



**KAOLİN VE SODYUM SİLİKAT ESASLI  
İNORGANİK BAĞLAYICININ BASMA  
DAYANIMINA KİMYASAL KOMPOZİSYONUN  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2020  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Selin DEMİR**

**KAOLİN VE SODYUM SİLİKAT ESASLI İNORGANİK BAĞLAYICININ  
BASMA DAYANIMINA KİMYASAL KOMPOZİSYONUN ETKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Selin DEMİR**

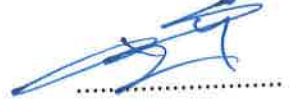
**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2020**

Selin DEMİR tarafından hazırlanan “KAOLİN VE SODYUM SİLİKAT ESASLI İNORGANİK BAĞLAYICININ BASMA DAYANIMINA KİMYASAL KOMPOZİSYONUN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman YAŞIN

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/01/2020

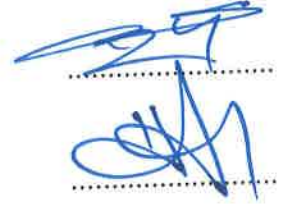
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr.Hayrettin AHLATCI (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Süleyman YAŞIN (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yüksel AKINAY (YYÜ)

İmzası  

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Selin DEMİR

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **KAOLİN VE SODYUM SİLİKAT ESASLI İNORGANİK BAĞLAYICININ BASMA DAYANIMINA KİMYASAL KOMPOZİSYONUN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Selin DEMİR**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Dr. Öğr. Üyesi Süleyman YAŞIN**

**Ocak 2020, 80 sayfa**

Bu çalışmada, sodyum silikat ve kaolin esaslı inorganik bağlayıcı ile dolgu olarak silis kumu bağlanmış ve ısıtma işlemiyle nihai katı numuneler elde edilmiştir. Kaolin ve sodyum silikat esaslı inorganik bağlayıcının kimyasal bileşiminin, 200-320 °C sıcaklık aralığında üretim sıcaklığının, %40 oranına kadar bağlayıcı katkı oranının ve iki farklı kum tane boyut dağılımının son ürün özelliklerine olan etkisi sistematik olarak incelenmiştir.

Çalışma neticesinde  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar oranının 5,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar oranının 1 ve  $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar oranının 30 olduğunda en yüksek basma dayanımının elde edildiği bulunmuştur. Tepkimelerin gerçekleşebilmesi için 240 °C sıcaklığın eşik bir değer olduğu görülmüş ancak en yüksek dayanım değerleri 300 °C sıcaklıkta kür edilen

numunelerde elde edilmiştir. Bağlayıcının amorf faz ve kristalin kaolinitten meydana geldiği faz analizlerinde tespit edilmiştir.

Artan sıcaklık ile numunelerde amorf fazın arttığı görülmüştür. Mikroyapı analizleri %30 ve %40 bağlayıcı oranında aşırı bağlayıcı faz nedeni ile tanelerin birbirinden uzaklaştığını göstermiştir. Her iki dolgu tane boyutu için numunelerde bağlayıcı oranı kütlece %20'ye ulaştığında en yüksek dayanım elde edilmiştir. %20 den daha yüksek bağlayıcı oranlarında numunelerde mukavemet düşmüş ve deformasyon gerçekleşmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Alkali Aktivasyon, İnorganik Bağlayıcı, Kaolin, Sodyum Silikat.

**Bilim Kodu:** 91526

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF KAOLINE AND SODIUM SILICATE BASED INORGANIC BINDER**

**Selin DEMİR**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Metallurgy Education**

**Thesis Advisor:**

**Asist. Prof. Süleyman Yaşın**

**January 2020, 80 pages**

In this study, silica sand was bonded with sodium silicate and kaolin based inorganic binder and final solid samples were obtained by heat treatment. The effect of the chemical composition of kaolin and sodium silicate based inorganic binder, the production temperature in the temperature range of 200-320 °C, the binder ratio up to 40%wt. and two different particle size distribution of sand on the final product properties were systematically investigated.

As a result of the study, it was found that the highest compressive strength was obtained when the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar ratio was 5, the  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar ratio was 1 and the  $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar ratio was 30. 240 °C temperature was found to be a threshold value for the reactions to take place, but the highest compressive strength value was obtained in the samples cured at 300 °C temperature. Binder consists of

the amorphous phase and the crystalline kaolinite according to the phase analysis. The amorphous phase was increased in the samples with increasing temperature. The microstructure analysis showed that, at 30% wt. and 40% wt. binder ratio, particles were separated from each other due to excessive binder phase. The highest strength values were obtained when the binder ratio in the samples reached 20% wt. for both particle sizes. At the binder ratios higher than 20% wt., the strength of the samples decreased, and deformation occurred.

**Key Word** : Alkali Activation, Inorganic Binder, Kaolin, Sodium Silicate.

**Science Code** : 91526



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Ü. Süleyman YAŞIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu alıőma, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiőtir. Proje Numarası: KBÜBAP-18-YL-061. Yüksek lisans çalıőmalarına destek veren Karabük Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
ALKALİ AKTİVE MALZEMELER.....	4
2.1. ALKALİ AKTİVE MALZEMELERİN TARİHÇESİ.....	5
2.1. ALKALİ AKTİVASYONDA KULLANILAN BAŞLANGIÇ MALZEMELERİ .....	6
2.2.1. Alkali Aktivatörler.....	6
2.2.1.1 Sodyum Hidroksit ve Alkali Aktivasyonda Kullanımı.....	6
2.2.1.2. Sodyum Silikat ve Alkali Aktivasyonda Kullanımı.....	8
2.2.1.3. Sodyum Karbonat ve Alkali Aktivasyonda Kullanımı .....	10
2.2.1.4. Sodyum Sülfat ve Alkali Aktivasyonda Kullanımı .....	12
2.2.2 Yüksek Fırın Cürufu ve Alkali Aktivasyonu.....	13
2.2.3 Uçucu Kül ve Alkali Aktivasyonu.....	14
2.2.4 Cam ve Alkali Aktivasyonu.....	15
2.2.5. Pomza ve Alkali Aktivasyonu .....	17
2.2.6. Metakaolin ve Alkali Aktivasyonu .....	18
2.2.7 Kaolin ve Alkali Aktivasyonu .....	22

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 3 .....	25
KAOLİN VE SODYUM SİLİKAT ESALİ İNORGANİK BAĞLAYICI VE POTANSİYEL UYGULAMA ALANLARI .....	25
3.1. METAL DÖKÜM UYGULAMALARI.....	26
3.2. YAPI MALZEMELERİ UYGULAMALARI.....	28
3.3. YALITIM MALZEMELERİ UYGULAMALARI .....	30
3.4. REFRAKTERİK YAPIŞTIRICI UYGULAMALARI.....	32
BÖLÜM 4 .....	34
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	34
4.1. MALZEME.....	34
4.2. YÖNTEM .....	34
BÖLÜM 5 .....	41
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	38
5.1. GÖRSEL İNCELEMELER .....	38
5.2. BASMA DAYANIMI TESTİ SONUÇLARI.....	40
5.3. XRD ANALİZİ SONUÇLARI.....	47
5.4. FTIR ANALİZİ SONUÇLARI.....	51
5.5. DTA-TG ANALİZİ SONUÇLARI .....	55
5.6. SEM ANALİZİ SONUÇLARI .....	60
BÖLÜM 6 .....	65
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR .....	67
ÖZGEÇMİŞ .....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 4.1.	Numune şekillendirmede kullanılan çelik kalıp.....	35
Şekil 5.1.	Standart kum kullanılarak optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin fotoğrafları.....	38
Şekil 5.2.	İnce kum kullanılarak optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin fotoğrafları.....	39
Şekil 5.3.	Standart kum kullanılarak farklı sıcaklıklar ile üretilen optimum bileşimdeki numunelerin fotoğrafları.....	40
Şekil 5.4.	Farklı Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> oranlarına sahip 240 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin basma dayanımları.....	41
Şekil 5.5.	Farklı SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> oranlarına sahip 240 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin basma dayanımları.....	42
Şekil 5.6.	Farklı H <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> oranlarına sahip 240 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin basma dayanımları.....	44
Şekil 5.7.	Farklı sıcaklıklarda üretilen optimum bileşimdeki numunelerin basma dayanımları.....	45
Şekil 5.9.	Farklı sıcaklıklarda üretilen optimum bileşimdeki numunelerin XRD paternleri; a) Kaolin, b) 200 °C, c) 240 °C, d) 260 °C, e) 280 °C, f) 300 °C, g) 320 °C.....	48
Şekil 5.10.	Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem gören optimum bileşimdeki numunelere ait FTIR spektrumları; a) Kaolin, b) 200 °C, c) 240 °C, d) 260 °C, e) 280 °C, f) 300 °C, g) 320 °C.....	52
Şekil 5.11.	Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem gören optimum bileşimdeki numunelerin DTA-TG eğrileri; a) Kaolin, b) 200 °C, c) 240 °C, d) 260 °C, e) 280 °C, f) 300 °C, g) 320 °C.....	56
Şekil 5.12.	a) 200 °C ve b) 240 °C sıcaklıkta üretilen %20 optimum bileşimdeki reçine katkılı standart kum dolgulu numunenin 20000X büyütmedeki SEM görüntüleri.....	60
Şekil 5.13.	Farklı sıcaklıklarda üretilen %20 optimum bileşimdeki reçine katkılı standart kum dolgulu numunelerin 3000x büyütmedeki SEM görüntüleri; a) 200 °C, b) 240 °C, c) 260 °C, d) 280 °C, e)300 °C, f) 320 °C.....	61
Şekil 5.14.	Optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen standart kum dolgulu numunelerin 200X büyütmedeki SEM görüntüleri; a) %2,5, b) %5, c) %10, d) %20, e) %30, f) %40.....	62

Şekil 5.15. Optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen ince kum dolgulu numunelerin 200X büyütmedeki SEM görüntüleri; a) %2,5, b) %5, c) %10, d) %20, e) %30, f) %40. .... 64

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Farklı Si/Al molar oranı ile bağlantılı bazı jeopolimer uygulamaları....	25
Çizelge 4.1. Kaolinin kimyasal analizi (%). .....	34
Çizelge 4.2. Çalışmada üretilen numunelerin bileşimleri ve üretim parametreleri (serilerde değişimi izlenen parametre gri renk ile belirtilmiştir). .....	36
Çizelge 5.1. Farklı sıcaklık aralıklarında numunelerde görülen kütle kayıpları (%)..	59
Çizelge 5.2. Numunelerin üretim sıcaklıklarına kadar gerçekleşen kütle kaybı (%)..	59

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- ° : derece  
°C : derece santigrat

### KISALTMALAR

- MPa : Mega Paskal  
LTGS : Low Temperature Geopolymer Setting (Düşük Sıcaklık Jeopolimer Sertleşmesi)  
XRD : X – Ray Diffraction (X Işınları Kırınımı)  
FTIR : Fourier Transform Infrared (Fourier Dönüşüm Kızılötesi)  
SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopi)  
DTA-TG : Diferansiyel Termal Analiz-Termo Gravimetre

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Alkali aktive malzemeler ve jeopolimerler, artan başlangıç malzemesi çeşitliliği ve yapı malzemelerinden ileri teknoloji kompozitlerin üretimine kadar olan ve sürekli genişleyen uygulama yelpazesi ile günümüzde önemli bir inorganik malzeme grubunu teşkil etmektedir [1,2]. Düşük CO<sub>2</sub> salınımı ile yığın olarak üretilen yapı malzemelerinin elde edilme imkanı ve endüstriyel atık ya da işlenmemiş başlangıç malzemelerini hammadde olarak kullanabilmesi bu malzemeler üzerinde artan bir bilimsel ilgi oluşturmaktadır [3,4].

Alkali aktive malzemelerin temel üretim yöntemleri benzer adımlardan meydana gelmektedir. Üretim süreçlerinin ilk adımı alkali aktivatör adı verilen ve genellikle sodyum silikat sulu çözeltisinden meydana gelen aktivatör ile reaksiyon kabiliyetine sahip katı bir tozun karıştırılmasıdır [5,6]. Bu katı toz yüksek tepkime kabiliyeti nedeni ile genellikle uçucu kül ya da metakaolindir [7]. Bu iki başlangıç malzemesine ilaveten cam tozu, cüruf, pomza, ve perlit gibi malzemeler de kullanılabilir [8,9,10,11]. Karıştırmayı takiben hammaddelerin çözünme süreci başlar. Çözünme süreci ile çözeltiliye geçen silisyum ve alüminyum bileşikler kondensasyon tepkimeleri ile birleşip sürekli bir ağ yapı oluşturarak katı bir ürünü ortaya çıkarmaktadır [7]. Bu tepkimelerin gerçekleşebilmesi için sulu bir ortama ihtiyaç vardır. Bu yüzden kür işlemleri buharlaşmaya kapalı bir kap içerisinde yapılmalıdır [3]. Kür işlemi çözünme ve takiben kondensasyon tepkimelerini içerdiğinden yavaş ilerleyen bir süreçtir ve üretilen ürün uzun zamanda çoğu uygulama için yeterli dayanıma çıkabilir. Kür işlemini tamamlayan ürünlerin bünyesinde hapsolmuş durumdaki suyun buharlaşması esnasında meydana gelen küçülmeler ürünlerin çatlamasına neden olabilmektedir. Bu nedenle ürünlere kontrollü bir kurutma süreci uygulanmalıdır [7]. Alkali aktive malzemelerin endüstri



için yavaş olan üretim sürecini hızlandırabilmek, uygulama alanlarını genişletmek için önem taşımaktadır.

Alkali aktive malzemelerin üretiminde, çeşitli katı hammaddeler kullanılabilse de metakaolinin yüksek tepkime kabiliyetine sahip olması ve yüksek saflıkta elde edilebilmesi üretimde avantaj sağlamaktadır [7]. Bununla birlikte yüksek aktif alümina içeriği sayesinde,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı bire yakın olması nedeni ile son yapısında serbest sodyum bulundurmayan ve jeopolimer adı verilen daha kararlı ve uzun ömürlü ürünlerin üretimine imkan sağlaması metakaolini daha da önemli hale getirmektedir [7].

Metakaolinin alkalinasyon sürecinde yüksek tepkime kabiliyeti gösterebilmesi için kaolinin özel koşullarda (uygun sıcaklık, süre ve uygun kalsinasyon fırını seçimi) kalsine edilmesi ile üretilmesi gerekmektedir [12,13]. Bu kalsinasyon şartları metakaolinin üretildiği kaolinin doğada kolaylıkla bulunmasına rağmen, alkali aktivasyon açısından uygun ısı işlem görmüş metakaolinin ulaşılabilirliğini azaltmaktadır. Metakaolin kalsine edilmeden kaolin formu ile alkali aktive edildiğinde ise tepkimeler hem çok yavaş hem de verimsiz olmaktadır [14,3]. Alkali aktive malzemelerin üretiminde kaolinin kullanılması ile uygun dayanımda ürünler elde edilmesini sağlayan ve alkali aktivasyon sürecini hızlandıran yeni bir alkali aktive malzeme üretim yöntemine ihtiyaç vardır.

Tworowska vd. metal dökümlerinde kullanılmak üzere yeni tipte bir alkali aktive malzemeyi geliştirmişlerdir [15]. Bu bağlayıcının üretimindeki yenilikçi yaklaşımı bahsedilen sorunları aşacak şekildedir. Bağlayıcının üretiminde katı alümina silikat kaynağı olarak kalsine edilmemiş kaolin kullanılmıştır. Kalsine edilmemiş kaolin, kum ve sodyum silikat çözeltisi ile karıştırılıp kalıplandıktan sonra 230-260 °C sıcaklıkta sertleştirilmiştir [15]. Bu tip bir kür yöntemi daha önce bilinen yöntemlerden oldukça farklıdır. Çünkü bilinen yöntemlerde kür işlemi buharlaşmaya kapalı olarak ve 100 °C'den daha düşük altında uzun sürelerde gerçekleşmektedir. Bu teknik reaksiyonların devamı için ortamda suyun sıvı fazda bulunması zorunlu olduğundan dolayı gereklidir. Kapalı kalıp kür ortamlarında tepkimenin başlangıcında öncelikle çözünme gerçekleşmesi gerektiğinden, yüksek çözünürlüğe

sahip olan metakaolinin, kaolinden oldukça yüksek dayanım gösterdiği bilinmektedir [7]. Twordowska vd. ise metakaolini sodyum silikat ile karıştırıp yüksek sıcaklıkta kaolinle aynı şartlarda buharlaşmaya açık olarak kür ettiğinde kaolinden oldukça daha düşük dayanım elde ettiğini rapor etmiştir [15]. Bu durum kurutma sonrasında birbiri ile temas halinde olan kaolin yüzeyindeki OH<sup>-</sup> moleküllerinin kondensasyon tepkimelerine dahil olup bağlar kurmaya devam etmesi ile açıklanmıştır [15]. Üretim tekniğinde yüksek sıcaklığın getirdiği kinetik avantajı, kaolinin yapısında bulunan OH<sup>-</sup> molekülleri ile birleştiğinde bazı avantajları içeren ve çeşitli uygulamalar için yeterli dayanımda olan ürünleri ortaya çıkarabilecek yeni bir üretim tekniği ortaya çıkmıştır. Bu avantajlardan ilki yerkabuğunda kolayca bulunabilen kaolin kaynaklarının üretimde kullanılabilmesidir. Bir diğer avantaj kaolinin 750 °C sıcaklıkta kalsine edilmesine olan ihtiyaç ortadan kalktığından azalan maliyet ve CO<sub>2</sub> salınımıdır. Bir diğer önemli avantaj ise kısa süre içerisinde kurutma sürecini de içeren ısı işlem ile nihai ürünlerin eldesine imkan veren bir prosesin elde edilmesidir [15]. Bahsedilen avantajlar bu bağlayıcıyı her ne kadar döküm kumu bağlayıcısı olarak ortaya çıkardı ise de yapı malzemeleri, yüksek sıcaklık bağlayıcıları ve yalıtım malzemeleri gibi inorganik bağlayıcıların kullanıldığı bir çok uygulama için uygun bir aday haline getirmektedir. Ancak bu tip uygulamalar için bağlayıcı kimyasal bileşimi, üretim sıcaklığı ve bağlayıcı/dolgu oranı gibi parametrelerin son ürün iç yapısı ile mekanik özelliklerine olan etkisi hakkında bilgiye ihtiyaç vardır. Bu çalışmanın amacı ve özgün değeri, çok yönlü olarak kullanılabilen bu inorganik bağlayıcı tipinin kompozisyon ve üretim parametrelerinin son ürün yapı ve özelliklerine olan etkisini sistematik bir araştırma ile ortaya çıkarmaktır.

## BÖLÜM 2

### ALKALİ AKTİVE MALZEMELER

Günümüzde yapı malzemeleri içerisinde kullanımı en fazla olan inorganik bağlayıcı çimentodur [16]. Çimento üretiminde ortaya çıkan CO<sub>2</sub> emisyonunun yarattığı çevresel sorunlar ve yüksek maliyeti dikkate alındığında alternatif malzeme araştırma gereği ortaya çıkmıştır [17]. Bu araştırmalar içerisinde, yapısında alüminyum silikatları içeren, genellikle katı halde elde edilen endüstriyel yan ürünlerin sodyum hidroksit, sodyum silikat gibi alkali aktivatörler ile aktive edilmiş bağlayıcılar büyük ilgi görmüştür [18,19].

Alümina ve silis içeren malzemelerin alkali aktivasyonu; alümina silikatların kuvvetli alkali sıvı çözeltiler içerisinde çözünmesi, serbest iyon gruplarının dağılması ve polikondensasyon olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir [20]. İlk olarak, yüksek pH altında Si-O-Si ve Al-O-Al kovalent bağları parçalanır ve böylece bu gruplar kolloid fazına dönüşür [21]. Daha sonra aralarında etkileşime giren tahrip olmuş bu yapılar amorf yapıda yoğunlaşır [21].

Alkali aktivasyonun reaktivitesi ve alkali aktive edilmiş bağlayıcının mekanik özellikleri amorf alümina ve silis içeriğine, aktivatör türü ve koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir [20,21].

Alkali aktivasyon teknolojisini öne çıkaran avantajlarından biri hem doğal malzemelerin (kil veya feldspat gibi) hem de çevresel kirliliğe sebep olan endüstriyel atıkların (yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi) kullanılabilir olmasıdır [2].

## 2.1. ALKALİ AKTİVE MALZEMELERİN TARİHÇESİ

Literatürde, alkali aktive malzemeler alanında bilim insanları önemli bir tarihsel birikim ortaya çıkarmıştır.

Alkali aktive malzeme kullanımı, ilk olarak 1930 yılında Kuhl'un cüruf tozu ve kostik potas çözeltisi ile yapmış olduğu çalışmada görülmüştür [22]. 1937 yılında Chassevent, kostik potas ve soda çözeltisini kullanarak cürufların reaksiyonunu incelemiştir [6]. Purdon, 1940'lı yıllarda sodyum hidroksit (NaOH) ve yüksek fırın cürufu ile yapmış olduğu araştırmalar neticesinde alkali ilavesiyle aktive olan yüksek fırın cürufunun yeni bir bağlayıcı oluşturduğunu keşfetmiştir [21,23]. Cüruf esaslı bağlayıcıları üzerine araştırma yapan Glukhovsky, 1960 ve 1970 yılları arasında Antik Roma ve Mısır inşalarında kullanılan bağlayıcıları incelemiştir [21]. Çalışmalarının neticesinde yapıların C-A-S-H içerdiğini ve bu yapıların günümüze kadar bozulmadan kalabilmesinin yine yapısında bulunan analsit kristallerinden kaynaklandığını keşfetmiştir [24].

Konuyla ilgili araştırmalar Joseph Davidovits'in yanıcı olmayan polimer malzemeler ile ilgili çalışmalarından sonra önemli bir artış göstermiştir [21]. Davidovits, 1970'li yıllarda NaOH çözeltisi ile kaolin mineralinin kimyasal tepkimesinden bir inorganik bağlayıcı elde etmiştir [25]. Davidovits tarafından geliştirilen bu öncü malzemeyi takiben termoset polimer reaksiyonlarına benzer şekilde düşük sıcaklıklarda polimerleşerek sertleşen ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda sert ve yanıcı olmayan bağlayıcılar geliştirilmiş ve bu inorganik malzeme grubuna Davidovits tarafından "jeopolimer" adı verilmiştir [21].

Özellikle yüksek alümina içeriği nedeni ile uçucu kül ve metakaolinin alkalınasyonuna dayanan jeopolimerler daha akışkan bir reçine oluşturabildiğinden, polimer malzemelere kıyasla yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olmaları sayesinde geçmişten günümüze kadar çeşitli alanlarda uygulamalar bulmuştur [26,27].

## 2.1. ALKALİ AKTİVASYONDA KULLANILAN BAŞLANGIÇ MALZEMELERİ

### 2.2.1. Alkali Aktivatörler

Alüminosilikat malzemeler, yüksek pH altında alkali kimyasallar kullanılarak aktifleştirilebilir [19]. Aktive edici çözeltilerdeki anyon, sistemlerde meydana gelen reaksiyonlarda ve dolayısıyla sentezlenen malzemenin mineralojik ve mikroyapısal özelliklerinde önemli rol oynamaktadır [2].

Genellikle en yaygın kullanılan aktivatörler sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum sülfattır [6]. Potasyum bileşikleri bulunabilirlikleri ve maliyetleri nedeniyle potansiyel uygulamaları sınırlıdır [6]. Diğer yandan, sodyum ve potasyum bileşiklerinin özellikleri oldukça benzerdir [6].

