 07 Çalışması, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ve Güzel Sanatlar Fakültesi, Eskişehir, 495-496, 2007.
- [24] Karaman S., Yapı Tuğlalarında Renk Oluşumu, KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt (Vol): 9 No:1 , 125-126, 2006.
- [25] Gökçe H., Doğal Hammaddelerden Kordiyerit Seramiklerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
- [26] Kayacı K., Karaköy (Bilecik) Yöresi Mikrogranitinin Jeolojisi ve Seramik Bünyelerde Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [27] Akçıl A., Tuncuk A., Kaolenin safsızlaştırılmasında kimyasal ve biyolojik yöntemlerin incelenmesi, Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi, Cilt (Vol): 2 No:1, 59-61, 2006.
- [28] Kılıç A., Doğal Seramik Hammaddelerden Porselen Diş Yapımı ve Metal-Seramik Arayüzey Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [29] Bayraktar I., Ersayın S., Gülsoy Ö. Y., Ekmekçi Z., Can M., Temel Seramik ve Cam Hammaddelerimizdeki (Feldispat, Kuvars ve Kaolin) Kalite Sorunları ve Çözüm Önerileri, Seramik Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 22-30, İzmir, 1999.
- [30] Deveci H., Akçıl A., Tuncuk A., An Overview of Chemical Methods Used in the Purification of Quartz, Vol.46, No.4, pp 3-10, December 2007.
- [31] Özdemir A., Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Teorik Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2006.
- [32] Boyraz T., Farklı Yöntemlerle Şekillendirilmiş Cao/Mgo Katkılı Stabilize Edilmiş ZrO₂ Esaslı Seramiklerin Fiziksel ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.

- [33] Yılmaz Ş., Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1992.
- [34] Jambhulkar H.P., Montaha S.S., Kumar M.S., Indian scenari: A review Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture, Journal of Chemosphere, No: 213, 334-336, 2018.
- [35] Mo K.H., Ling T. C., Alengaram U.J., Yap S.P., Yuen C.W., Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete, Journal of Elsevier, No: 139, 408-410, 2017.
- [36] Blissett R.S., Rowson N.A., A review of the multi-component utilisation of coal fly ash, Journal of Elsevier, No: 97, 2-5, 2012.
- [37] Hemalatha T., Ramaswamy A., A review on fly ash characteristics e Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete, Journal of Elsevier, No: 147, 548-552, 2017.
- [38] Saygılı Ö.E., Kömür Uçucu Küllerinden Zeolit Sentezi Olanaklarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2012.
- [39] Şengül Ü., Uçucu Kül ve Çevresel Etkileri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt (Vol): 7 No:1, 89-95, 2007.
- [40] Kahraman E., Başpınar M. S., Görhan G., Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt (Vol): 2 No:1, 85-94, 2008.
- [41] Canbaz M., Topçu İ.B., Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri, Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi, Cilt (Vol): 14 No:2, 12-15, 2001.
- [42] Anuk O., CEM I 42.5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda F Tipi Uçucu Külün Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.

- [43] Karaveli K., Karasu B., Önal H.Ş., Production of Zircon-Free Opaque Frit And Frit-Based Single Fast Firing Wall Tile Glaze And Characterization, Seres 07 Çalışması, Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Eskişehir, 808-809, 2007.
- [44] Tarhan M., Perlit Kullanımının Seramik Duvar Karosu Teknik Özelliklerine Etkisi, International Journal of Engineering Research and Development, Cilt (Vol): 10 No:1, 95-96, 2018.
- [45] Arıtan A. E., Söğüt Seramik Sanayi A.Ş.'ye Hammadde Sağlayan Ocaklarda Üretilen Ürünlerin İncelenmesi, Türkiye J9. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, 396-397, 2005.
- [46] Demirel H., Karapınar N., Akça K., Bentonit ve Diğer Killerin Absorbant Olarak Kullanımı, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, 21-23, 1995.
- [47] Özkan Ş.G., Kurşun İ., İpekoğlu B., Trakya Bölgesi Kuvars Kumlarından Feldspat Uzaklaştırılması için Yeni Bir Flotasyon Yaklaşımı, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 278-279, 2001.
- [48] Kayacı K., Kaşıkçı H., Çifçi M., Aylakçı B., Türkiye Söğüt (Bilecik) Civarındaki Alkalili Hammaddelerin Yer-Duvar Karosu Masse Hammaddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 37-38, 2004.
- [49] Taşlıgil N., Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Türkiye Doğal Taşlarının İktisadi Coğrafya Odağında Analizi, Marmara Coğrafya Dergisi Sayı: 33, 607-640, 2016.
- [50] Çetin T., Türkiye Mermer Potansiyeli, üretimi ve ihracatı, Ankara Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, Cilt (Vol): 23 No:3, 243-256, 2003.
- [51] [https://docplayer.biz.tr/8588263 - Fayans-mamullerin-yapisal-ozellikleri-uzeri-ne-inceleme-tulin-ayta.html](https://docplayer.biz.tr/8588263-Fayans-mamullerin-yapisal-ozellikleri-uzeri-ne-inceleme-tulin-ayta.html), Erişim Tarihi: 12.09.2018.
- [52] <http://www.istanbulyapi.com.tr/anasayfa>, Erişim Tarihi: 15.09.2018.
- [53] Erdem A., Sözer Z., Seramik Testleri ve Hesaplamaları, Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Uyg. Güz. San. Yüksekokulu, Eskişehir, 1990.

- [54] Özkan O. T., Kınıkoğlu S., Taşar., M.S., Seramik Hammaddelerine Uygulanan Kimyasal Analiz ve Test Metotları, TÜBİTAK Marmara Bil. ve End. Arş. Un. Proje No: 03-1601-7801, 1979.
- [55] Lu Z., Li X., Lu J., Shao G., Effect of MgO addition on sinterability, crystallization kinetics, and flexural strength of glass-ceramics from waste materials, Journal of Elsevier, No: 42, 3452-3459, 2016.
- [56] Margionte M.A.L., Simoes A.Z., Riccardi C.S., Filho F.M., Ries A., Perazolli L., Varela J.A., WO₃ and ZnO-doped SnO₂ ceramics as insulating material, Journal of Elsevier, No: 32, 713-718, 2006.
- [57] Xie W., Jiang Q., Cao Q., Xu X., Zhou H., Effect of ZnO/WO₃ additives on sintering behavior and microwave dielectric properties of (Sr, Ca) TiO₃-(Sm, Nd) AlO₃ ceramics, Journal of Materials Science, Volume 29, Issue 12, pp 9745-9750, 2018.
- [58] Yılmaz Ş., Volkanik Bazalt Kayaçlarından Cam-Seramik Malzeme Üretim Koşullarının Araştırılması ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ÇETİN, 16.09.1992'de Hatay'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Hatay'da tamamladı. 2010 yılında İskenderun Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında bitirdi. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nde yüksek lisans eğitimine başladı.