Alkali aktivatörün bir alkali ile aktive edilmiş malzeme içindeki en önemli rolü, alümina silikatların çözülmesi ve yüksek bir pH üretilmesi ile reaksiyonun hızlandırılmasıdır [28]. Alkali silikatlar ve hidroksitler en yüksek pH değerlerini üretirken, karbonatlar ve sülfatlar orta derecede alkali koşullar oluşturmaktadır [28].

#### 2.2.1.1 Sodyum Hidroksit ve Alkali Aktivasyonda Kullanımı

Sodyum hidroksit (NaOH), atmosferdeki nemi ve CO<sub>2</sub>'i absorbe edebilen beyaz renkli, bazik özelliğe sahip inorganik bir maddedir [29]. Diğer adı kostik soda olan bu bileşik genellikle katı halde veya sulu çözelti olarak kullanılmaktadır [30,31]. Katı haldeki sodyum hidroksitin suda çözünürlüğü oldukça iyidir [29]. Suda çözüldüğünde veya asitlerle tepkimeye girdiğinde önemli miktarda ekzotermik ısı açığa çıkarır [30, 32]. Kostik soda güçlü alkalilerin en tipik örneğidir [32].

Sodyum hidroksitin, NaCl (tuz) sulu çözeltisinin elektrolizi ile üretimi Eşitlik 2.1'de gösterilmiştir [33]:



Bu kimyasal reaksiyon sonucu yan ürün olarak Cl<sub>2</sub> (Klor) ve H<sub>2</sub> (Hidrojen) oluşur [34]. NaCl suda çözüldüğünde, içerdiği iyonlar vasıtasıyla elektriği iletebilen elektrolitik bir çözelti meydana gelir [35]. Elektrolitik çözelti içerisinde indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarının gerçekleştiği anot ve katot olmak üzere iki ayrı elektrot bulunmaktadır [35]. Elektroliz neticesinde Cl<sub>2</sub> gazı anotta oluşurken katotta H<sub>2</sub> ve NaOH oluşmaktadır [36]. Oluşan ürünlerin birbiriyle temasını ve reaksiyona girerek patlayıcı hidrojen-klor gaz karışımlarının oluşmasını engellemek amacıyla civa hücreli, diyafram hücreli ve membran hücreli yapılar geliştirilmiştir [34].

Sodyum hidroksit; kağıt, tekstil, ilaç, sabun, deterjan, metalurji ve alüminyum gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [34].

Wang vd. metakaolin esaslı jeopolimerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini, NaOH konsantrasyonunun etkisine bağlı olarak incelemiştir. 4-12 mol/L arasında değişen NaOH konsantrasyonları ile aktive edilen jeopolimer numuneleri 65 °C sıcaklıkta 10 saat süreyle kür edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, NaOH konsantrasyonundaki artış ile beraber basma dayanımı, eğme dayanımı ve görünür yoğunlukta artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda XRD sonuçlarından elde edilen verilere göre mevcut amorf fazın NaOH konsantrasyonuna bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir [37].

İbrahim vd. NaOH ve sodyum silikat aktivatörleri ile aktive edilen uçucu külün mekanik özellikleri üzerinde, NaOH konsantrasyonunun etkisini araştırmışlardır. 6M, 8M, 10M, 12M ve 14M NaOH çözeltileri ile hazırlanan numunelerin, 80 °C sıcaklıkta 24 saat kür edilmiştir. Numunelerin basma dayanımları incelendiğinde özellikle farklı NaOH konsantrasyonlarının önemli etkileri olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek basma dayanımı 12M NaOH ile hazırlanan numunede 15,6 MPa elde edilmiştir. Aynı zamanda su emme oranlarına bakıldığında 6M ila 12M NaOH arasında su emme oranını azaldığı ve bu çalışma için en düşük su emme, tatmin edici yoğunluk ve en yüksek basma dayanımının elde edildiği optimum NaOH konsantrasyonunun 12M olduğu ifade edilmiştir [38].

Yahya vd. F sınıfı uçucu külün sadece NaOH ve NaOH+sodyum silikat kombinasyonu ile alkali aktivasyonunu gerçekleştirmişlerdir. NaOH çözeltilerinin farklı konsantrasyonları (8M, 10M, 12M, 14M) kullanılmıştır. Alkali aktive edilmiş uçucu kül mekanik performansını, 1,3 ve 7 günlük basma dayanımları ile değerlendirmişlerdir. Sadece NaOH ile aktive edilmiş uçucu kül numunelerinde basma dayanımı 14M NaOH konsantrasyonu için 7. günde maksimum 7.1 MPa elde edilmiştir. NaOH ve sodyum silikat karışımı ile aktive edilen numunelerde 12M NaOH konsantrasyonu için maksimum basınç dayanımı 33.33 MPa elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda NaOH ve sodyum silikat aktivatörlerinin birlikte kullanılmasının mekanik dayanım performansı açısından daha etkili olduğu ifade edilmiştir [39].

#### **2.2.1.2. Sodyum Silikat ve Alkali Aktivasyonda Kullanımı**

Sodyum silikat,  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  formülüne sahip kimyasal bileşiklerin genel adıdır [6]. Burada bir sayı olan “n” ifadesinin çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere aldığı değerler farklılık göstermektedir [6].

Van Helmont, 1940 yılında silika ile bir alkali kimyasalı karıştırarak ilk kez sıvı sodyum silikatı üretmiştir [6]. Sodyum silikat 1864 yılına kadar uzanan süre boyunca sabun imalatında temel hammadde olarak kullanılmıştır [6].

Sodyum silikat günümüzde, 1300-1500 °C sıcaklık aralığında, kuvars kumu ile sodyum karbonatın ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ergitilmesi sonucu üretilmektedir [40]. Genellikle kuvars kumu %99,7  $\text{SiO}_2$  ile düşük miktarlarda magnezyum, demir, alüminyum ve kalsiyum oksitlerini içermektedir [40]. Elde edilen katı sodyum silikatın uygun buhar basıncı ve sıcaklık altında çözündürülmesiyle sıvı sodyum silikat meydana gelmektedir [6].

$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  molar oranına bağlı olarak farklı uygulama alanlarında kullanılmak üzere çeşitli silikat formları üretmek mümkündür [41]. Ticari ürün olarak üretilen sıvı sodyum silikat için “n” değeri  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 1,6\text{SiO}_2$  ve  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$  arasında değişmektedir [6]. Ancak, eşit moleküler oranda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriğine sahip bir çözelti konsantre

edilerek kesin bileşime sahip “metasilikat” adı verilen katı elde edilebilmektedir [6,42].

Sodyum silikatın elde edilebileceği bir diğer işlem ise, silika mineralini sodyum hidroksit çözeltisiyle çözündürmektir (Eşitlik 2.2) [41].



Çoğunlukla deterjan ve sabun imalatı olmak üzere, petro-kimya endüstrisi, silika jel üretimi, tekstil, seramik, çimento, döküm, yalıtım malzemeleri, su arıtımı gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [40].

Fernandez-Jimenez vd. alkali ile aktive edilmiş cürufun mekanik özelliklerine aktivatör türünün ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve  $\text{NaOH}$ ) basma dayanımına etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımının alkali aktivasyonda en iyi dayanımı verdiğini göstermiştir. [43].

Bakharev vd. Avustralya cürufunun alkali aktivasyonunu, sodyum silikat, sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum fosfat ve bu aktivatörlerin kombinasyonlarını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu aktivatörler ile silikat modülü (Ms) ve alkali konsantrasyonunun basma dayanımı ve priz süresi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda cürufların aynı  $\text{Na}^+$  içeriğine sahip aktivatörlerin anyon ve anyon gruplarına karşı seçicilik gösterdiği ve en iyi aktivasyonu sodyum silikatın sağladığı gözlemlenmiştir. Sodyum silikat ile aktive edilen harçlar için basma dayanımı 20 ila 40 MPa aralığında elde edilmiştir. Basma dayanımının silikat modülü ve alkali konsantrasyonuna bağlı olarak değişiklik gösterdiği, yüksek modülde erken dayanımın azaldığı ve priz süresinin önemli ölçüde kısaldığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda yüksek alkali konsantrasyonlarında sodyum silikat ile aktive edilen cürufun hızlı sertleşen bir çimento gibi davrandığı belirtilmiştir [44].

Zivica, cürufun alkali aktivasyonunda sodyum hidroksit, sodyum silikat ve sodyum karbonat aktivatör türlerinin ve 20-31 °C arasında değişen sıcaklıklara bağlı olarak alkali aktive cürufun priz süresi ve işlenebilirliğini araştırmıştır. Sodyum silikatın,



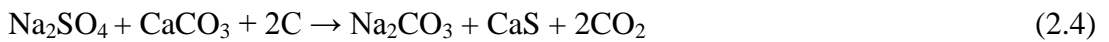
NaOH ve Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>'a göre priz süresini azalttığı ve işlenebilirliği arttırdığını ifade etmiştir. Sodyum silikat ile aktive edilen cüruflarda sıcaklık arttıkça priz süresinde sürekli bir etki söz konusu iken, sodyum hidroksit ve sodyum karbonatta priz süresinde ani bir hızlanma ve sıcaklık 24-29 °C'ye ulaştığında işlenebilirlikte azalma olduğu gözlemlenmiştir [45].

### 2.2.1.3. Sodyum Karbonat ve Alkali Aktivasyonda Kullanımı

Sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), beyaz renkte kristal yapılı, higroskopik özelliği olan ve güçlü alkaline tepkime oluşturan bir kimyasaldır [46]. Soda külü olarak da bilinen bu kimyasal, kütle yoğunluğu ve parçacıkların boyutu gibi fiziksel özelliklerine bağlı olarak endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere "hafif soda külü" ve "ağır soda külü" olarak üretilmektedir [6,46]. Hafif soda külü, ince taneli ve düşük sıcaklıklarda hemen çözünebilir özelliğine sahiptir ve buna bağlı olarak sabun, deterjan, tekstil gibi alanlarda kullanılmaktadır [46]. Ağır soda külü ise, özellikle düşük toz içeriğinin fayda sağladığı cam endüstrisinde kullanılmaktadır [46,47].

Sodyum karbonat üretimi, doğal kaynaklardan ve sentetik yollardan sağlanabilmektedir [6,46]. İlk olarak, 1793 yılında Le Blanc prosesi ile gerçekleştirilen sentetik üretim daha sonra Solvay prosesi ile devam etmiştir [48]. Fakat Solvay prosesinin yüksek maliyeti sebebiyle son yıllarda doğal kaynaklardan sodyum karbonat üretimi sağlamak önemli hale gelmiştir [48].

Eşitlik 2.3 ve 2.4'te gösterilen Le Blanc Prosesinde ilk olarak, sodyum klorür (NaCl) ile sülfat asidi (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) reaksiyona girerek sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve HCl gazı oluşur [49]. Daha sonra Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, kok ve kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) ile karıştırılıp 900-1000 °C sıcaklıkta ergitilerek sodyum karbonat meydana gelir [49].



Le Blanc prosesi; fazla miktarda enerji tüketimi, reaksiyonun tek basamakta gerçekleşmemesi ve kalsiyum sülfür (CaS) ile kok cürufu gibi atıkların çevresel sorun oluşturması gibi dezavantajlar sebebiyle zamanla önemini kaybetmiştir [50].

Solvay prosesi, 1861 yılında Ernest Solvey tarafından sodyum karbonat üretmek üzere gerçekleştirilmiştir [51]. Kullanılan temel hammaddeler; NaCl, kireçtaşı, kok ve reaksiyona katalizör olarak giren ve geri kazanımı sağlanan NH<sub>3</sub> (amonyak) gazıdır [52]. Bu temel hammaddeler dikkate alındığında, toplam reaksiyon (Eşitlik 2.5) :



Fakat son ürün olarak Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> elde edebilmek için birçok farklı işlem basamaklarının uygulanması gerekmektedir [52]. İşlem ilk olarak tuzlu su çözeltisinin hazırlanmasıyla başlamaktadır [52]. Hazırlanan doymuş tuzlu su çözeltisi işleme alınmadan önce içerdiği kalsiyum ve magnezyum iyonlarının uzaklaştırılmasıyla saflaştırılmaktadır [52]. Saflaştırılmış tuz çözeltisi, amonyak gazını absorbe eder ve daha sonra CO<sub>2</sub> gazı ile doyrulur [50]. İşlemden kullanılan CO<sub>2</sub> gazı, kireçtaşının kok kömürü ile sağlanan enerji vasıtasıyla ayrıştırılmasından elde edilmektedir (Eşitlik 2.6) [53].



Gerçekleşen tepkime sonunda oluşan sodyum bikarbonat (NaHCO<sub>3</sub>), amonyum klorüre (NH<sub>4</sub>Cl) göre daha az çözünür ve kristalize olur (Eşitlik 2.7) [53]. Sodyum bikarbonat kristalleri süzülerek amonyum klorürden ayrıştırılır ve sodyum karbonat elde edilmek üzere kalsine edilir [46]. Amonyum klorür ise kalsiyum hidroksit (Ca(OH)<sub>2</sub>) ile reaksiyona sokularak amonyak gazının geri kazanımı sağlanır [53]. Ca(OH)<sub>2</sub>, kireçtaşının ayrıştırılmasıyla oluşan CaO'in su ile karıştırılmasından elde edilir [53].

Solvay prosesi ile sodyum karbonat üretimi, fazla enerji tüketimi, yüksek maliyet ve üretim esnasında ortaya çıkan katı ve sıvı atıkların yarattığı çevresel sorunlar gibi dezavantajlara sahiptir [54].

Yuan vd. sodyum karbonat ile aktive edilmiş cürufun, reaksiyon kinetiğini, reaksiyon ürünlerini ve cüruf partikül boyutunun sürece etkisini incelemişlerdir. Cüruf partikül boyutunun küçültülmesiyle sodyum karbonat ile aktive edilmiş cürufun yaklaşık 34 MPa basınç dayanımı sergilediği gözlemlenmiştir. Reaksiyon ürünlerinin bir ve iki günlük kür süresince kalsit, gaylusit ve C-A-S-H jeli olduğu belirlenmiştir. Sodyum karbonat dozajının (%3-5 Na<sub>2</sub>O) reaksiyon kinetiği ve kuvvet gelişimi üzerine etkisinin belirgin olmadığı ifade edilmiştir [55].

#### **2.2.1.4. Sodyum Sülfat ve Alkali Aktivasyonda Kullanımı**

Sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), çeşitli mineral birikintilerin bulunduğu jeolojik oluşumlarda veya tuzlu su gölleri gibi doğal kaynaklardan üretilen ve pek çok kimyasal ve metalurjik işlemlerde yan ürün olarak elde edilen endüstriyel bir kimyasaldır [56,57]. Doğada bulunan en yaygın sodyum sülfat mineralleri mirabillit, tenardit, globerit ve blödit'tir [58].

Sodyum sülfat ilk olarak 1658 yılında Alman Kimyager Johann Rudolf Glauber tarafından glauber tuzu olarak tanımlanmış ve ilaç olarak kullanılmıştır [59]. Daha sonra 1880 yılında Kraft işleminin icadı ile kağıt hamuru ve kağıt üretimi için sodyum sülfat büyük bir endüstriyel pazar oluşturmuştur [59]. Günümüzde ise kağıt sanayisinin yanı sıra cam, seramik, sabun ve deterjan, boya, tekstil sanayii gibi bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [60].

Battagin [61], yüksek fırın cürufunun sodyum sülfat ile aktive edilmesinin, uzun vadeli basma dayanımını önemli ölçüde etkilemeden alkali aktive yüksek fırın cürufunun erken basma dayanımını artırdığını ve yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonunda yaygın olarak kullanılan sodyum silikat alkali aktivatörünün, reaksiyonda serbest kalan Ca(OH)<sub>2</sub> varlığında sodyum sülfata göre daha düşük performansa sahip olduğunu ifade etmiştir [61].

Rashad vd. farklı sodyum sülfat konsantrasyonları ile aktive edilen cürufun 200-800 °C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra kimyasal ve mekanik stabilitesini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre sodyum sülfat ile aktive edilmiş cürufun 600 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda meydana gelen bozulmalara karşı daha yüksek bir dirence sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda daha ince cüruf ve daha yüksek sodyum sülfat konsantrasyonu ile daha iyi sıcaklık direnci sağlandığı belirtilmiştir [62].

### **2.2.2. Yüksek Fırın Cürufu ve Alkali Aktivasyonu**

Yüksek fırın cürufu (YFC), oksit demir cevherinin yüksek fırında indirgenerek ham demir elde edilmesi sırasında oluşan bir yan üründür [63]. Cürufun içinde çoğunlukla CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO bileşenleri mevcuttur [2]. Genel olarak gehlenite (2CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>) ve akermanite (2CaO.MgO.2SiO<sub>2</sub>) benzeri bileşimler ve zayıf kristalli fazların karışımıdır [64].

YFC su ile hızlı soğutulduğunda camsı yapıda, ekonomik açıdan önemli özelliklere sahip bir malzeme elde edilir [65]. Granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) olarak adlandırılan bu ürün su ile karıştırıldığında geliştirdiği hidrolik reaksiyon sonucunda yüksek alkali aktivasyon derecesine sahip olur [66]. Hidratasyon süreci cürufun su içinde erimesiyle başlayarak ilk olarak C-S-H çökmesi, ardından hidrate alüminatlar ve hidrate silika alüminatların çökmesiyle gerçekleşir [67]. Hidrolik özellik CaO/SiO<sub>2</sub> oranıyla doğru orantılı bir şekilde artar ve CaO/SiO<sub>2</sub> oranı sabit tutulduğunda artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı cürufun alkali aktivitesini artırır [68]. Dolayısıyla hidrolik özellik ne kadar iyiyse cürufun alkali aktivitesi de o kadar yüksektir [68].

Kürklü vd. granüle yüksek fırın cüruf esaslı jeopolimerin, bağlayıcı ve agrega olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Alkali sıvı çözeltisi için, NaOH ve sodyum silikatı dört farklı oranda (2:1, 1:2, 3:0, 0:3) hazırlamışlardır. Hazırlanan numuneler oda sıcaklığında 28 gün kür edildikten sonra, mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, sodyum silikatın tek başına kullanıldığında, işlenebilirliğin azaldığı ve priz süresinin çok fazla arttığı belirlenmiştir. NaOH ile sodyum silikat birlikte kullanıldığında ise işlenebilirliğin arttığı ve kalsiyumca

zengin numunelerde basma dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, en yüksek eğme dayanımı 2:1 oranında NaOH ve sodyum silikat içeren numunelerde 5,1 MPa, en yüksek basma dayanımı ise 3:0 oranında NaOH içerikli numunelerde 29,1 MPa olarak elde edilmiştir [9].

### 2.2.3. Uçucu Kül ve Alkali Aktivasyonu

Uçucu kül, termik santrallerde katı yakıt olarak kullanılan kömürün yanması sonucu ortaya çıkan bir atıktır [69]. Termik santrallerde kullanılan en önemli katı yakıtlar taş kömürü ve linyit kömürüdür [70]. Yanma esnasında baca gazları ile birlikte hareket eden bu ince kül parçacıkları (uçucu kül) elektro filtreler ile tutularak atmosfere salınımı önlenir [71]. Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal, mineralojik ve puzalonik özellikleri kullanılan yakıtın yapısı, öğütülme işlemi, kazan türü, sıcaklık ve kül toplama verimi gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterir [72]. Uçucu kül koyu gri renkte, 0.5-200 µm arasında değişen boyutlara sahip, yoğunluğu 2.2-2.7 gr/cm<sup>3</sup> olan ve küresel parçacıklardır [72]. İçi boş küresel ve ince olmaları sebebiyle ısı ve elektrik iletkenlikleri zayıftır ve yüksek yalıtım özelliğine sahiptir [71]. Kimyasal olarak alümina silikat yapıya sahip uçucu küllerin içerdiği önemli bileşenler SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaO'tir [73]. Uçucu küller F ve C olarak iki temel sınıfa ayrılmıştır: Antrasit ve bitümlü kömürün yanmasıyla meydana gelen ve %10'dan daha az CaO içeren F sınıfı, linyit ve alt-bitümlü kömürün yanmasıyla oluşan ve daha fazla CaO içeren C sınıfıdır [73,74]. Her iki uçucu kül sınıfı da puzolanik özelliklere sahip iken kalsiyum oksit miktarı fazla olan C sınıfı aynı zamanda bağlayıcılık özelliğine de sahiptir [69,75]. Uçucu küllerin en fazla kullanıldığı alan beton, tuğla üretimi, çimento, hafif agrega üretimi, dolgu malzemesi ve zemin stabilizasyonu uygulamalarının görüldüğü inşaat sektörüdür ve aynı zamanda atık suların arıtılması, metal sanayi, sondaj işleri vb. kullanım alanlarına da sahiptir [67].

Endüstriyel atık olarak ortaya çıkan ve alkaliler ile aktive gerçekleştirebilen bir diğer alümina silikat malzemede uçucu küldür. Uçucu küllerin alkaliler ile aktivasyonu sonucu oluşan amorf yapıları inorganik bağlayıcıların özellikleri, uçucu külün kimyasal kompozisyonu, alkali aktivatörlerin konsantrasyonu ve kür şartları gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir [76].

Tuyan vd. F ve C sınıfı uçucu külleri alkali aktivatör çözeltiler ile aktive ederek ürettikleri betonların mekanik özelliklerini ve yüksek sıcaklık altındaki dirençlerini incelemiştir. Bu çalışmada alkali aktivasyonun gerçekleşmesi için %97 saflıkta NaOH ve silika modülü ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) 3 olan sodyum silikat kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere etüvde yüksek sıcaklık ve ortam sıcaklığında 28 gün olmak üzere iki ayrı kür işlemi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyi, numunelerin 150 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, F tipi uçucu külün alkali aktivasyonu ile üretilen malzemenin basma dayanımı ve yüksek sıcaklık direnci en yüksek bulunmuştur. C tipi uçucu kül kullanılarak üretilen malzemelerin ise mekanik özellikleri farklılık göstermiş ve yüksek sıcaklık direnci geleneksel betonun özelliklerine kıyasla daha düşük bulunmuştur. Uçucu külün normal oda sıcaklığında reaksiyona yavaş girmesi sebebiyle yüksek sıcaklıklarda kür edilmesi, oluşan malzemede yoğun bir yapı ve kinetik enerjisinde artma sağladığı böylelikle yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [76].

Görhan vd. F sınıfı uçucu kül ile jeopolimer harçlar üretmişlerdir. NaOH konsantrasyonunun, jeopolimer harçlar üzerindeki etkisini belirlemek için sodyum silikat çözeltisi ile birlikte 3M, 6M ve 9M sodyum hidroksit kullanılmıştır. 65 °C ve 85 °C sıcaklıklar 24 saat kür edilen harçların mekanik özelliklerini incelemiştir. 6M NaOH ile üretilen jeopolimer harçların, 85 °C sıcaklıkta 24 saat kür edildikten sonra, en yüksek basma dayanımı 22 MPa elde edilmiştir [4].

#### **2.2.4. Cam ve Alkali Aktivasyonu**

Cam; silika, soda ve kireç karışımının yüksek sıcaklıklarda eritilmesiyle oluşan yüksek viskoziteye sahip sıvının soğutulmasıyla kristalleşme olmadan meydana gelen amorf yapıda saydam bir malzemedir [77]. Camın oluşumunu sağlayan çeşitli kimyasal sistemlerden en önemlisi oksitlerdir [78]. Bu oksitlerden camın ağ yapısı oluşturan temel oksit  $\text{SiO}_2$ 'dir [78,79]. Endüstriyel uygulamalarda çeşitliliği fazla ve ekonomik değeri olan cam üretimi için mevcut oksit camların yapısına giren diğer oksitler fonksiyonlarına göre başta “ağ yapıcılar” olmak üzere “düzenleyiciler” ve “ara oksitler” olarak gruplandırılabilir [78]. Cam malzemeler kimyasal içeriklerine

göre alkali-silikat camlar, borosilikat camlar, soda-kireç-silikat camlar, kurşun camlar ve alümina silikat camlar gibi sınıflardan oluşur [80,2]. Ticari cam olarak kullanımı en yaygın olan soda-kireç-silikat cam yapısı  $\text{SiO}_2$  (ağ yapıcı), alkali ve toprak alkali oksitler (düzenleyiciler) ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (aracı oksitler) oksitlerinden oluşmaktadır [81].

Günümüzde inşaat, otomotiv, enerji, beyaz eşya, gıda, içecek, ilaç, kozmetik, elektrik-elektronik, bilgisayar ve iletişim teknolojileri gibi bir çok alanda cam malzemeler önemli rol oynamaktadır [82]. Cam malzemelerin kullanım ömrü sınırlı ve biyobozunur olmaması sebebiyle tüketim artışına bağlı olarak ortaya atık camın çıkması çevresel bir sorun oluşturmaktadır [83]. Cam atıkları; beton katkı malzemesi, dolgu malzemesi, alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı ve çimento tamamlayıcı olarak kullanılabilir [8]. Tane boyutu  $38\mu\text{m}$ 'dan daha ince partikül olarak beton veya harç içerisine katıldığında puzolanik özellik gösteren atık cam tozları yüksek dayanım ve dayanıklılık sağlamaktadır [84].

Atık cam tozlarının alkaliler ile aktivasyon çalışmaları, çevrenin korunması ve endüstriyel atıkların geri dönüştürülebilmesi için yapılan araştırmalar arasında yer almaktadır.

Yüksel vd. atık cam içeren agregalı betonları incelediğinde, alkali ile agregadaki silis arasında gerçekleşen ve hasara sebep olan alkali silis reaksiyonunun, camın tane boyutuna bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Camın tane boyutu inceltildiğinde genleşme olmadığı ve mevcut genleşmelerin de azaldığı sonucuna varılmıştır [85].

Atık cam tozunun çimento tamamlayıcı olarak kullanılmasındaki sebep ise içeriğinde bulunan amorf  $\text{SiO}_2$ 'nin çimento hidrasyonunda oluşan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile bağlanarak hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip yoğun kalsiyum-silika-hidrat (CSH) jelleri oluşturmasıdır [8,86,87].

Tashima vd. NaOH ve KOH çözeltilerini kullanarak alkali ile aktive edilmiş cam elyaf atıklarının mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemiştir. 10 mol/L

NaOH çözeltisi içeren harç numuneleri 65 °C'de üç gün süresince kür edildikten sonra en yüksek basma dayanımı 77 MPa bulunmuştur [88].

Cyr vd. cam tozları ile sentezlenen jeopolimerin davranışını etkileyen, camın tozunun yüzey alanı (1000 ila 4000 cm<sup>2</sup>/g), sıcaklık (20, 40 ve 60 °C) ve aktivatör türü (KOH, NaOH) gibi parametreleri özellikle basma dayanımları açısından değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, camın jeopolimer sentezinde kullanılabileceği, yüksek alkali içeriği sebebiyle sertleşmesi için sodyum silikat gerekmediği ve özellikle daha ince camlar (4000 cm<sup>2</sup>/g) için 40 veya 60 °C sıcaklıkta 50 MPa'dan yüksek basma dayanımı sağlandığı ifade edilmiştir [89].

### **2.2.5. Pomza ve Alkali Aktivasyonu**

Pomza gözenekli yapıya sahip, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dirençli, volkanik olaylar ile meydana gelmiş minerallerden biridir [90]. Yapısında bulunan gazların ani çıkışı ve ani soğumasıyla oluşan pomzalar sayısız makro ve mikro ölçeklerde gözenekler içerir [91]. Gözenekler arasında bağlantı bulunmayan boşluklu camı yapıdaki pomzalar hafif, ses ve ısı yalıtımı oldukça yüksektir [92]. Kimyasal yapısında %75'e kadar silis içerebilmektedir [91]. İçerdiği SiO<sub>2</sub> miktarı aşındırıcı özellik sağlarken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı ise yüksek sıcaklıklarda dayanım sağlamaktadır [91]. Silisyum, alüminyum, potasyum ve sodyum içermesi sebebiyle genellikle açık renkli görünümüne sahip olup krem, mavi, gri ve nadiren yeşil, kahverengi, siyah da olabilir [93,94]. Asidik ve bazik olmak üzere iki tür pomza oluşumu vardır [94]. Yüksek silis miktarına sahip asidik pomza inşaat sektöründe kullanılırken, bazik pomza ise içerdiği alüminyum, kalsiyum, demir ve magnezyum oranları açısından diğer endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır [94].

Alümina silikat içeren ve genellikle amorf yapıda olan malzemeler alkaliler ile aktive edilebilmektedir [95]. Pomza, silikat ve alümina bakımından zengin ve aynı zamanda düzensiz atom dizilimi sebebiyle amorf yapıya sahip, alkali aktivasyonu için uygun bir kaynak malzemedir [10].



Yadollahi vd. pomza esaslı alkali aktive harçların basma dayanımlarını değişen silika modülü (0,52, 0,6, ve 0,68), Na<sub>2</sub>O içeriği (%4, %7 ve %10) ve su/bağlayıcı oranı (0,36, 0,40 ve 0,44) parametrelerine bağlı olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, Ms=0,68, Na<sub>2</sub>O=%10 ve su/bağlayıcı=0,36 olan karışımın en yüksek basma dayanımı 40 MPa olarak ölçülmüştür. Bu çalışma için optimum kür sıcaklığı ve süresi 65 °C'de 48 saat olarak belirlenmiştir [96].

Yadollahi vd. NaOH ve sodyum silikat karışımı alkali çözeltiler ile pomzayı aktive ederek silindirik (10×20 cm) numuneler üretmişlerdir. 28 günlük sertleşmeden sonra 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basma dayanımları, ultrasonik titreşim hızı ve ısıl iletkenlikleri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda 28 günlük basma dayanımı 25 MPa'ya ulaşmıştır. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda malzemenin fiziksel özelliklerinde bozulmalar gözlemlenmiştir. Ancak pomzanın alkali aktivasyonu ile üretilen bu malzemenin inşaat sektörü ve mühendislik uygulamalarında yüksek potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir [97].

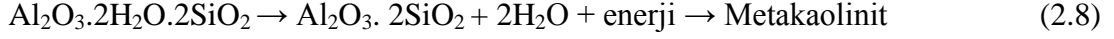
Allahverdi vd. pomzanın NaOH ve sodyum silikat birleşimi alkali aktivatörler ile alkali aktivasyon reaksiyonuna dayanan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada su-kuru bağlayıcı oranı, silika modülü ve Na<sub>2</sub>O konsantreleri farklı oranlarda tutularak basma dayanımı, işlenebilirliği ve uygunluğu araştırılmıştır. Çalışma neticesinde 28 günlük basma dayanımı 47 MPa olan numuneler elde edilmiştir [98].

### **2.2.6. Metakaolin ve Alkali Aktivasyonu**

Metakaolin; kaolin kilinin yaklaşık olarak 500-800 °C arasındaki sıcaklıkta kalsine edilmesiyle elde edilen puzolanik bir maddedir [77].

Kalsinasyon işlemi esnasında kaolinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişmeler meydana gelmektedir [2]. Söz konusu bu değişim ısıtmaya bağlı olarak ortaya çıkan dehidroksilasyondur [99]. Kil mineralleri 100 ile 250 °C sıcaklık aralığında absorbe edilmiş suyunu kaybeder [77]. Kaolin kili 500-800 °C sıcaklık aralığında dehidroksilasyon ile kimyasal bağlı suyunu kaybederek [77] alümina ve silika

tabakaların bozulması sonucu amorf yapılı oldukça reaktif olan metakaoline dönüşür (Eşitlik 2.8) [99].



Kalsinasyon sıcaklığı, metakaolinin reaktivitesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır [99]. Kaolin kili, yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında reaktifliği düşüren kristalizasyon meydana gelmektedir [77,99].

Metakaolinin kimyasal yapısı %50-55 oranında  $\text{SiO}_2$ , %40-45 oranında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ile düşük miktarlarda  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$  oksitlerinden oluşmaktadır [99].

Metakaolin beton harcına eklendiğinde, çimentonun hidrasyonu sonucu meydana gelen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girdiğinde CSH jel yapısı ve alümina içeren fazlar ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ,  $\text{C}_3\text{AH}_6$ ) oluşmaktadır [77]. Bu reaksiyon agrega ile çimento arasında bulunan ara yüzey geçiş bölgesi için önemli olmakla beraber betonun mekanik dayanımını artırmaktadır [99].

Metakaolinin betonda ilk kullanımı, 1962 yılında Brezilya'da bulunan Jupia Barajında gerçekleştirilmiştir [99]. 1980'li yıllarda metakaolinin elyaf katkılı kompozitlerde çimento matrisine eklenmesinin cam liflerini koruduğu pek çok çalışmada ifade edilmiştir [100]. 1990'lı yıllarda giderek yaygınlaşan betonda metakaolin kullanımının iyileştirilmiş sülfat direnci, alkali silika tepkimesi genişmesinin azalması, betonda çiçeklenmenin ortadan kalkması gibi bir çok olumlu etkisi olduğu kaydedilmiştir [100].

Metakaolinin beton veya harçlarda, çimento hidrasyonunu hızlandırması, puzolanik reaksiyon oluşturması ve dolgu etkisi ile boşlukları doldurması süreçlerine bağlı olarak dayanım ve durabiliteye olumlu yönde katkı sağlamaktadır [101].

Metakaolin jeopolimer üretiminde kullanılan en önemli başlangıç malzemelerinden biridir. Alkali aktivatörler ile reaksiyona girerek yüksek mukavemetli jeopolimer malzeme oluşturmaktadır [7].

Jeopolimerizasyon, alüminatlar ve silikatların oksijen atomu ile kovalent bağlı bileşik oluşturan bir reaksiyonunu içerir ve bu reaksiyon sürecinde oluşan Si-O-Al-O bağları, herhangi bir alümina silikat malzemenin, jeopolimerizasyon kaynağı olabileceğini göstermektedir [102,103]. Ancak metakaolin uygun şartlarda kalsine edildiğinde ulaşılan özel iç yapısı nedeni ile jeopolimerleşmede yüksek tepkime kabiliyetine sahiptir [7]. Aynı zamanda jeopolimer sentezi için değerlendirilen alüminasilikat malzemeler arasında metakaolin yüksek silikaya ve alüminaya sahip temel hammaddedir [104].

Metakaolinlerle yaygın olarak Si/Al oranı 2 olan polisialatsilokso (PSS) olarak bilinen jeopolimerler sentezlenir [105]. Alkali aktive edilmiş metakaolin esaslı jeopolimerin reaksiyon süreç ve performansına; katı hammaddedeki safsızlıkların varlığı, reaktivite, tepkimeye giren kimyasalların molar oranı, kalsinasyon sıcaklığı ve kür koşulları gibi faktörlerin etkisi oldukça önemlidir [106,102].

Panagiotopoulou vd. altı farklı alüminasilikat malzemenin (kaolin, metakaolin, uçucu kül, doğal puzolan, zeolit ve yüksek fırın cürufu), NaOH ve KOH alkali sıvı çözeltileri içerisinde çözünebilirlik performanslarını incelemiştir. Alkali çözelti konsantrasyonları 2,5, 5 ve 10 M ve çözünme süreleri 5,10 ve 24 saat olarak belirlenmiştir. Çalışmanın neticesinde çözünme oranının, özellikle en reaktif malzemeler söz konusu olduğunda, NaOH çözeltisi içerisinde daha yüksek olduğunu ve alüminasilikatların çözünme performansının metakaolin > zeolit > YFC > uçucu kül > doğal puzolan > kaolin sıralaması şeklinde olduğu belirtilmiştir [14].

Palomo vd. metakaolini NaOH ile aktive ederek hazırladığı numuneleri çeşitli tiplerdeki agresif sıvılara (deiyonize su, deniz suyu, sodyum sülfat çözeltisi ve sülfürik asit) batırarak, bu sıvıların numunelerde mikroyapı gelişimi ve mukavemet üzerine çok az olumsuz etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir [107].

Zhang vd. sodyum silikat ile aktive edilmiş metakaolinin jeopolimerizasyon kinetiğini, izotermal iletken kalorimetre kullanarak araştırmışlardır. Çözünebilir silikat ilavesinin etkilerini incelemek için silikat modülü 1,0, 1,2, 1,4 ve 1,6 olan sodyum silikat çözeltisini, NaOH ve su ilave ederek hazırlamışlardır. 20 ile 40 °C

sıcaklık aralığında reaksiyona giren tüm sistemler için kalorimetrik eğrilerde iki ekzotermik tepe olduğunu ve bu tepelerin sırasıyla metakaolinin çözünmesi ile düzensiz yapıya sahip jeopolimerik jellerin oluşumunu ifade ettiği belirtilmiştir. Metakaolinin jeopolimerizasyon derecesi üzerinde sıcaklık ve Si/Al oranı etkisinden daha belirgin bir etkiye sahip olan Na/Al oranı, çalışmanın en önemli sonucu olarak tespit edilmiştir [108].

Soleimani vd. metakaolin esaslı jeopolimerlerin basma dayanımı ve mikroyapı özellikleri üzerine,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  oranı (0,35-1,1) ve kalsinasyon sıcaklığının (600-900 °C) etkisini incelemiştir. Aktivatör sıvı çözeltisini, sodyum silikat ve NaOH kullanarak hazırlamışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  oranının 0,35-0,6 artan aralığında basma dayanımının arttığı, 0,6-0,85 aralığında daha fazla artış olduğu ve 0,85-1,1 aralığında artışta yavaşlama meydana gelerek sabit kaldığı, kalsinasyon sıcaklığında ise 600-700 °C aralığında basma dayanımının arttığı, 700 °C' den sonra azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. En yüksek basma dayanımı, belirlenen optimum koşullarda (700 °C kalsine sıcaklığı ve 0,6 molar  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ) 32 MPa ölçülmüştür. Aynı zamanda homojen mikroyapı ve çatlaksız numunelerin elde edildiği belirtilmiştir [109].

Bing-Hui vd. 800 °C'de 3 saat süreyle kalsine edilmiş metakaolin, NaOH ve sodyum silikat alkali aktivatörleri ile karıştırarak jeopolimer harçları hazırlamışlardır. Hazırlanan harçlar farklı kürleme sıcaklıklarına (20-100 °C) tabi tutularak, farklı kür sıcaklıklarının çözünme, polimerizasyon, yeniden çökeltme işlemleri ve basma dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kür sıcaklığının artmasının, metakaolin parçacıklarının çözünmesini ve polimerizasyonunu hızlandırdığını göstermiştir. Bununla birlikte 60 °C'nin altında hızlı sertleşme ve mekanik özelliklerinde iyileşme görülürken, 80 ve 100 °C sıcaklıklarda fiziksel özelliklerin olumsuz etkilendiği, kompakt ve sert yapı oluşumunun engellediği görülmüştür. Jeopolimer numunenin en yüksek basma dayanımı 60 °C sıcaklıkta 7 günlük kür süresi sonunda 97,95 MPa elde edilmiştir [110].

Rovnanik, metakaolin esaslı jeopolimer malzemelerin hem erken hem de son mekanik özelliklerinin kür sıcaklığı ve süresine bağlı olarak gelişim gösterdiğini

tespit etmiştir. Farklı kür sıcaklıkları (10, 20, 40, 60 ve 80 °C) uygulanan jeopolimer numunelerinin basma dayanım sonuçlarına göre, 40 °C’de 1 saat boyunca kürlenmiş numunelerin basma dayanımı 13 MPa iken, kürlenme süresi 4 saate çıkarıldığında basma dayanımının 37 MPa’ya yükseldiği ifade edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta (60 ve 80 °C), 2 veya daha fazla saat boyunca kürlenmiş numunelerin nihai basma dayanımı 3 gün içinde 50 MPa olarak tespit edilmiştir [111].

Chen vd. kür sıcaklığı ve süresinin alkali aktive edilmiş metakaolin esaslı jeopolimerin mekanik özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada, en yüksek basma dayanımını, 60 °C’de 180 saat kür koşulu altında 52,26 MPa olarak elde etmişlerdir [106]. Genel olarak, metakaolin esaslı jeopolimerlerde istenilen mekanik özelliklere 60-90 °C sıcaklık aralığında 1-24 saat kür işlemi uygulanarak ve daha sonra kür sıcaklığına yakın değerlerde kurutularak ulaşılmaktadır [105].

### **2.2.7. Kaolin ve Alkali Aktivasyonu**

Killer, belirli koşullar altında feldspatların ayrışması, volkanik kayaların çözünmesi ve değişime uğraması gibi durumların sonucunda meydana gelen alümina ve silis içeriği yüksek minerallerdir [112]. Kaolin, kil minerallerinin minerolojik olarak sınıflandırılması içinde yer alan bir grup kil mineraline verilen isimdir [113]. Feldspat ihtiva eden granitik veya volkanik kayaların fiziksel ve kimyasal etkiler ile aşınıp, bozunup, dağılıp, sürüklenmeleri sonucu kaolinit mineraline dönüşerek kaolin oluşmaktadır [113,114]. Değişikliğe uğrayan kayalar oldukları yerde kalabildikleri gibi, rüzgar ve su gibi etkenler ile sürüklenerek yer değiştirebilmektedir [114]. Kaolin olarak adlandırılan hammadde türü, sürüklenmeden olduğu yerde çöken maddelerdir [114]. Kaolinin meydana geldiği ana kayaç alüminasilikatlardan oluşmaktadır [114]. Alüminasilikatlar aşınma esnasında hidrolize olarak, alkali ve toprak alkali iyonlar çözünür tuzlar halinde uzaklaşıp Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli sulu, silikatça zenginleşen kaoliniti oluşturmaktadır [113,114]. En önemli minerali kaolinit olmakla birlikte halloysit, dikit ve nakrit minerallerini de içerebilmektedir [113]. Kaolinit, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O formülüyle gösterilmektedir [115]. Kaolinit minerali tetraeder ve oktaeder olmak üzere iki tabakadan oluşmaktadır [114]. Al<sup>+3</sup> ve OH<sup>-</sup> grubundan

oluşan oktaeder ile  $\text{SiO}_4$  grubundan oluşan tetraeder birbirine bağlanarak tabakalı yapıyı meydana getirmektedir [116].

Kaolin, temel hammadde olarak kullanıldığı kağıt, seramik, plastik, boya, cam elyaf, izolasyon, çimento, ilaç ve kozmetik, tekstil gibi geniş bir endüstriye sahiptir [113].

Kaolinit minerali jeopolimer üretiminde katı alümina silikat kaynağı olarak kullanılabilen bir başlangıç malzemesidir [7]. Kaolin, polisialat (PS) olarak bilinen jeopolimerlerin sentezlenmesinde kullanılmaktadır [105]. Kaolinin alkali sıvı çözelti içerisinde çözünmesi ile Si-OH ve Al-OH grupları oluşur ve bu gruplar arasında meydana gelen polikondensasyon reaksiyonları sonucunda polisialatlar sentezlenmektedir [105].

Davidovits, Fransa'da çıkan yangınları önlemek amacı ile yaptığı araştırmalarda kaolin (alümina kaynağı) ile NaOH kullanarak hazırladığı karışım ile ahşap yüzeyi kaplamış ve yüksek basınç altında  $150\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta preslemiştir. Kaplama üzerinde yapılan incelemelerde kısa sürede sert bir yüzey elde edildiği ve suya dayanım kazandığı gözlemlenmiştir [7].

Slatyi vd. NaOH ile kaolini aktive ederek düşük maliyetli yapı malzemeleri geliştirmişlerdir. Temel sentez ve işlem parametlerinin, basma dayanımı üzerine etkilerini incelemiştir.  $80\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 24 saat kür edilen numune için 32 MPa basma dayanımı elde edilmiştir. Elde edilen en yüksek basma dayanımının, gözenekleri dolduran ve matrisi bağlayan yeni fazların oluşumu ile doğrudan ilgili olduğu belirtilmiştir [117].

Heah vd. alkali sıvı çözeltisi ile (NaOH ve sodyum silikat) kaolinin alkali aktivasyonunu gerçekleştirerek jeopolimer üretmişlerdir. 6-14 mol/L NaOH konsantrasyonlarında,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  kütle oranı 0,24 olan alkali sıvı çözelti hazırlamışlardır. NaOH konsantrasyonunun basma dayanımına etkisini araştıran çalışmacılar en yüksek basma dayanımını 12 mol/L NaOH konsantrasyonunda hazırlanan numunelerde 5,75 MPa elde etmişlerdir [118].

Heah vd. kür sıcaklığı ve süresinin kaolin esaslı jeopolimerin mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. NaOH ve sodyum silikat kullanılarak hazırlanan alkali sıvı çözelti ile kaolin aktive edilerek, ortam sıcaklığı ve 40, 60, 80, 100 °C sıcaklıkta olmak üzere 3 gün süresince kür edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, genel olarak ortam sıcaklığında sertleşmenin mümkün olmadığıyla beraber sıcaklık artışının reaktiflerin çözünmesini ve kuvvet gelişimini desteklediği belirtilmiştir. Aynı zamanda kür süresinin uzun olmasının jeopolimerizasyon sürecini iyileştirdiğini ve yüksek mukavemet kazandırdığını gözlemlenmiştir. 60 °C’de kür edilen numunelerde, diğer numunelere göre daha fazla jeopolimerik jel oluşumu, daha yoğun ve kompakt bir yapı tespit edilmiştir [119].

Heah vd.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ve katı /sıvı oranının kaolin esaslı jeopolimerin mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Sodyum silikat ile NaOH oranı 0,16-0,36 ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  mol oranı 3,19-3,67) değişen aralığında alkali sıvı çözelti ile kaolin katı/sıvı oranları 0,60-1,20 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$  molar oranı 0,63-1,27) aralığında karıştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, katı/sıvı oranı arttıkça karışım içindeki sıvı ortama göre katı içeriğinin fazla olması, karışımı daha sert hale getirerek işlenebilirliği azalttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının artması ile karışımdaki sodyum silikat içeriğinin arttığı ve işlenebilirliğin sodyum silikatın yüksek vizkositesine bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranları sırasıyla 1,09 ve 3,58 olduğunda en yüksek basma dayanımı 6,05 MPa ile optimum sonuç elde edilmiştir [120].

Jaya vd. kaolin esaslı jeopolimer malzemelerin farklı sıcaklıklar altında mekanik özelliklerini incelemiştir. Farklı NaOH konsantrasyonları (6-12 M) ile aktive edilen kaolin karışımları 80 °C’de 24 saat kür edildikten sonra 900-1200 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, 1200 °C’ de sinterlenen numunelerde en yüksek eğilme mukavemeti 86 MPa ölçülmüştür. En yüksek mukavemete sahip numunelerin mikroyapı analizleri incelendiğinde, yüksek sıcaklıklarda konsolidasyonun arttığı ve daha yoğun bir yapı oluşumu gözlemlenmiştir [121].

### BÖLÜM 3

#### KAOLİN VE SODYUM SİLİKAT ESALİ İNORGANİK BAĞLAYICI VE POTANSİYEL UYGULAMA ALANLARI

Alkali aktive edilmiş inorganik malzemeler düşük üretim maliyeti, düşük sıcaklıklarda üretim ile sağlanan enerji tasarrufu, doğal kaynaklar ve endüstriyel atıkların kullanılması ve sera gazı emisyonlarının az olması gibi avantajları sebebiyle geniş uygulama alanlarına sahiptir [122].

Farklı başlangıç malzemeleri ve Si/Al oranları ürün özelliklerini etkileyen ve dolayısıyla uygulama alanlarını belirleyen faktörlerdir [122]. Düşük Si/Al oranlarında (1, 2, 3) polimerik yapı 3 boyutlu iken, Si/Al oranı 15'in üzerine çıktığında çizgisel ve 2 boyutlu polimerik yapı oluşmaktadır [105]. Si/Al molar oranı ile bağlantılı olarak alkali aktivasyon ile üretilen jeopolimerlerin bazı uygulamaları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı Si/Al molar oranı ile bağlantılı bazı jeopolimer uygulamaları [105].

Z= Si/Al molar oranı	Uygulamalar
Z= 1	Karolar, Tuğlalar, Seramikler, Yangından Korunma
Z= 2	Düşük CO2 salımlı çimento ve betonlar Radyoaktif ve toksik atık kapsülasyonu
Z= 3	Döküm donanımları Fiber glass kompozitler Isıya dayanımlı kompozitler Havacılıkla ilgili titanyum süreç gereçleri
Z>3	Endüstriyel dolgular/sızdırmazlar Havacılıkta spf alüminyum için gereçler
20< Z < 35	Yanmaya ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

Alkali aktivasyon ile yapılan üretimlerde, yaygın üretim yöntemi atmosfere kapalı olarak uzun bir kür sürecini takiben çatlamaları engellemek için yavaş bir kurutma

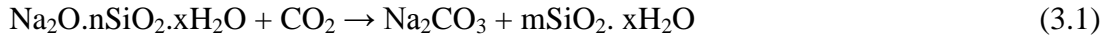


sürecini içerir [7]. Isıl işlemin üretime getirdiği zaman yükü bu prosesi bir çok uygulama için verimsiz hale getirmektedir. Twordowska vd. bu sorunu aşabilen farklı bir üretim yöntemi geliştirmiştir. Bu üretim yönteminde başlangıç malzemesi olarak çoğu jeopolimerin sentezinde kullanılan metakaolin yerine ısıl işlem görmemiş kaolini içermektedir [15]. Isıl işlem görmemiş kaolinin bünyesinde bulunan kristal suyu kaynaklı OH<sup>-</sup> moleküllerinden kondensasyon tepkimelerinde fayda sağlamak amaçlanmıştır [15]. Daha önceki yöntemlerde kaolinitin OH<sup>-</sup> moleküllerinden fayda elde etmek isteyen üretim yöntemleri kaolin NaOH'in sıcak pres altındaki üretimini içermektedir [7]. Twordowska vd. ise kaolin ve sodyum silikatu 230-260 °C sıcaklık ortamında nispeten daha kısa sürede ve diğer üretim yöntemlerinden farklı olarak atmosfere açık kalıplarda kür etmektedirler. Böylece sıcak prese ve kür sonrası ilave bir kurutma sürecine ihtiyaç kalmamaktadır. Alkali aktivasyon ile üretilen ürünlerin temel dayanım kazanma tepkimelerini sağlayan kondensasyon tepkimeleridir. Bu tepkimelerin gerçekleşebilmesi için ise yeterli seviyede hidroksitlenen yüzeylere ve sulu bir ortama ihtiyaç duyulmaktadır. Kaolinin kullanılması durumunda ise tepkimelerin kuruma sonrası taneler temas halinde iken devam etmesine neden olan kaolinin iç yapısında bulunan OH<sup>-</sup> molekülleridir. Twordowska vd. aynı üretimi kalsine edilen kaolin ile tekrarladığında daha düşük dayanım değerlerini elde etmiştir [15]. Twordowska vd. bu bağlayıcı metal dökümünde kum kalıpları özellikle sıcak kutu kalıplama sisteminde kullanmak amacıyla tasarlamıştır [15]. Bu tip bir bağlayıcının getirdiği temel avantajlar, hammaddesinin yaygınlığı, üretim sürecinin yüksek hızı, yanma dayanımı ve iyi mekanik özelliklerdir. Bu avantajlar bir inorganik bağlayıcı olarak bahsedilen karışımın dökümcülüğe ilaveten bazı diğer uygulamalar için de uygulama potansiyelini ortaya çıkarmaktadır.

### **3.1. METAL DÖKÜM UYGULAMALARI**

Döküm, ergitilmiş bir sıvı metalin bir kalıpta önceden belirlenmiş boyutta ve şekilde katılaştırılma işlemidir [123]. Dökümcülükte kullanılan en yaygın yöntem kum kalıba döküm yöntemidir [123]. Bu amaçla çoğunlukla silis kumu (SiO<sub>2</sub>) kullanılmaktadır [123]. Döküm endüstrisinde kullanılan kum kalıp ve maça sistemleri için organik veya inorganik bağlayıcılar kullanılmaktadır [123]. İnorganik

bağlayıcı olarak sodyum silikat kullanımı özellikle çok önemlidir [123]. Çünkü sodyum silikatın sertleşmesi için gereken zaman kısa olmakla beraber çevreye zararlı gaz salınımı meydana gelmemektedir [123]. Ayrıca sodyum silikat bağlayıcıları kolay uygulanabilirlik, düşük maliyet ve dehidratlaşma sertleşmesi gibi pek çok avantaja sahiptir [124]. Sodyum silikat sertleştirilmesi CO<sub>2</sub> gazı, organik ester, çeşitli toz ilaveleri, geleneksel kurutma gibi işlemlerle gerçekleştirilmektedir [124]. CO<sub>2</sub> ile sertleştirme işlemi en yaygın kullanılan yöntemdir [124]. Bağlayıcı olarak sodyum silikat içeren bir kum karışımından CO<sub>2</sub> gazının geçirilmesi durumunda sodyum silikat ve CO<sub>2</sub> arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucunda kum hızlı bir şekilde sertleşir [123].



Kullanılan sodyum silikatın Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> oranı, işlemi etkileyen en önemli faktördür [123]. Genellikle kum %3-5 aralığında sodyum silikat içermelidir [123]. Kalıplanmış kumda bazı spesifik özellikler elde etmek için talaş, demir oksit, şeker, dekstrin, kömür tozu, kaolin kili gibi katkı maddeleri eklenebilmektedir [123].

Sodyum silikat bağlayıcılarının olumlu yönlerinin yanı sıra dökümden sonra kolay dağılmama, düşük nem direnci, geri kazanımın zor olması gibi olumsuz yönleri de vardır [125,126,127]. Sertleşmeden sonra nem direnci yüksek olmadığından sodyum silikat bağlayıcılı kum, nemli bir ortamda ıslanma eğiliminde olmaktadır [127]. İyi nem direnci için sodyum silikat miktarı %4'ün altında tutulmalıdır [127]. Ancak bağlayıcının özelliklerinin de iyileştirilmesi şarttır [125]. Sodyum silikat miktarının azalmasına izin veren değiştiricilerin eklenmesiyle kum karışımının dağılma özelliği ve geri kazanılabilirliği geliştirilmektedir [125].

Jina vd. Mikrodalga ısıtma ile sertleştirilmiş sodyum silikat bağlayıcılı kumun, gerekli sodyum silikat bağlayıcı miktarını azaltma, hızlı sertleşme, yüksek oda sıcaklığı mukavemeti gibi birçok avantaja sahip olduğunu belirtmişlerdir [126]. Mikrodalga ısıtma işleminin, bağlayıcı miktarı ve harcanan enerji miktarında azalma sağlaması gibi ekonomik avantajlara sahip olması nedeniyle kullanımı giderek yaygınlaşmıştır [124]. Avantajlarının yanı sıra, mikrodalga ısıtma ile sertleştirilmiş

sodyum silikat bağı kumun nem emiliminin yüksek olması yüzey stabilitesini ve kum numunelerinin sıkıştırma mukavemetini azaltarak dezavantaj oluşturmaktadır [126].

Tworowska vd. sodyum silikat ve NaOH kullanarak hazırladığı alkali sıvı çözeltiyi hidratlanmış alüminyum silikat ile karıştırarak bir bağlayıcı sistem geliştirmişlerdir. Hidratlanmış alüminyum silikat olarak 1-2 mol hidrasyon suyu içeren, 0,5 mikrondan daha küçük tane boyutunda kaolin kullanılmıştır. Bağlayıcı sistemde,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar oranı 0,7-1,5 ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  molar oranı 0,2-0,3,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar oranı 3,5-5,8 aralığında kullanılmıştır. Bu bağlayıcı sistem, bir döküm karışımı oluşturmak üzere kum ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışım, döküm şekilleri oluşturmak için kalıplanarak 230-260 °C sıcaklıkta sertleştirilmiştir. Kaolin esaslı bu bağlayıcının, yüksek sıcaklıklarda kullanım için yeterli kuvveti hızlı bir şekilde gösterdiği ve kürlendikten 24 saat sonrada ilave kuvvet gelişimi olduğu belirlenmiştir. Söz konusu bağlayıcı sistem ile hazırlanan karışımın ısıtılana kadar polimerize olmaması yeterli çalışma süresi sağlamaktadır. Aynı zamanda nem direncinin iyi olduğu ve ticari olarak belirlenen bağlayıcı miktarlarında (%5'ten az) kullanılarak uygulama yapılabileceği tespit edilmiştir [15]. Bu tip bir bağlayıcının metal dökümlerinde sağladığı bazı avantajlar vardır. Bu avantajların ilk kısmı inorganik bir bağlayıcı olmasından dolayı üretimde sağladığı daha temiz ürün ve daha temiz üretim ortamıdır. Diğer kısmı ise kaolin ve sodyum silikat arasında gerçekleşen tepkimeler sayesinde çok daha kısa sürede yüksek dayanım kazanan ve rutubet direnci daha yüksek bir inorganik bağlayıcı elde edilmesidir [15].

### **3.2. YAPI MALZEMELERİ UYGULAMALARI**

Jeopolimer teknolojisi ile erken dayanımı yüksek, permabilitesi düşük, kimyasal ve yangın direnci yüksek çevre dostu yapı malzemeleri üretilebilmektedir [128]. Yapı malzemelerinin neden olduğu çevresel sorunların azaltılması ve sürdürülebilirlik açısından alternatif malzeme üretimi arayışları neticesinde jeopolimer esaslı çimento ve beton, tuğla gibi yapı malzemeleri geliştirilmiştir [128,129].

Kamarudin vd. alkali aktive edilmiş kaolinin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini ve farklı NaOH konsantrasyonunun (6-12 M), kaolin esaslı jeopolimer numunelerinin basma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, 12 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş numunenin en yüksek basma dayanımı 5,75 MPa elde edilmiştir [130].

Jeopolimer çimentolara agregaların ilavesiyle jeopolimer harçlar ve betonlar üretilebilmektedir [105]. Dolgu maddesi olarak düşük maliyeti nedeniyle genellikle kuvars kumu kullanılmaktadır [7].

Yapı malzemelerinin geçmişten günümüze kadar geçen sürede nasıl üretildiği ve hangi aşamalardan geçerek gelişim gösterdiği gibi pek çok sorunun cevabı yapılan arkeolojik kazılarda aranmaya çalışılmıştır [131]. Bu hususta en çok dikkat çeken yapı Mısır piramitleridir. Günümüz harçlarıyla tadilatı yapılan piramit betonları 15-20 yıl içerisinde hasara uğrayıp bozulurken, bu eski betonlar 4000 yılı aşkın süredir sert ve değişken iklim koşulları altında bozulmadan kalabilmiştir [131]. Sertleşmiş jeopolimer malzemelerin mikroyapısı Mısır' daki piramitlerin mikroyapısına oldukça benzerdir [132]. Davidovits, piramitlerin inşasında kullanılan beton blokları incelediğinde, blokların yontma taş olmadığını aslında yapıdaki fosil kabukları ile taşların (dolgu maddesi) bağlayıcı bir faz ile birbirine bağlandığını ve bu bağlayıcının jeopolimer olabileceğini öngörmüştür [132,105]. Davitovits'e göre taş bloklar olduğu yerde dökülerek üretilmiştir [132].

Jeopolimer tuğlalar, üretim süreçleri açısından geleneksel tuğlalara kıyasla enerji tasarrufu sağlayan ve düşük maliyetli yapı malzemeleridir [133]. Daha iyi performansa sahip, daha az enerji tüketen ve çevre dostu bir malzeme olan jeopolimer tuğlaların üretilmesine olanak sağlayan jeopolimer sentezi teknolojisi LTGS (Low Temperature Geopolymer Setting) olarak isimlendirilmiştir [105]. LTGS sürecinde kaolin mineraline alkali hidroksit çözeltisi (NaOH yada KOH) ilave edilerek kısmen bağlayıcı malzemeye dönüşmesi sonucunda sertleşerek suya dayanıklı seramiklere benzer özelliklere sahip malzemeler oluşmaktadır [105]. LTGS tekniğinde dolgu ile bağlayıcının karıştırılarak kullanılmasını içeren üretim tekniklerinden farklı olarak bünyesinde kaolin ve dolguları safsızlık olarak içeren

cevherin üzerine NaOH ilavesi ile karışımda kendiliğinden bağlayıcı faz meydana gelmektedir [3]. Kullanılan NaOH veya KOH ilaveleri, çözelti halinde veya başlangıç katısıyla birlikte bir katı karışım şeklinde olabilmektedir [105].

LTGS ürünlerin mekanik özellikleri kür sıcaklığına bağlı olarak farklılık göstermektedir [3]. 85 °C'ye kadar ısıtıldığında yapıda kullanılmak üzere ve suya karşı yeterli dayanım elde edilmektedir [3]. Sıcaklık 450 °C'ye çıkarıldığında geleneksel tuğlanın 1000 °C'de fırınlanması neticesinde gösterdiği dayanıma sahip olmaktadır [3]. Aynı zamanda geleneksel tuğlaya kıyasla yaklaşık 8 kat daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır [3].

LTGS jeopolimerlerin su ile temasa geçtiğinde basma dayanımlarında azalma meydana gelmesi en önemli dezavantajdır [105]. 85 °C'de üretilen LTGS jeopolimerinin basma dayanımı 12 MPa iken, 4 gün suda bekletildikten sonra 8 MPa'ya düşmektedir. Aynı şekilde 400 °C'de üretilen LTGS jeopolimerin basma dayanımı 36 MPa iken 28 MPa'ya düşmektedir [3].

LTGS tekniğinde kaolin NaOH ile aktive edilmektedir. Kaolinin düşük tepkime kabiliyeti ve sodyum silikatın tepkimelerde rol alamaması bir araya geldiğinde 2-3 güne yayılan bir üretim süreci ortaya çıkmaktadır [7]. Bu çalışmada incelenen sodyum silikat ve kaolin esaslı katkının kumlarda bağlayıcı olarak kullanımı ile çok daha kısa sürede üretilen çeşitli tipteki yapı malzemelerinin ortaya çıkabileceği düşünülmektedir.

### **3.3. YALITIM MALZEMELERİ UYGULAMALARI**

Enerji kullanımının azaltılması ve enerjinin etkin olarak kullanılması için özellikle ısı enerji kaybının en çok olduğu binalardaki ısı yalıtım malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesi ve alternatif yeni malzemeler geliştirilmesi gerekmektedir [11]. Isı yalıtım uygulamalarında yanıcı olmayan, kolay uygulanabilen ve maliyeti düşük malzemeler tercih edilmektedir [134]. Bu amaçla hafifliği, yangına dayanıklılığı, uzun süre stabil kalabilme gibi ses ve ısı yalıtım özellikleri sebebiyle “perlit” yaygın kullanıma sahiptir [11].

Perlit ısıtıldığında genişerek hafif ve gözenekli hale geçebilen, asidik özelliğe sahip volkanik bir kayadır [11]. 750-1100 °C aralığında bir sıcaklığa ısıtıldığında içerdiği kristal suyunu buharlaşma ile kaybeder. Bu esnada perlit taneciklerinin mısır patlağına benzer şekilde hacmi 5-30 kat artar [135]. Elde edilen genişmiş perlitin içerisinde bulunan sonsuz hava kabarcıkları, hafiflik ve ısı yalıtım özelliği kazandırmaktadır [135]. Genleşmiş perlit %71-75 SiO<sub>2</sub>, %12,5-18 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve düşük miktarlarda CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O bileşenlerine sahiptir [11]. Üstün özellikleri sebebiyle ısı yalıtım malzemesi olarak kullanıldığı gibi yüksek performanslı betonlarda bağlayıcılık özelliği gösteren puzolanik malzemelerle de birlikte kullanılabilir [134].

Vaou vd. jeopolimer sentezi ile ham perlit esaslı, köpüklü ısı yalıtım malzemeleri üretmişlerdir. Ham perlit, katı NaOH'un deiyonize su içerisinde çözündürülmesiyle elde edilen NaOH çözeltisi ile aktive edilmiştir. Elde edilen alkali aktive malzemenin köpükleştirilmesi için hidrojen peroksit ilave edilmiştir. Bu çalışmanın sonucuna göre, ısı iletim katsayısı 0,03 W/m.K, basınç dayanımı 780 kPa'da %2 deformasyon, %100 yanmaz bir malzeme geliştirdiklerini bildirmişlerdir. Aynı zamanda sadece binaların ısı yalıtımı için değil, yüksek sıcaklıkların (maks. 700 °C) meydana geldiği endüstriyel uygulamalar içinde kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir [136].

Erdoğan vd. perlit, alkali aktivatörler ile karıştırarak jeopolimer sentezinde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve NaOH kullanılmıştır. Perlitin doğal bir puzolan olması sebebiyle jeopolimer sentezinde kullanılmasının hem çevresel hem de ekonomik avantajlara sahip olduğu ifade edilmiştir. Öğütülmüş olarak kullanılan perlitin inceliği, reaksiyonların hızını ve gelişimini etkilediği ve perlit esaslı jeopolimerlerin priz süresinin kütleme koşuluna, sıcaklığa ve neme bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca NaOH'un tek başına kullanılmasının yüksek mukavemet sonuçları vermediği, sodyum silikat ve NaOH'un birlikte ya da sadece sodyum silikatın kullanılmasıyla yüksek mukavemet sonuçları elde edildiği belirtilmiştir. Isıl işlem fırınında kürlenmiş numunelerde, yaklaşık 100 °C sıcaklığında yüksek basma ve eğilme dayanımı sağladığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda perlit esaslı jeopolimerin kendine ve diğer plastik olmayan yüzeylere yapışabilme özelliğinin iyi olduğu gözlemlenmiştir [137].

Arifuzzaman vd. genleşmiş perlit ve sodyum silikat kullanarak yalıtım malzemesi geliştirmişlerdir. İşlem basamakları; sodyum silikat bağlayıcı maddenin seyreltilmesi, bağlayıcı ve perlitin karıştırılması, ıslak karışımın flotasyonu, kalıplama ve sıkıştırma aşamaları ile gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma kuvvetleri ve yoğunluğu, sıkıştırma oranı ve bağlayıcı içeriği ile optimize edildiği belirtilmiştir. Çalışmanın sonucuna göre artan sıkıştırma kuvvetiyle beraber yoğunluğunda arttığı gözlemlenmiştir. 0,3 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk, 1 MPa basma dayanımı elde edilmiştir [138].

Genleştirilmiş perlit ve vermikülit gibi gözenekli mineral esaslı dolguların inorganik bağlayıcılar ile bağlanması (levha ya da kalıplanmış hacimsel şekiller) ile üretilen yanma dayanımlı yalıtım malzemelerinin tamamının geleneksel sodyum silikat esaslı bağlayıcılara üstünlüğü nedeni ile bu çalışmada incelenen kaolin ve sodyum silikat esaslı bağlayıcı ile üretim potansiyeli mevcuttur.

### **3.4. REFRAKTERİK YAPIŞTIRICI UYGULAMALARI**

Çeşitli endüstriyel uygulamalar için yüksek sıcaklıkta çalışabilen refrakterik yapıştırıcılara ihtiyaç vardır. Seramik yapıştırıcılar, iyi mekanik dayanım ve yüksek sıcaklık kararlılığı gibi özelliklere sahiptir ve bu sayede yüksek teknoloji uygulamaları için uygun hale gelmektedir [139]. Bununla birlikte, daha yüksek gözeneklilik ve istenenden daha düşük kırılma tokluğu, seramik yapıştırıcıların sınırlamalarından bazılarıdır [139]. Dolayısıyla bu alandaki son çalışmalar daha sert ve daha güvenilir seramik yapıştırıcı malzemelerinin geliştirilmesine yöneliktir [139].

Kelley, silisyum karbür takviyeli yüksek sıcaklığa dayanıklı bir seramik yapıştırıcısı geliştirmiştir. Bu seramik yapıştırıcı bir metal oksit (MgO) ve sudaki alkali silikat (sodyum silikat) karışımından oluşan bir seramik matris ve seramik matris içerisinde dağılmış silisyum karbür (SiC) viskerlerinden oluşmaktadır. Kullanılan MgO tozu katkılı yapıştırıcı “ceramabond 571” ticari ünvanına sahiptir. Çalışmada, MgO tozu ve SiC viskerleri öğütücü bir değirmende karıştırılarak bir toz karışım haline getirildikten sonra sodyum silikat ilave edilmiştir. SiC viskerlerinin matris içerisinde

dağılmasının yapışkanın mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği tespit edilmiştir. Geliştirilen seramik yapıştırıcısının, geleneksel yapıştırıcılara kıyasla, istenilen termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı ( $10\mu\text{m}.\text{°K}$ ) ve mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık ortamlarında, yüksek sıcaklık kaynaklı zorlayıcı koşullarda seramik esaslı güçlü bir yapıştırıcıya ihtiyaç vardır. Bahsedilen çalışmada geliştirilen bu seramik yapıştırıcının, bu koşullarda mekanik ve termal olarak kararlı ve bir çok yapıştırma işlemi için yeterli olduğu belirtilmiştir. [139]. Bu tip bir bağlayıcının maliyet açısından üretimindeki en pahalı bileşen SiC viskerleridir. Bu viskerlerin mekanik özellikleri geliştirmedeki fiziksel rolünü hem sodyum silikata iyi bir kimyasal tutunma sağlayan hem de fiziksel olarak tane boyutu küçük bir dolgu olarak karışıma yayılan kaolinin kısmen üstlenebileceği öngörülmektedir. Bu durumda bazı uygulamalar için yeterli olan dayanım kaolin ile sağlanarak maliyette önemli bir düşüş elde edilebilir. Kaolinin sodyum silikat bağlayıcısının eğme dayanımını belirgin olarak iyileştirdiğini rapor eden Twordowska vd. 'nin buluşları bu yaklaşımı desteklemektedir [15].



## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1. MALZEME

Çalışmada yüksek saflıkta kaolin kullanılmıştır. Kullanılan kaoline ait kimyasal analiz Çizelge 1 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kaolinin kimyasal analizi (%).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diğerleri	Kızdırma Kaybı
45,1	38,1	4,52	12

Çalışmada kullanılan kaolinin XRD analizinde sadece kaolinit mineraline ait pikler tespit edilmiştir. Çalışmada %27 SiO<sub>2</sub>, %8 Na<sub>2</sub>O ve %65 H<sub>2</sub>O kimyasal bileşimime sahip Merck marka sodyum silikat çözeltisi ve Merck marka kütlece %99 saflıktaki katı NaOH peletleri kullanılmıştır. Dolgu malzemesi olarak iki farklı ortalama tane boyutuna sahip silis kumu kullanılmıştır. Bunlardan biri CEN standart kumdur. Bu kumun kimyasal özellikleri ve tane boyut dağılımı, ilgili standartta verilmiştir [140,141]. Bu kum çalışmada standart kum olarak kodlanmıştır. Daha ince tane boyutlarının etkisinin araştırılması amacı ile tane boyutları 125-710 µm arasında olan %98,8 SiO<sub>2</sub> içeriğine sahip ve ortalama 369,5 µm, tane boyutuna sahip ikinci bir kum daha kullanılmıştır. Bu kum çalışmada ince kum olarak kodlanmıştır. Çalışmada bileşime bağlı olarak su ilave edilmesi gerektiğinde distile su kullanılmıştır.

#### 4.2. YÖNTEM

Hedeflenen bileşimleri sağlayacak miktarda sodyum silikat çözeltisi, NaOH katı peletleri ve gerektiğinde ilave distile su buharlaşmayı önlemek için kapalı bir şişe içerisinde karıştırılarak çözelti hazırlanmıştır. Ekzotermik tepkimeden dolayı

çözeltinin aşırı ısınmasını engellemek için çözünmenin gerçekleştiği şişe, su dolu cam kap içerisinde soğuyana dek bekletilmiştir. Elde edilen çözelti tepkimelerin dengeye gelmesi için iki saat süre ile dinlendirilmiştir. Üretilen çözelti öncelikle bileşime uygun miktardaki kum ile 120 saniye boyunca elektrikli mikser kullanılarak karıştırılmıştır. Meydana gelen karışıma takiben kaolin tozları ilave edilmiş ve 120 saniye süre ile karıştırma uygulanmıştır. Elde edilen karışım her bir gözü 50×50×50 mm ebatlarındaki üç gözlü çelik kalıplarda el ile kalıba yerleştirerek kalıplanmıştır. Kullanılan çelik kalıbın fotoğrafı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Numune şekillendirmede kullanılan çelik kalıp.

Kalıplar daha sonra açılmış ve kalıplanan malzeme tüm yanal yüzeyleri açık şekilde çelik plaka üzerinde 200 °C-320 °C sıcaklıkları arasında altı farklı sıcaklıkta bir saat süre ile ısıtılma işlemi alınmıştır. Numunelere ısıtılma işlemi uygulanırken, ısıtılma işlemi fırınları numune yerleştirilmeden önce hedef sıcaklığa çıkarılmış ve numuneler doğrudan bu sıcaklıkta yerleştirilmiştir. 240 °C sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklar için numunelerde aşırı genleşme kaynaklı olarak gözlenen deformasyonu önlemek için 30 dakika 240 °C sıcaklıkta maruz bırakılan numuneler takiben 20 °C/dak hızla hedef sıcaklığa çıkarılmış ve bu şekilde bir 30 dakika daha bekletilmiştir. XRD, FTIR ve DTA-TG analizleri için hazırlanan numunelerde kum dolgusu kullanılmamıştır. Çalışmada hazırlanan karışımların bileşimleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Çalışmada üretilen numunelerin bileşimleri ve üretim parametreleri (serilerde değişimi izlenen parametre gri renk ile belirtilmiştir).

Numune No	OKSİTLERİN MOLAR ORANLARI			ÜRETİM DEĞİŞKENLERİ		
	Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bağlayıcı/kum oranı (%)	Sıcaklık	Dolgu Türü
1	0,7	4	24	20	240	Standart Kum
2	0,85	4	24	20	240	Standart Kum
3	1	4	24	20	240	Standart Kum
4	1,15	4	24	20	240	Standart Kum
5	1,3	4	24	20	240	Standart Kum
6	1,45	4	24	20	240	Standart Kum
7	1	3	24	20	240	Standart Kum
8	1	3,5	24	20	240	Standart Kum
9	1	4	24	20	240	Standart Kum
10	1	4,5	24	20	240	Standart Kum
11	1	5	24	20	240	Standart Kum
12	1	5,5	24	20	240	Standart Kum
13	1	5	24	20	240	Standart Kum
14	1	5	26	20	240	Standart Kum
15	1	5	28	20	240	Standart Kum
16	1	5	30	20	240	Standart Kum
17	1	5	32	20	240	Standart Kum
18	1	5	34	20	240	Standart Kum
19	1	5	30	20	200	Standart Kum
20	1	5	30	20	240	Standart Kum
21	1	5	30	20	260	Standart Kum
22	1	5	30	20	280	Standart Kum
23	1	5	30	20	300	Standart Kum
24	1	5	30	20	320	Standart Kum
25	1	5	30	2,5	300	Standart Kum
26	1	5	30	5	300	Standart Kum
27	1	5	30	10	300	Standart Kum
28	1	5	30	20	300	Standart Kum
29	1	5	30	30	300	Standart Kum
30	1	5	30	40	300	Standart Kum
31	1	5	30	2,5	300	İnce Kum
32	1	5	30	5	300	İnce Kum
33	1	5	30	10	300	İnce Kum
34	1	5	30	20	300	İnce Kum
35	1	5	30	30	300	İnce Kum
36	1	5	30	40	300	İnce Kum

Reçetelere uygun olarak üretilen numunelerin üzerinde uygulanan basma dayanımı testleri Zwick/Roell 600 kN universal mekanik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Basma testi uygulanan numuneler 50×50×50 mm'lik ebatlara sahip küplerdir. Deney uygulama hızı 1mm/dakikadır.

Numunelerin faz yapısını inceleme amacı ile XRD analizi yapılmıştır. Kullanılan XRD cihazının markası Rigaku'dur. XRD analizleri 5-70 ° çekim aralığında 5°/dak hızında yapılmıştır.

Numunelerin termal analizi Hitachi STA 7300 DTA-TG cihazında yapılmıştır. DTA-TG analizi oda sıcaklığı ile 700 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır. Isıtma hızı dakikada 5 °C'dir.

Numunelerin bağ yapısı Bruker marka FTIR cihazı ile incelenmiştir. Yapılan ölçüm aralığı 400-4000 cm<sup>-1</sup>'dir.

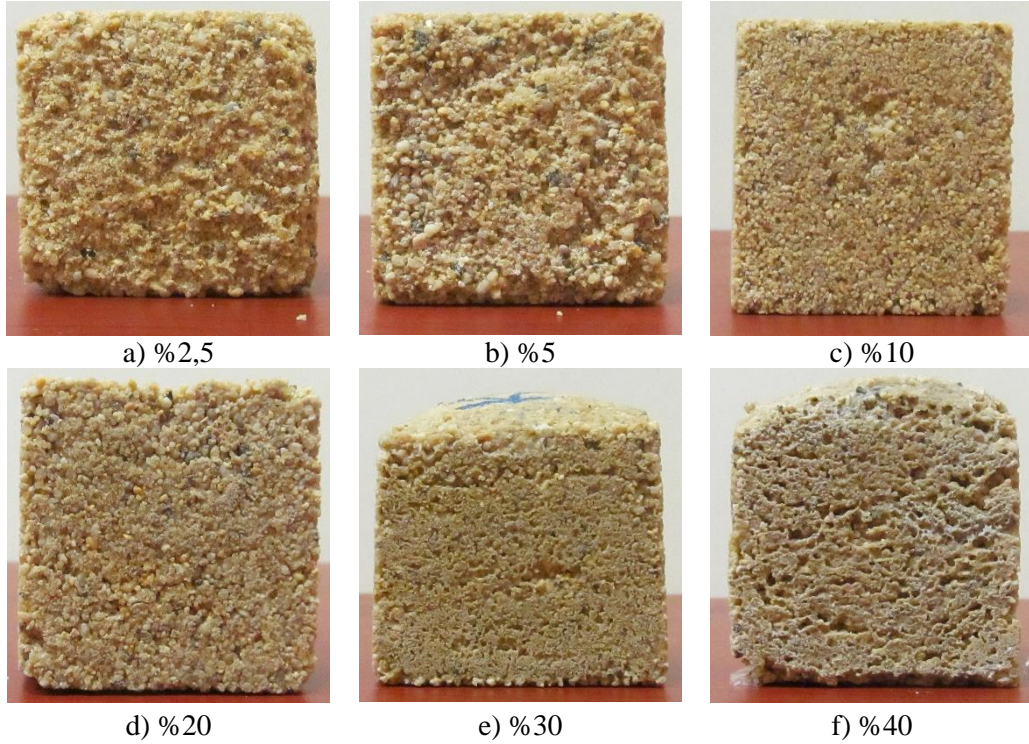
Numunelerin mikroyapısal incelemeleri Carl Zeiss Gemini marka taramalı elektron mikroskopunda yapılmıştır. Numunelerin yüzeyleri elektriksel iletken olmadığından altın kaplanarak incelemeler gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 5.1. GÖRSEL İNCELEMELER

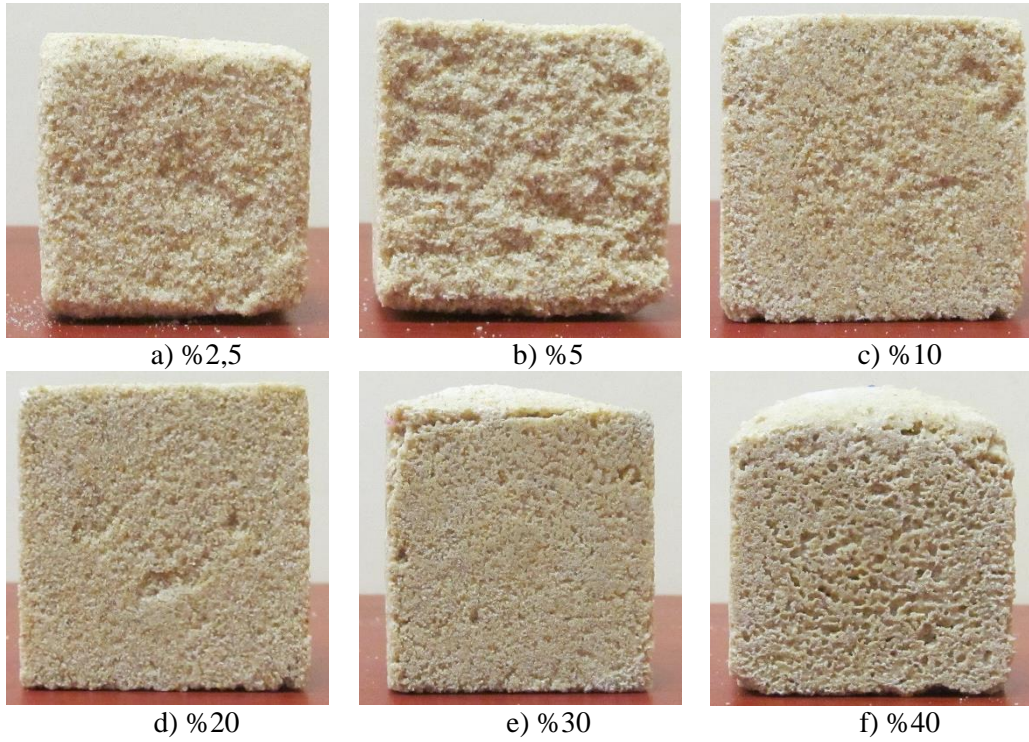
Numunelerin görünüşleri üzerinde bağlayıcı kimyasal bileşiminin belirgin bir etkisi olmamıştır. Şekil 5.1’de standart kum kullanılarak farklı bağlayıcı oranları ile üretilen numunelerin fotoğrafları verilmiştir. %2,5 bağlayıcı oranı ile üretilen numunenin zayıf ve dokunulduğunda dağılma eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.1a). %20 bağlayıcı oranı dahil olmak üzere artan bağlayıcı oranı ile birlikte bütünselliğini koruyan daha mukavim bir yapı meydana gelmiştir. Ancak %30 ve %40 bağlayıcı oranlarında üretilen numuneler incelendiğinde genişleme ve köpüklemeye bağlı olarak deformasyon oluşmuştur (Şekil 5.1e,f).



Şekil 5.1. Standart kum kullanılarak optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin fotoğrafları.

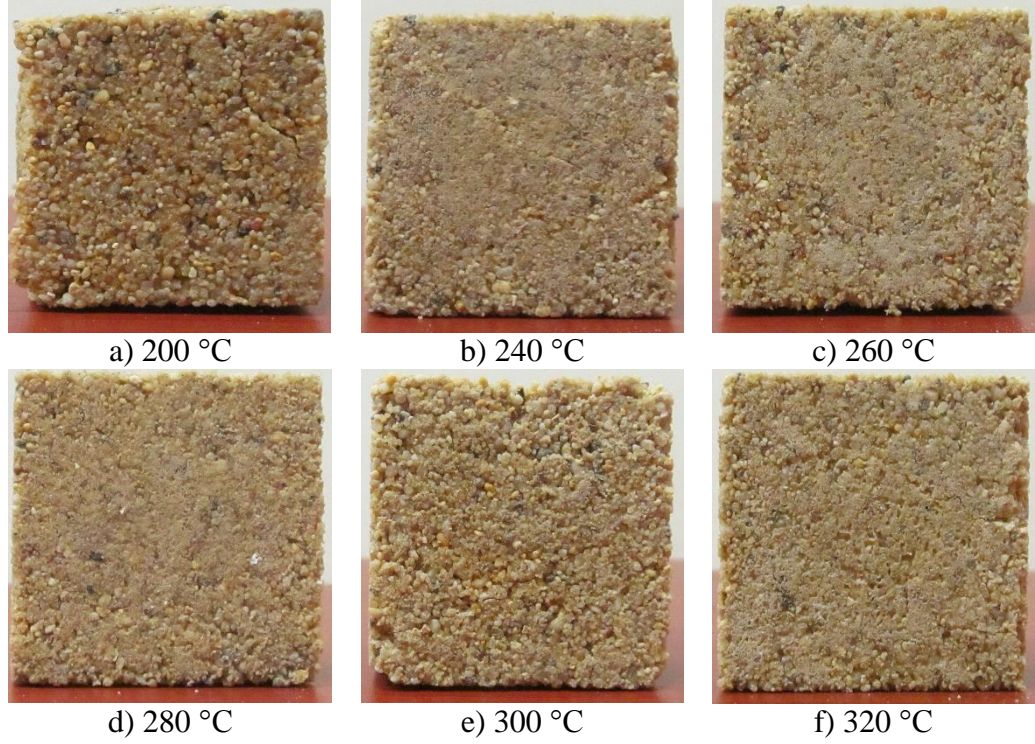


Şekil 5.2’de ince kum kullanılarak farklı bağlayıcı oranları ile üretilen numunelerin fotoğrafları verilmiştir. %2,5 bağlayıcı oranında ince kum numuneleri standart kum dolgulu numunelerden daha zayıf olarak gözlenmiştir (Şekil 5.2a). Bu durum ince kum tanelerinin artan yüzey alanları için daha fazla bağlayıcı miktarına ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. %20 bağlayıcı oranında deformasyon olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 5.2d). Fakat %30 ve %40 bağlayıcı oranı ile üretilen numunelerde genişlemeye bağlı deformasyonun meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.2e,f).



Şekil 5.2. İnce kum kullanılarak optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin fotoğrafları.

Şekil 5.3’de standart kum kullanılarak farklı sıcaklıklarda üretilmiş numunelerin fotoğrafları verilmiştir. 200 °C sıcaklıkta üretilen numunede kuruma gerçekleşmiştir fakat bağlanmanın gevşek olduğu görülmüştür (Şekil 5.3a). 240 °C sıcaklıktan itibaren gevşeklik kaybolarak daha mukavim bağlanma gözlenmiştir. Genel olarak artan sıcaklıkta numunelerde görsel olarak belirgin bir değişim görülmemiştir.



Şekil 5.3. Standart kum kullanılarak farklı sıcaklıklar ile üretilen optimum bileşimdeki numunelerin fotoğrafları.

## 5.2. BASMA DAYANIMI TESTİ SONUÇLARI

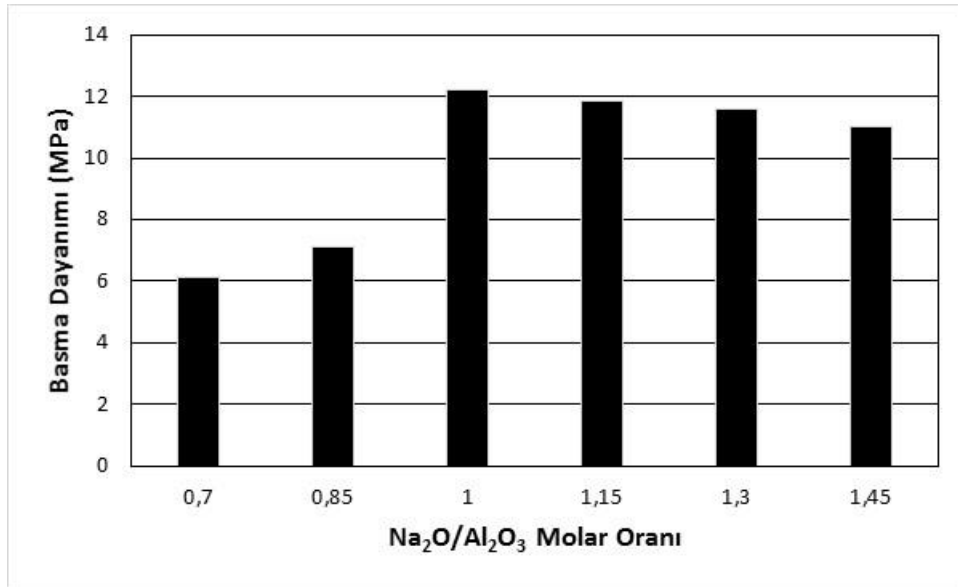
Şekil 5.4'te farklı  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarında kütlece %20 bağlayıcı içeren ve 240 °C'de üretilen numunelerin basma dayanımı değerleri verilmiştir.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı 0,7'den 0,85'e çıkarıldığında basma dayanımında düşük miktarda artış meydana gelirken, bu oran 0,85'den 1'e çıkarıldığında basma dayanımı belirgin bir şekilde artmıştır. Daha yüksek  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarında ise basma dayanımı düşük miktarlarda azalma göstermiştir.

Davidovits, metakaolin esaslı jeopolimerlerde  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranının 1'e yakın olması gerektiğini rapor etmiştir. Aynı zamanda 1,2'den daha yüksek alkali içeriğinin ise mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini belirtmiştir [5].

Heah vd. sodyum silikat çözeltisi ile aktive ettikleri ve buharlaşmaya kapalı ortamda üç gün boyunca 80 °C'de kür ettikleri kaolin esaslı jeopolimerlerden  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$

oranı 1,58 olan numunede en yüksek basma dayanımı elde etmişlerdir.  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriğinin kaolinin çözünürlüğünü geliştirdiği belirtilmiştir [118].

Bu çalışmada ise, kaolin oldukça farklı bir kür metodu ile alkali aktive edilebildiğinden, metakaolin esaslı jeopolimerlere benzer olarak  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı 1 olduğunda en yüksek basma dayanımı vermiştir. Bu durumun kaolin esaslı jeopolimerler üzerine yapılan önceki çalışmalardan [118] buharlaşmaya açık ve yüksek sıcaklıkta kür işlemi nedeni ile daha farklı çözünme ve kondensasyon tepkimeleri parametrelerinin bu çalışmadaki numunelerde etkin olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

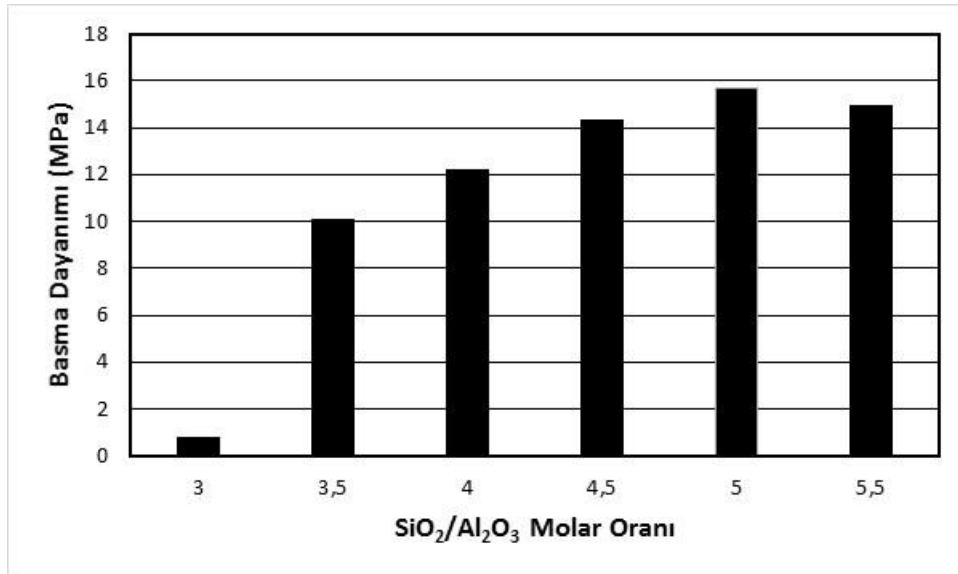


Şekil 5.4. Farklı  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarına sahip 240 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin basma dayanımları.

Şekil 5.5’de farklı  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarına sahip kütlece %20 bağlayıcı içeren ve 240 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin basma dayanımları verilmiştir.  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı 3 olan numune düşük basma dayanımı gösterirken bu oran 3,5 olduğunda belirgin bir artış tespit edilmiştir. Basma dayanımındaki artış  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı 3,5-5 aralığında iken devam etmiştir. Daha yüksek  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarında ise basma dayanımında azalma meydana gelmiştir.



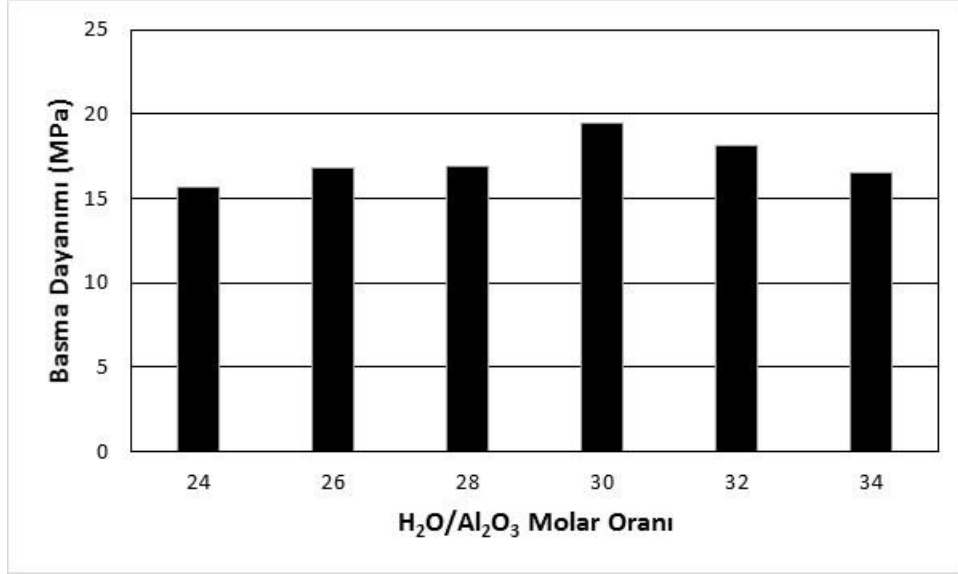
Davidovits, metakaolin esaslı jeopolimerlerde  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranını 3,5-4,5 aralığında olması gerektiğini rapor etmiştir. Bununla birlikte,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranının 3,5'dan düşük olduğu durumlarda alüminasilikat malzemenin tepkimeye tam olarak giremediği belirtilmiştir. Hui vd. 60 °C sıcaklıkta 7 gün kür süresi sonunda,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı 3 olan metakaolin esaslı jeopolimer numunesinde en yüksek basma dayanımını elde etmişlerdir [110]. Duxson vd. metakaolin esaslı jeopolimer numunelerinde en yüksek basma dayanımını 1,9 oranında elde etmişlerdir [142]. Bahsedilen çalışmaların başlangıç malzemelerindeki ve üretim parametrelerindeki bazı farklılıklar aynı neticelerin elde edilememesine neden olmuştur. Bu çalışmada üretilen inorganik reçinenin klasik olarak bilinen kaolin ve metakaolin esaslı jeopolimerlerden belirgin olarak farklı olduğunun göstergesi, daha yüksek  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarındaki numunelerde daha yüksek basma dayanımı elde edilmesidir.



Şekil 5.5. Farklı  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarına sahip 240 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin basma dayanımları.

Şekil 5.6'de farklı  $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarına sahip kütlece %20 bağlayıcı içeren ve 240 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin basma dayanımları verilmiştir. Belirli bir alt sınırın üzerinde, artan su oranı çimento, gibi inorganik bağlayıcılarda tepkimeye giren ürünlerin birbirinden uzaklaşmasını sağlayarak son ürünün mekanik dayanımını azaltmaktadır [6].  $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı yüksek olduğunda, jeopolimer

malzemenin gözenek hacmi ve boyutunda artma meydana gelmektedir [143]. Karışımındaki su, alüminasilikat kaynağının çözünmesinde ve polikondensasyon esnasında önemli etkiye sahiptir [144]. Kani vd. farklı  $H_2O/Al_2O_3$  oranlarına sahip pomza esaslı jeopolimer numunelerinin, 25 °C’de %95 bağıl neme sahip ortamda kür edildikten sonra mekanik özelliklerini incelediklerinde, artan  $H_2O/Al_2O_3$  oranının basınç dayanımını azalttığı ve priz süresini arttırdığını tespit etmişlerdir [144]. Metakaolin esaslı jeopolimerlerde benzer şekilde artan su katkısı ile basma dayanımının düştüğü rapor edilmiştir [145]. Optimum  $H_2O/Al_2O_3$  oranının bilinen diğer jeopolimerlerden [5,7] farklı olarak bu çalışmadaki bağlayıcıda oldukça yüksek olmasının nedenlerinden birinin, üretilen inorganik reçinelerin buharlaşmaya açık bir kür sürecine tabi tutulması olduğu düşünülmektedir. Kurutma ile gerçekleşen bu kür sürecinde, mevcut su buharlaştıkça bağlayıcı faz küçülerek tepken maddeleri birbirine yaklaştırmaktadır. Bilinen atmosfere kapalı kür yönteminde ise, reaksiyona girmeden kalan su yapı içerisine hapsolmakta ve bir miktar küçülmeyle beraber kurutma sonrası yerini hava boşluğuna bırakmaktadır. Bu durum atmosfere açık kürün fazla suyun olumsuz etkisini bertaraf etmesine neden olmaktadır. Optimum su oranının yüksek çıkmasındaki bir diğer nedenin, yüksek su oranının sağladığı artan akışkanlık ve artan işlenebilirlik ile bağlayıcının kumları daha etkin ve homojen bir şekilde kaplayabilmesi olduğu düşünülmektedir. Yüksek su oranına sahip olan bu çalışmadaki reçinenin kaolin esaslı diğer jeopolimer reçinelerden farklı olarak daha yüksek işlenebilirliğe sahip olması daha fazla dolguyu kabul eden karışımlar üretmeye imkan vermesi açısından üretimde maliyet ve çevreci üretim gibi avantajlar sağlamaktadır.

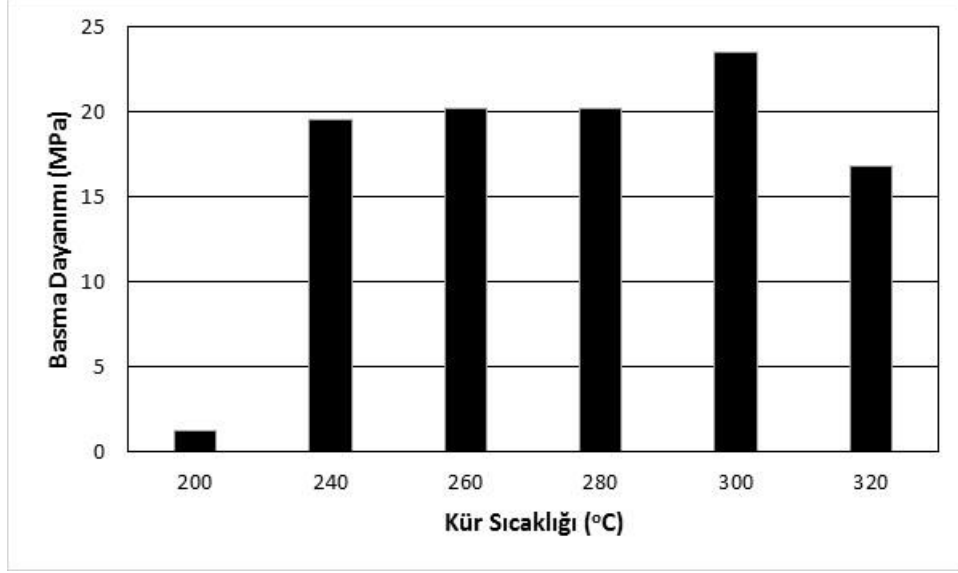


Şekil 5.6. Farklı H<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranlarına sahip 240 °C sıcaklıkta üretilen numunelerin basma dayanımları.

Numune bileşimleri üzerine yapılan basma dayanımı testleri neticesinde optimum bağlayıcı bileşiminin Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=1, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=5 ve H<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=30 molar oranları olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.7’de farklı sıcaklıklarda üretilen optimum kompozisyona sahip numunelerin basma dayanımları verilmiştir. 200 °C sıcaklıkta ısıl işlem gören numune oldukça düşük dayanım göstermiştir (1,29 MPa). 240 °C sıcaklık numunenin önemli oranda dayanım kazanmasına neden olmuştur. 240 °C sıcaklıkta yapılan ısıl işlem sonrasında basma dayanımı 19,5 MPa değerine ulaşmıştır. Bu artış 240 °C sıcaklığın bu bağlayıcıda meydana gelen tepkime için bir dönüm noktası olduğuna işaret etmektedir. 240-320 °C sıcaklık aralığında numunelerin basma dayanımı değerleri yakın olmakla birlikte en yüksek basma dayanımı 300 °C sıcaklıkta üretilen numunelerde 23,48 MPa olarak ölçülmüştür. 320 °C sıcaklıkta üretilen numunelerde gözlenen mukavemet düşüşü artan sıcaklıkla beraber numunede meydana gelen sıcaklık artışından kaynaklanan muhtemel bir tahribatın ilk göstergesi olarak kabul edilebilir. Artan sıcaklıkla 300 °C’ye kadar kondensasyon tepkimelerinde artış yaşandığı için dayanım artmaktadır. Alkali aktive malzemelerde 700 °C’ye kadar artan sıcaklıkla beraber kademeli olarak dehidroksilasyon ve dehidratasyon kaynaklı kütle kaybı olduğu bilinmektedir [146]. Bu çalışmada 320 °C’de meydana gelen

mukavemet kaybının yapıdan ani uzaklaşan su nedeniyle numunede oluşan tahribattan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.7. Farklı sıcaklıklarda üretilen optimum bileşimdeki numunelerin basma dayanımları.

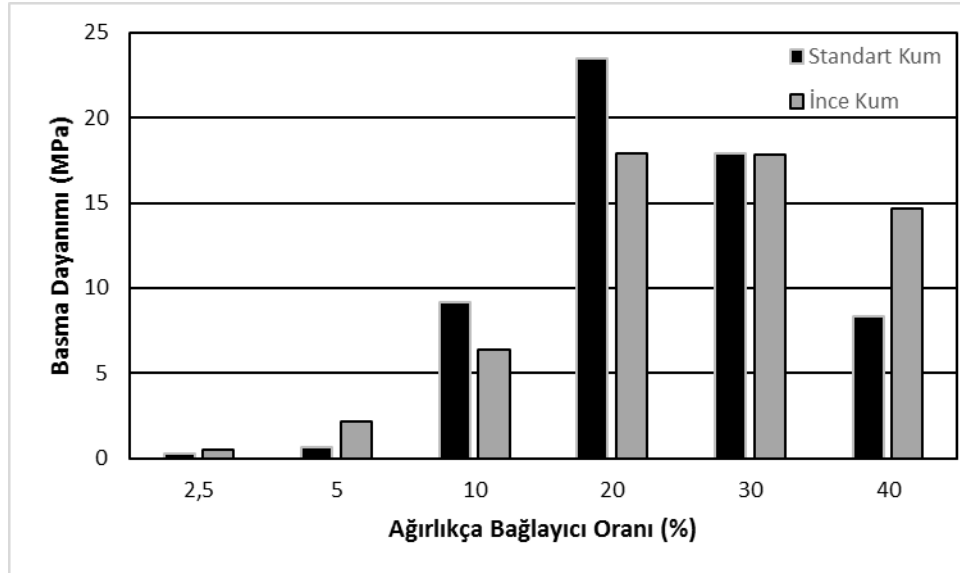
Şekil 5.8’de farklı bağlayıcı oranları ve farklı tane boyutunda dolgu içeren ve 300 °C sıcaklıkta üretilen optimum kompozisyona sahip numunelerin basma dayanımları verilmiştir. İnce kumun yüzey alanının artması, agrega yüzeyi başına daha çok bağlayıcı ihtiyacı doğurmaktadır [147]. %2,5 ve %5 bağlayıcı oranlarında hem standart kum hem de ince kum dolgulu numuneler düşük basma dayanımı göstermiştir. %2,5 ve %5 bağlayıcı oranında her iki tane boyut dağılımındaki kumlar için de bağlayıcının kum tanelerinin yüzeyini kaplamaya yetmediği dayanım değerlerinden anlaşılmaktadır. Her iki kum beraber incelendiğinde %20 bağlayıcı oranına dek artan bağlayıcı oranı ile birlikte basma dayanımı kademeli olarak artmış ve daha sonra tekrar düşmeye başlamıştır.

Steinerova [148], metakaolin esaslı jeopolimer malzemenin mekanik özellikleri üzerine, ağırlıkça %0-93 aralığında kum ilavesinin etkisini incelemiştir. Başlangıçta %0-34 aralığındaki kum ilavesinde, düşük kum konsantrasyonu ile yüksek bağlayıcı miktarı ve tanecikler arasındaki mesafenin uzak olması nedeniyle düşük basma dayanımı gözlemlenmiştir. %34-60 aralığında ise tanecikler arası mesafe kısalmaya

başlayarak basma dayanımının arttığı aynı zamanda çatlaklar meydana geldiği ve en yüksek dayanımın ağırlıkça %78 kum ilavesinde çatlama olmadan elde edildiği belirtilmiştir. Kum agregalarının maksimum yoğunlaştırılması ve jeopolimer jel ile tamamen kaplanması koşuluyla malzemenin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Kum ilave miktarı %78'in üzerinde artmaya devam ettiğinde bağlayıcı miktarında oluşan yetersizliğin gözenek oluşumunu arttırdığı ve basma dayanımında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir [148].

Bhowmick vd. daha yüksek kum içeriğine sahip uçucu kül esaslı jeopolimer harçlarda, jeopolimerizasyon sırasında oluşan jel miktarının gevrek agregaları bağlamak için yeterli olmayacağını ve sıkıştırma mukavemetinde azalma gözlemlediklerini belirtmişlerdir [149].

Bahsedilen çalışmalara benzer olarak kütlece %20 bağlayıcının, bu çalışmada üretilen tipteki bağlayıcılar için hem ince hem de standart kum olarak kodlanmış dolgu için mekanik özellikler açısından en uygun miktar olduğu söylenebilir.



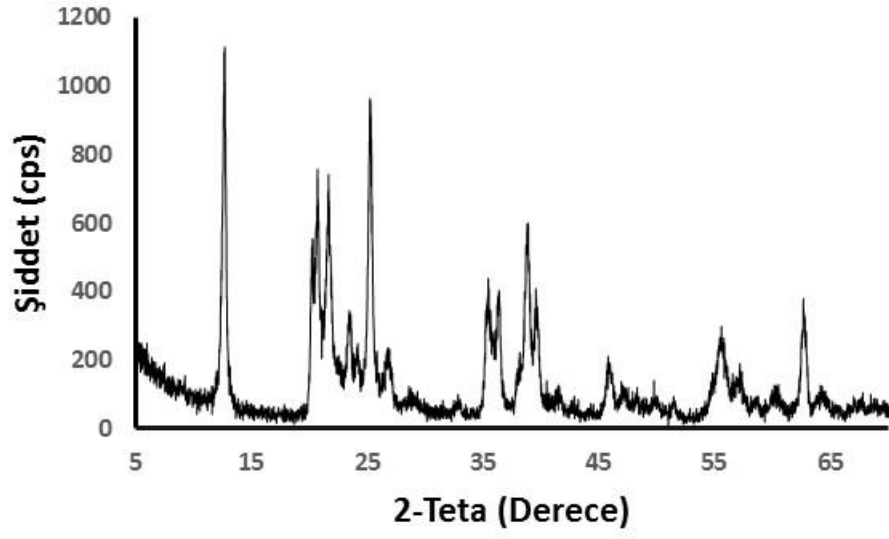
Şekil 5.8. Farklı bağlayıcı oranlarına sahip 300 °C sıcaklıkta üretilen optimum bileşimdeki numunelerin basma dayanımları.

### 5.3. XRD ANALİZİ SONUÇLARI

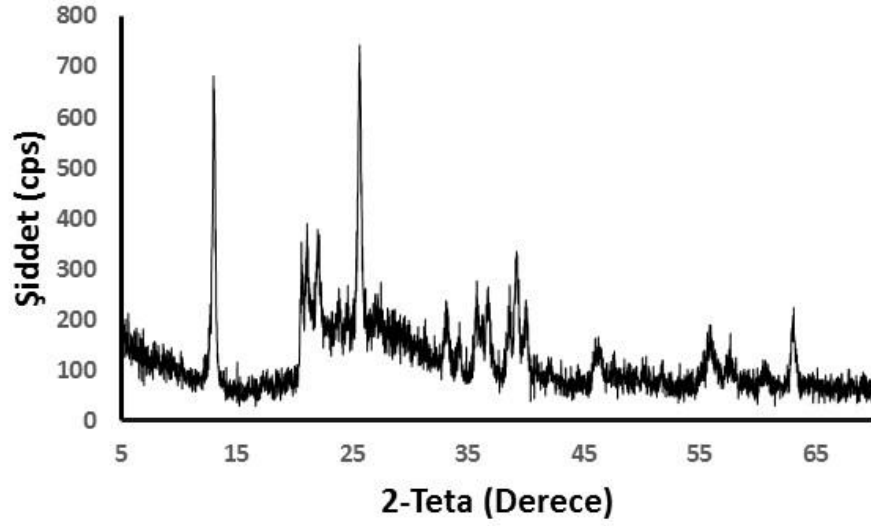
Kaolin ve farklı sıcaklıklarda üretilen optimum bileşimdeki numunelere ait XRD grafikleri Şekil 5.9'da verilmiştir. Kaolin cevherinde, sadece kaolinit pikleri belirlenmiştir (Şekil 5.9a). Bağlayıcı faz yapısında, kaolinin kristal yapısına ilaveten amorf bir fazın varlığı tespit edilmiştir (Şekil 5.9b-g). Sadece NaOH ile aktive edilen kaolin esaslı jeopolimerlerin zeolitik fazlar içerdiği bilinmektedir [150]. Bu çalışmada elde edilen numunelerde ise kaolinit ve amorf faz gözlenmiştir (Şekil 5.9b-g).

Zhang vd. NaOH ve sodyum silikat alkali sıvı çözeltilerinin metakaolin esaslı jeopolimerlerde kristal faz oluşumu üzerine etkilerini incelemiştir. Sadece NaOH ile aktive edilen metakaolin esaslı jeopolimerde kristalin fazların meydana geldiğini ve NaOH içeriğinin fazların doğasını, miktarını ve kristalleşme hızını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Sodyum silikat aktivatörü ilave edilerek, NaOH içeriğine sahip örneklerle karşılaştırılmıştır ve düşük miktarlarda bile sodyum silikat ilavesinin kristalleşmeyi baskıladığı gözlemlenmiştir. Bu örneklerde faz yapının %100'e yakın amorf olduğu tespit edilmiştir [151].

Bu çalışmada üretilen reçinede de sodyum silikat kullanımını nedeni ile amorf fazın gözlemlendiği düşünülmektedir. Artan sıcaklık ile birlikte numunelerde amorflaşmanın arttığı 320 °C sıcaklığa maruz kalan numunede kristalliğin belirgin olarak azalmasıyla anlaşılmaktadır (Şekil 5.9g).

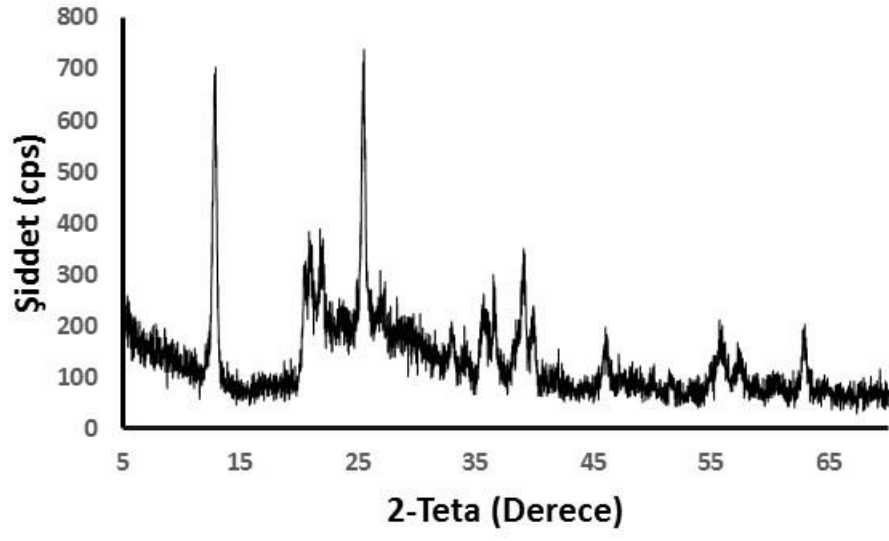


(a)

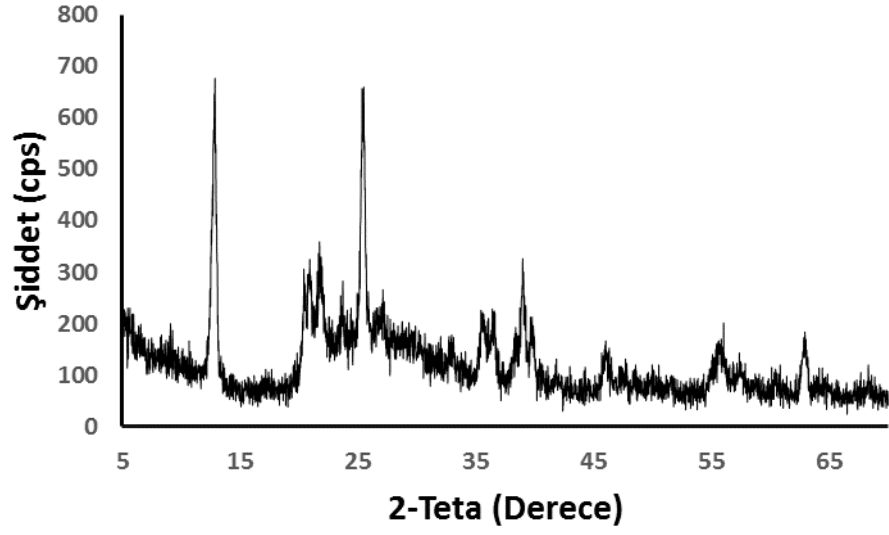


(b)

Şekil 5.9. Farklı sıcaklıklarda üretilen optimum bileşimdeki numunelerin XRD paternleri; a) Kaolin, b) 200 °C, c) 240 °C, d) 260 °C, e) 280 °C, f) 300 °C, g) 320 °C.



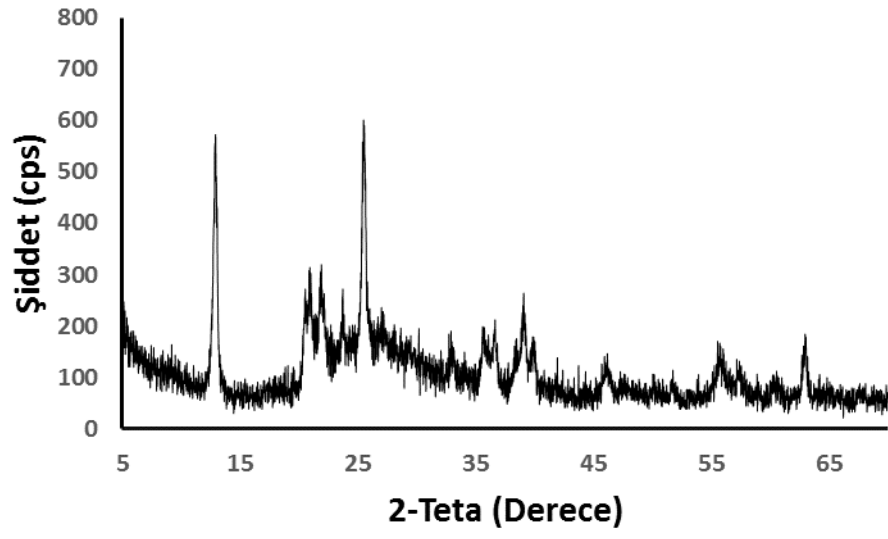
(c)



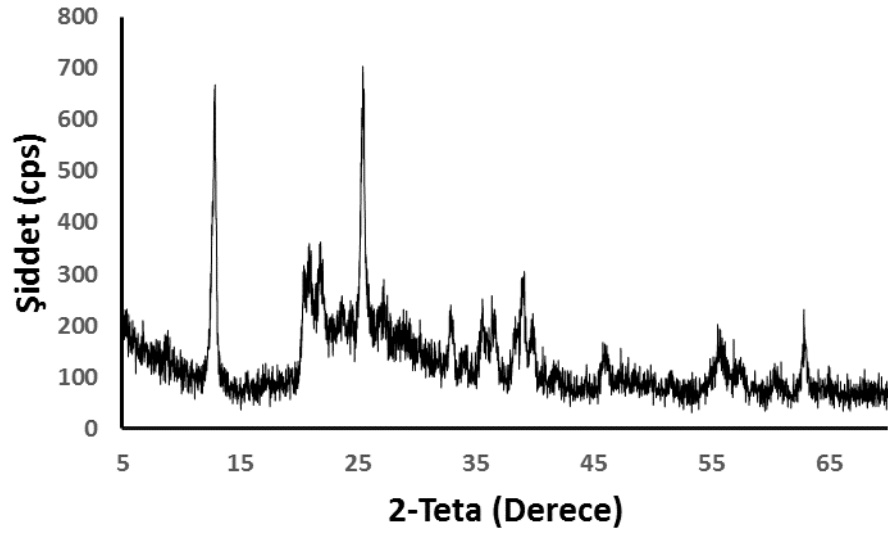
(d)

Şekil 5.9. (devam ediyor).



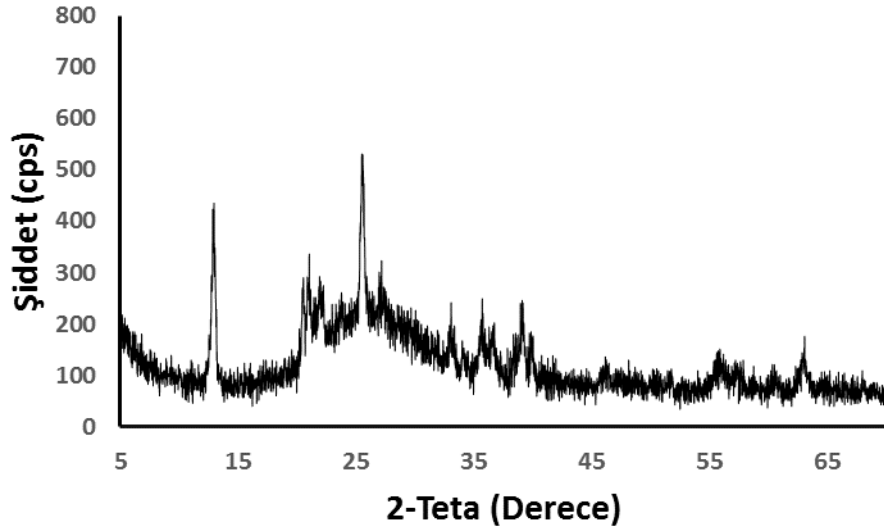


(e)



(f)

Şekil 5.9. (devam ediyor).

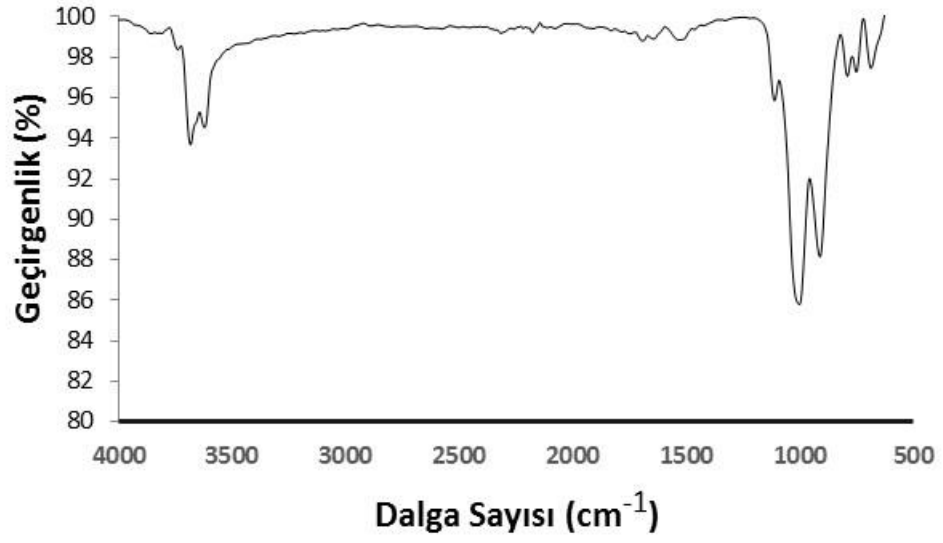


(g)

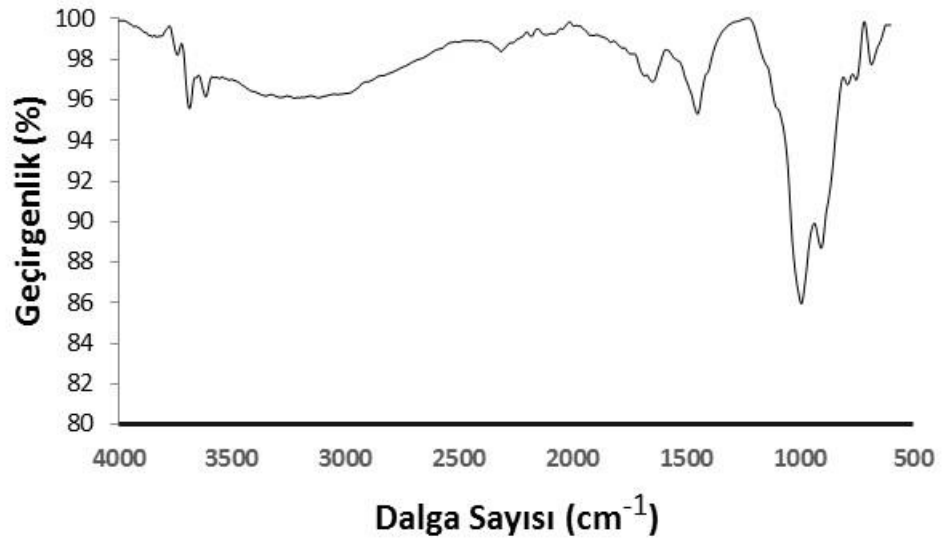
Şekil 5.9. (devam ediyor).

#### 5.4. FTIR ANALİZİ SONUÇLARI

Şekil 5.10'da kaolinin ve farklı sıcaklıklarda üretilen numunelerin FTIR spektrumları verilmiştir. Şekil 5.10a'da verilen kaolinin FTIR spektrumunda gözlenen  $791\text{ cm}^{-1}$ ,  $913\text{ cm}^{-1}$ ,  $1008\text{ cm}^{-1}$  ve  $1111\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısındaki pikler sırasıyla Al-O, Al-OH ve Si-O bağlarına işaret etmektedir [152,153].  $3621\text{ cm}^{-1}$  ve  $3682\text{ cm}^{-1}$ 'deki pikler OH<sup>-</sup> moleküllerinden kaynaklanmaktadır [153]. Alkali aktive edilen numunelerin FTIR spektrumunda artan sıcaklık ile beraber kaolinde gözlenen ve Al-OH bağlarından kaynaklanan  $913\text{ cm}^{-1}$ 'deki pikin şiddetinin zayıfladığı görülmektedir (Şekil 5.10b-g). Alkali aktive edilen numunelerde  $1454\text{ cm}^{-1}$  civarında gözlenen pik  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  oluşumundan kaynaklanmaktadır [154]. Bu pik numunelerin üretim sıcaklığı arttıkça zayıflamıştır. Benzer olarak  $2315\text{ cm}^{-1}$  civarında gözlenen pik karbonasyona işaret ettiği rapor edilmiştir [155]. OH<sup>-</sup> moleküllerinden kaynaklanan ve tüm numunelerde  $3600\text{ cm}^{-1}$  civarında gözlenen pik artan üretim sıcaklığı ile beraber şiddetini azaltmıştır.

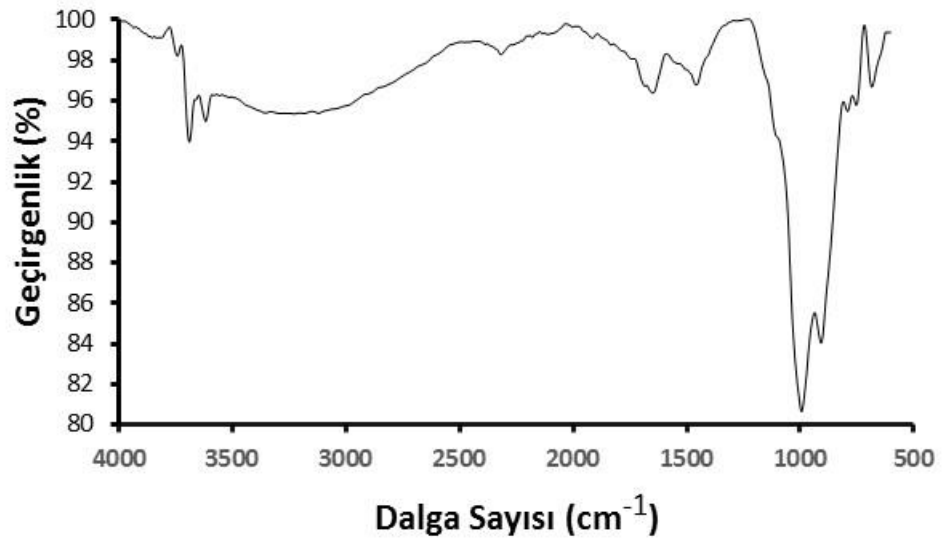


(a)

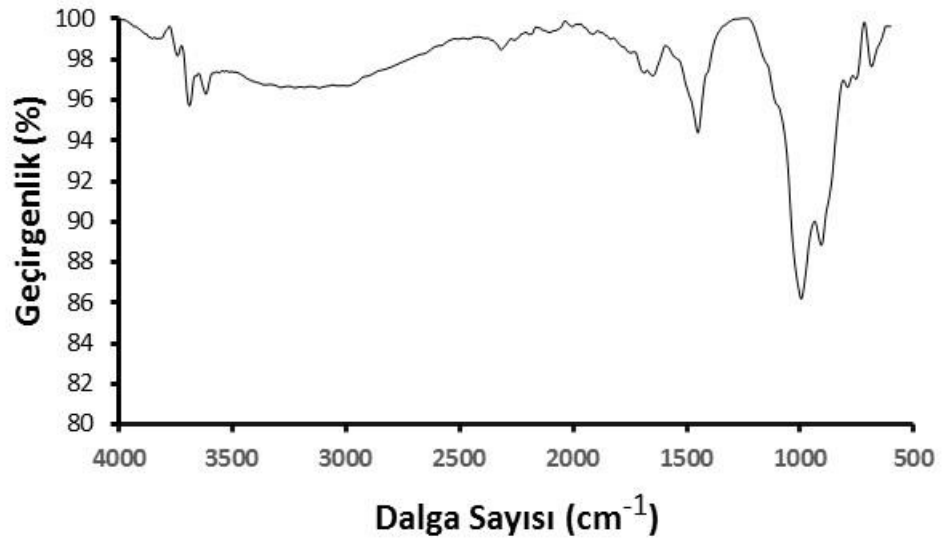


(b)

Şekil 5.10. Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem gören optimum bileşimdeki numunelere ait FTIR spektrumları; a) Kaolin, b) 200 °C, c) 240 °C, d) 260 °C, e) 280 °C, f) 300 °C, g) 320 °C.

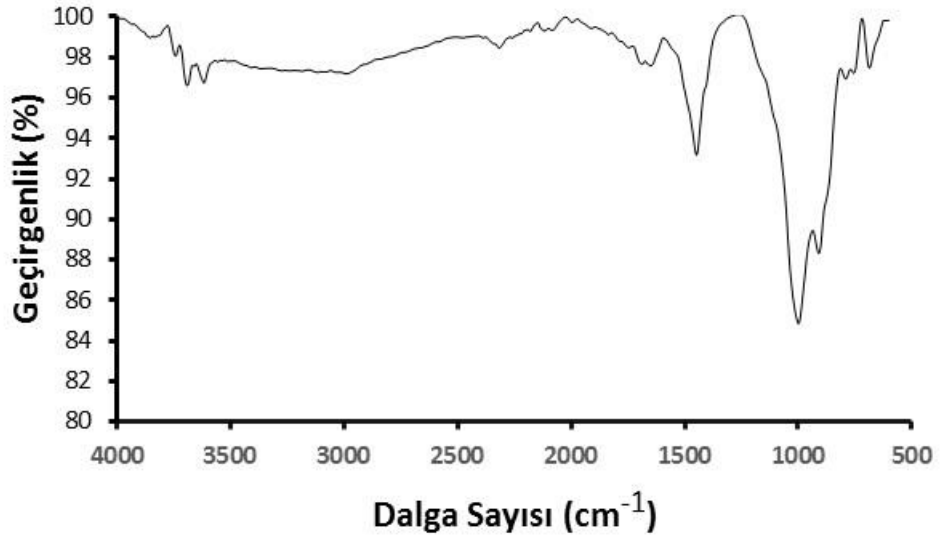


(c)

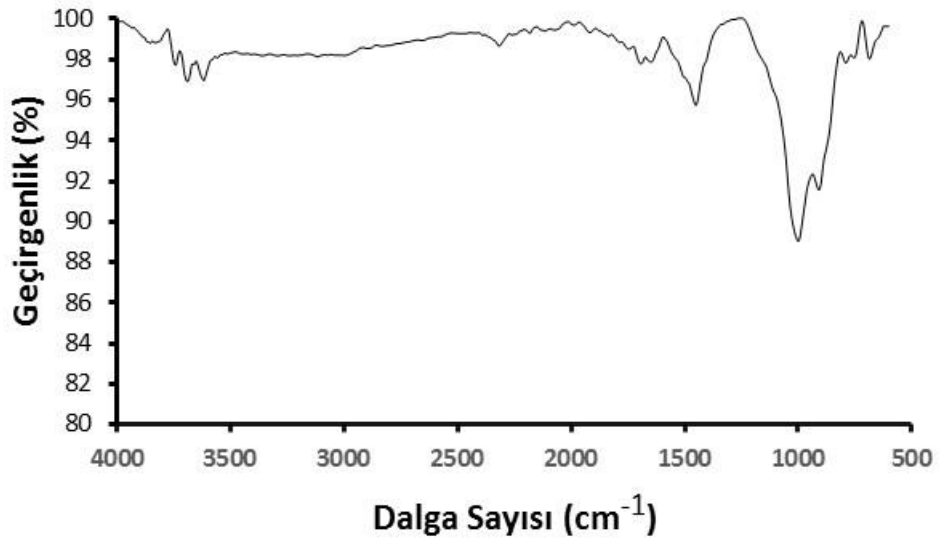


(d)

Şekil 5.10. (devam ediyor).

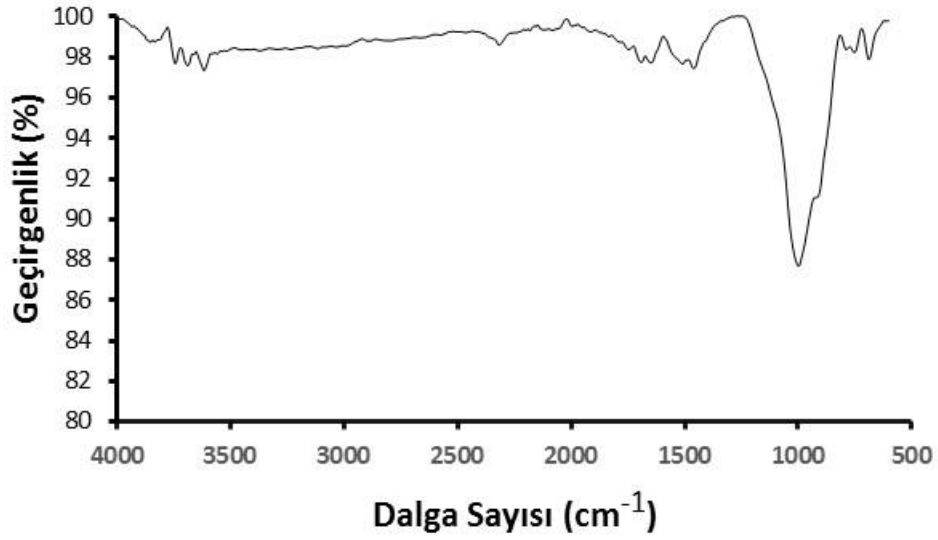


(e)



(f)

Şekil 5.10. (devam ediyor).

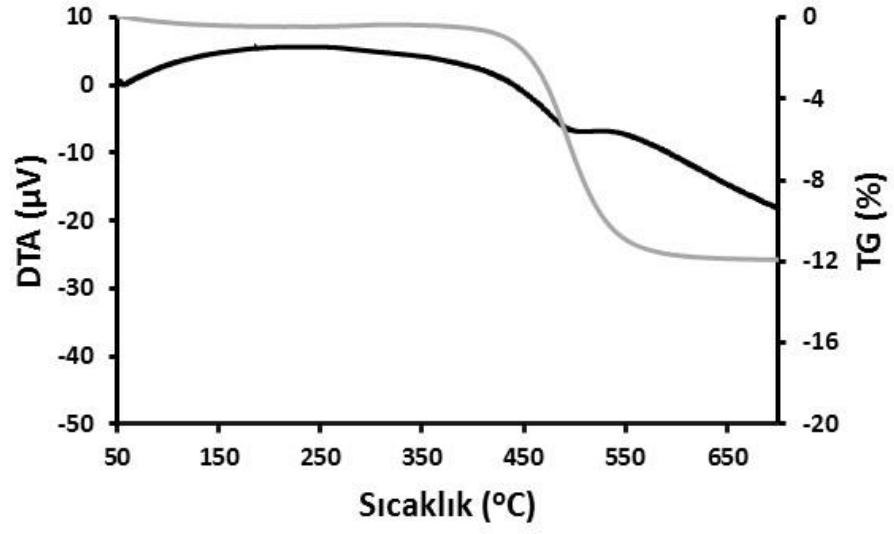


(g)

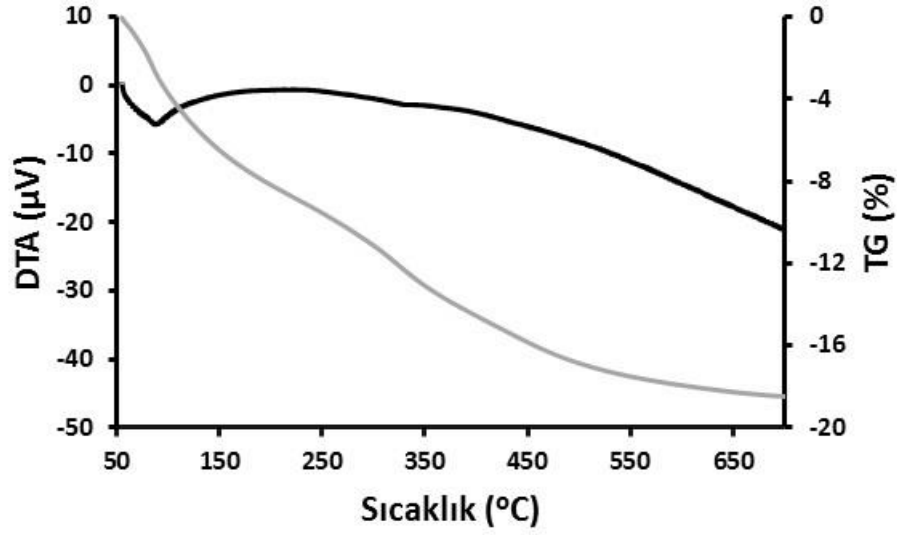
Şekil 5.10. (devam ediyor).

## 5.5. DTA-TG ANALİZİ SONUÇLARI

Kaolin ve farklı sıcaklıklarda üretilen optimum bileşimdeki numunelere ait DTA-TG grafikleri Şekil 5.11’de verilmiştir. 450-550 °C sıcaklık aralığında kaolinin DTA-TG eğrisinde endotermik tepkime olarak gözlemlenen, kaolinin karakteristik dehidroksilasyonu tepkimesi neticesinde kaolinde %11,9 kütle kaybı görülmüştür (Şekil 5.11a). 200 °C sıcaklıkta sentezlenen numunede 87 °C sıcaklıkta endotermik bir tepkime ile dehidratasyon tepkimesi gözlenmiştir (Şekil 5.11b). Bu numune 700 °C sıcaklıkta toplamda %18’lik bir kütle kaybı göstermiştir (Şekil 5.11b). 240 °C sıcaklıkta ısı işlem gören numunede 80 °C sıcaklıktaki endotermik tepkime ile başlayan kütle kaybı 700 °C sıcaklıkta %18 değerine ulaşmıştır (Şekil 5.11c). 260 °C sıcaklıkta ısı işlem gören numunede 83 °C sıcaklıktaki endotermik tepkime ile kütle kaybı %18 değerine ulaşmıştır (Şekil 5.11d). 280 °C sıcaklıkta ısı işlem gören numunede endotermik pik 83 °C sıcaklık civarında gözlenmiştir ve 700 °C sıcaklıkta kütle kaybı %16 olarak ölçülmüştür (Şekil 5.11e). 300 °C sıcaklıkta ısı işlem gören numunede 81 °C sıcaklıkta endotermik ile başlayan kütle kaybı 700 °C sıcaklıkta %16 değerine ulaşmıştır (Şekil 5.11f). 320 °C sıcaklıkta ısı işlem gören numunede 77 °C sıcaklıkta endotermik tepkime ile birlikte %10 luk kütle kaybı gözlenmiştir (Şekil 5.11g).

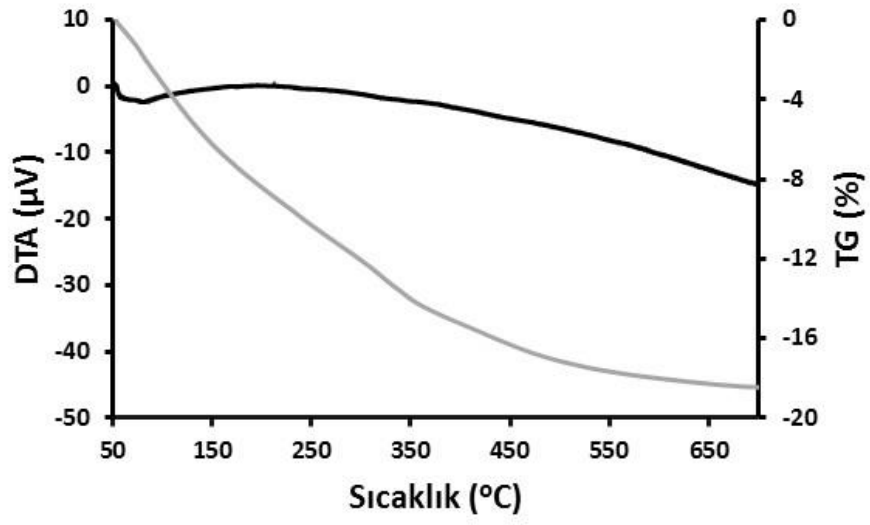


(a)

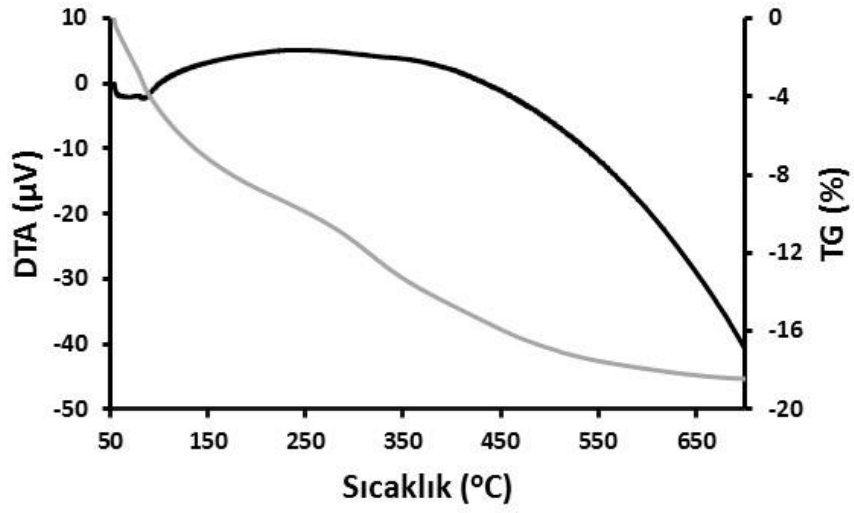


(b)

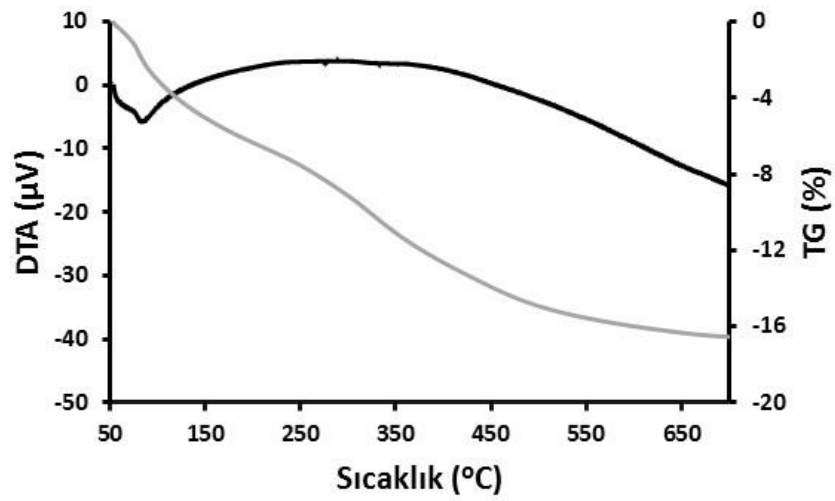
Şekil 5.11. Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem gören optimum bileşimdeki numunelerin DTA-TG eğrileri; a) Kaolin, b) 200 °C, c) 240 °C, d) 260 °C, e) 280 °C, f) 300 °C, g) 320 °C.



(c)



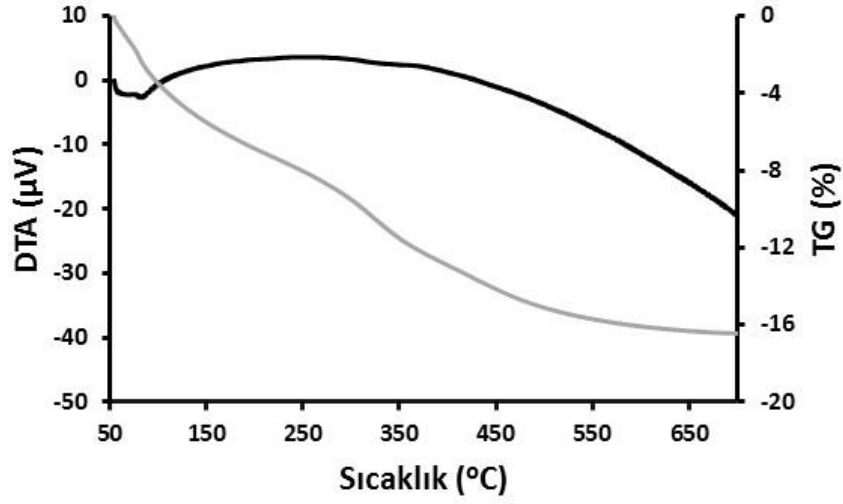
(d)



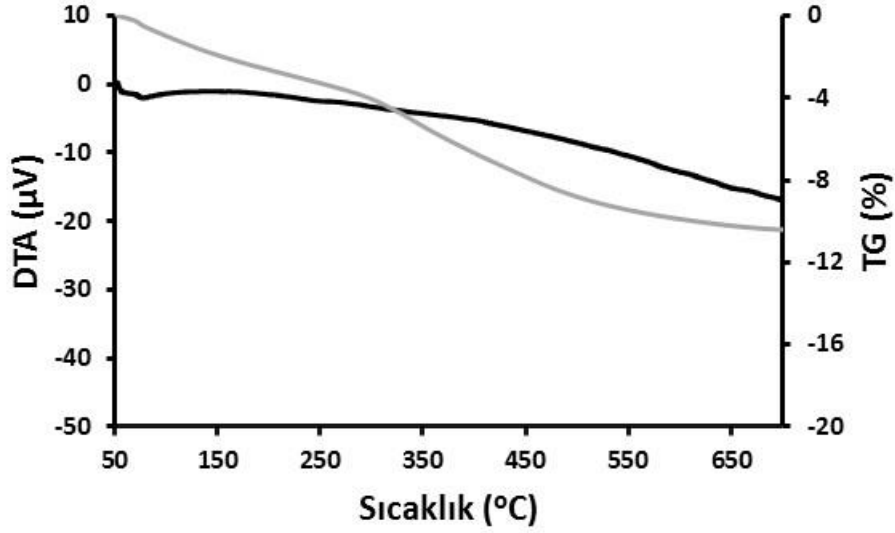
(e)

Şekil 5.11. (devam ediyor).





(f)



(g)

Şekil 5.11. (devam ediyor).

Jeopolimer malzemelerde 450 °C sıcaklık altında zeolitik su çıkışı gözleendiği önceki çalışmalardan bilinmektedir [7]. 450 °C sıcaklık sonrasında jeopolimerlerden dehidroksilasyon kaynaklı su çıkışları gerçekleşmektedir [7]. Çizelge 5.2’de 450 °C öncesi ve sonrasında meydana gelen kütle kayıpları verilmiştir. Numunelerin 450 °C sıcaklık sonrasında gözlenen kütle kaybı değerlerinde (dehidroksilasyon) üretim sıcaklığının belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmektedir. Numunelerin artan üretim sıcaklığı ile birlikte 450 °C sıcaklık öncesinde zeolitik su çıkışında kademeli olarak azalma görülmektedir.

Çizelge 5.1. Farklı sıcaklık aralıklarında numunelerde görülen kütle kayıpları (%).

Numunelerin Üretim Sıcaklığı	Farklı Sıcaklık Aralıklarındaki Kütle Kayıpları (%)		Toplam Kütle Kaybı
	Oda sıcaklığı-450°C	450-700 °C	
Kaolin	% 1,64	% 10,26	% 11,9
200 °C	% 15,84	% 2,64	% 18,48
240 °C	% 16,31	% 2,15	% 18,46
260 °C	% 15,91	% 2,53	% 18,44
280 °C	% 13,92	% 2,63	% 16,55
300 °C	% 14,15	% 2,3	% 16,45
320 °C	% 7,83	% 2,65	% 10,48

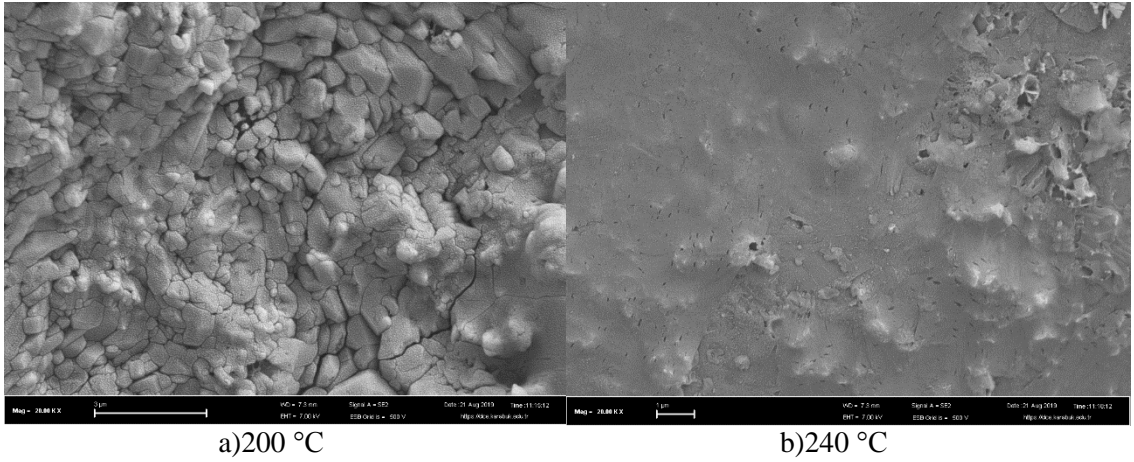
Çizelge 5.2’de numunelerin üretim sıcaklıklarına kadar gerçekleşen kütle kayıp yüzdeleri verilmiştir. Kaolin esaslı jeopolimerlerde, ısıtım işlem sonrasında higroskopik yapı nedeni ile atmosferden su çekerek yeniden kısmi hidratlaşmanın gerçekleşmesi görülmektedir [3,7]. Bu çalışmada üretilen kaolin esaslı inorganik bağlayıcının benzer bir şekilde yeniden hidratlanma gösterdiği görülmektedir. Numunelerin üretim sıcaklığı 320 °C’ye ulaşana dek rehidratlaşma eğiliminde önemli bir değişim gözlenmez iken, 320 °C sıcaklıkta rehidratasyon belirgin olarak azalmıştır. İnorganik bağlayıcıların bu özelliği yapı malzemelerinde iklim kontrolü uygulamaları için olumlu olmaktadır [3]. Yeniden hidratlaşma metal döküm uygulamalarında ise olumsuz bir eğilimdir. Rehidratasyonun azalması için 320 °C sıcaklıkta üretim bazı uygulamalar için tercih edilebilir.

Çizelge 5.2. Numunelerin üretim sıcaklıklarına kadar gerçekleşen kütle kaybı (%).

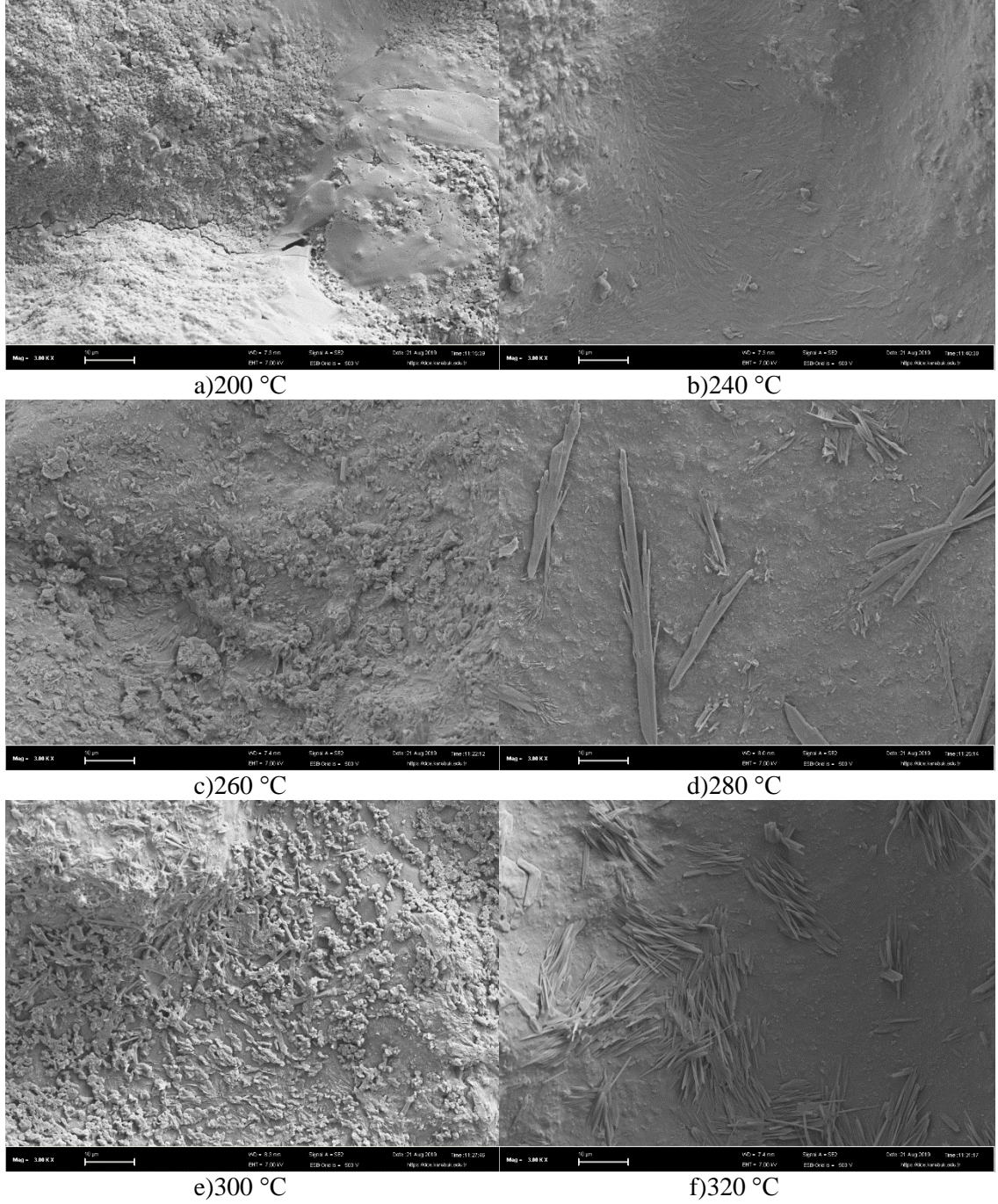
Numunelerin Üretim Sıcaklığı	Numunelerde Oda Sıcaklığı ve Üretim Sıcaklıkları Arasında Gerçekleşen Toplam Kütle Kaybı (%)
200 °C	% 8,19
240 °C	% 9,95
260 °C	% 10,17
280 °C	% 8,46
300 °C	% 9,52
320 °C	% 4,52

## 5.6. SEM ANALİZİ SONUÇLARI

Şekil 5.12’de 200 °C ve 240 °C sıcaklıklarda üretilen optimum kompozisyondaki, %20 reçine katkı ve standart kum dolgulu numunelerin 20000X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. 200 °C sıcaklıkta ısıl işlem gören numunede sürekliliği olmayan bir yapı ile gözlenen gevşek bir bağlanma söz konusu iken 240 °C’de bağlayıcının sürekliliği olan daha yoğun bir yapıya evrildiği gözlemlenmiştir (Şekil 5.12a,b). Şekil 5.13’te farklı sıcaklıklarda üretilen optimum kompozisyona sahip %20 reçine katkı ve standart kum dolgulu numunelerin 3000X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. 240 °C ve üzerinde artan sıcaklıklarda mikroyapının yoğunluğunda artma meydana gelmiştir (Şekil 5.13b-f). Sıcaklık artışına bağlı olarak tüm numunelerde çiçeklenmeler gözlemlenmiştir (Şekil 5.13c-f).



Şekil 5.12. a)200 °C ve b)240 °C sıcaklıkta üretilen %20 optimum bileşimdeki reçine katkı standart kum dolgulu numunenin 20000X büyütmedeki SEM görüntüleri.

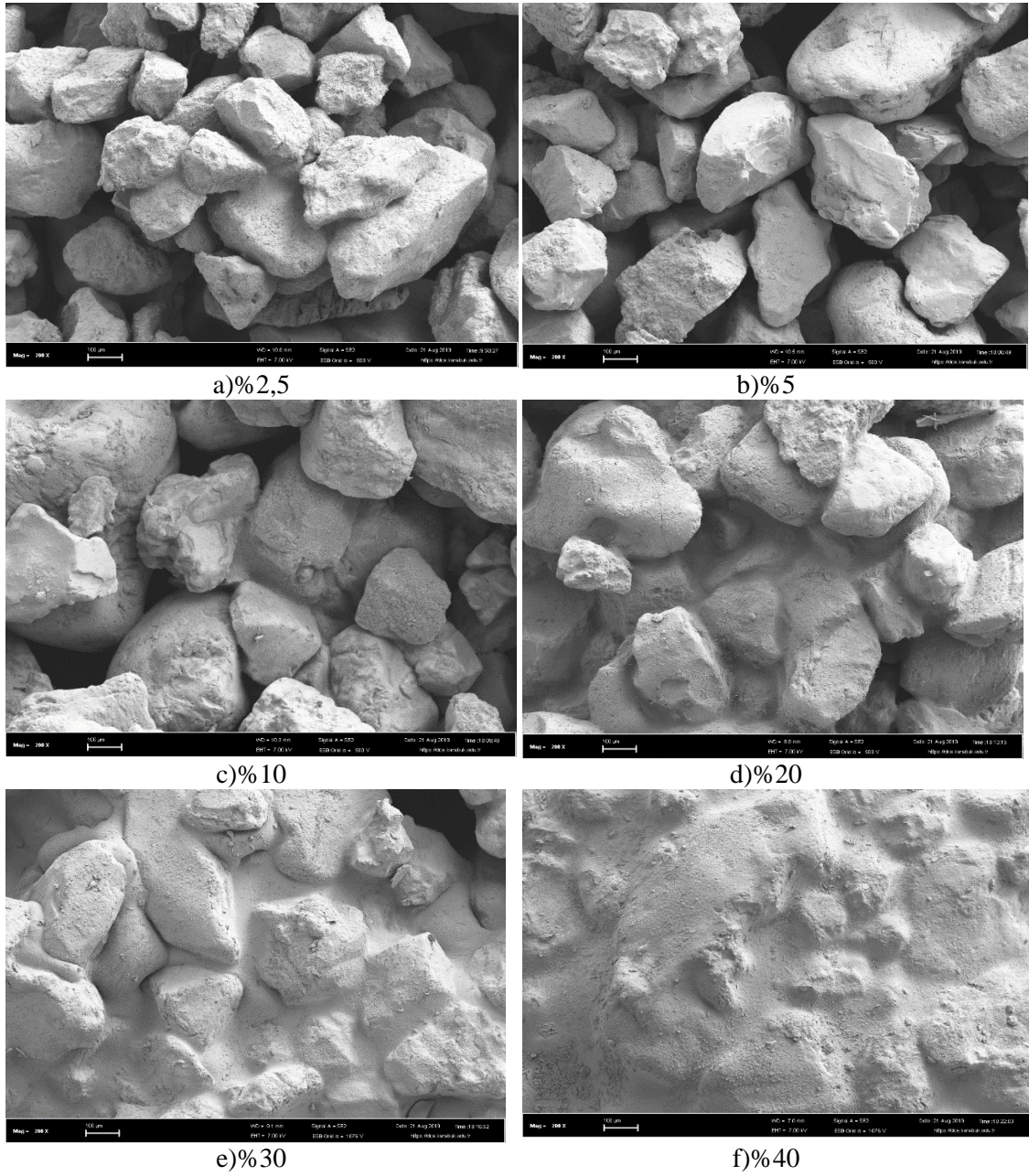


Şekil 5.13. Farklı sıcaklıklarda üretilen %20 optimum bileşimdeki reçine katkı standart kum dolgulu numunelerin 3000x büyütmedeki SEM görüntüleri; a) 200 °C, b) 240 °C, c) 260 °C, d) 280 °C, e)300 °C, f) 320 °C.

Şekil 5.14'de farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen, optimum bileşime sahip standart kum dolgulu numunelerin 200X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. Düşük bağlayıcı oranlarında reçinenin yüzeyini kaplamak için yeterli olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.14a-c). %20 bağlayıcı oranı ile üretilen



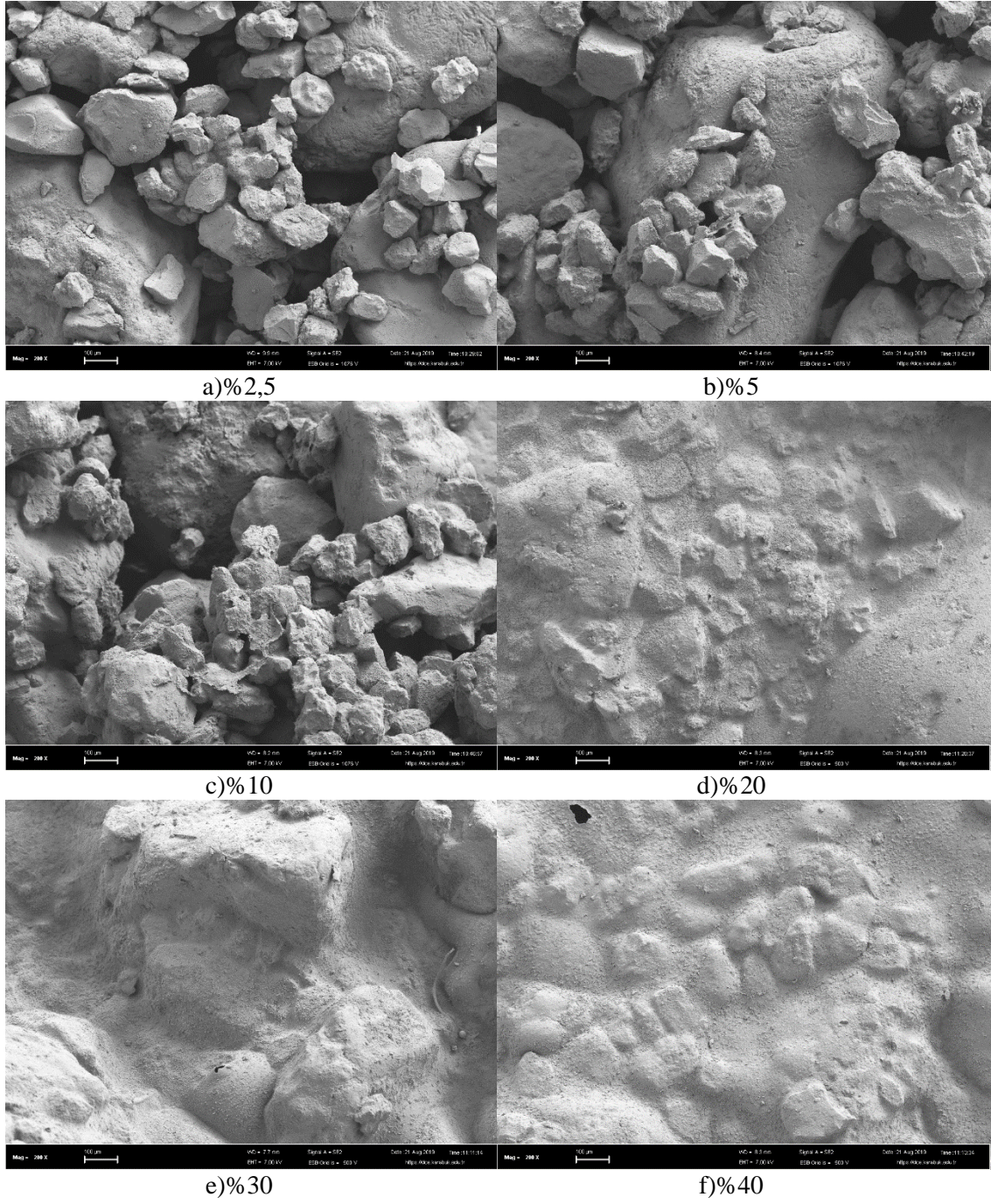
numunede taneler arası boşluklar dolarak bağlanma gerçekleşmiş ve daha yoğun bir yapı meydana gelmiştir (Şekil 5.14d). %30 ve %40 bağlayıcı oranı ile üretilen numunelerde boşlukların tamamen kapandığı ve dolguların aşırı bağlayıcı nedeni ile uzaklaşarak tanelerin temas noktalarının azaldığı görülmektedir (Şekil 5.14e,f). Bağlayıcı oranının %30 ve %40 oranlarına artmasının numunedeki ısıl işlem esnasındaki gaz çıkışını sağlayacak gözenekleri kapattığı görülmüştür (Şekil 5.14e,f).



Şekil 5.14. Optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen standart kum dolgulu numunelerin 200X büyütmedeki SEM görüntüleri; a)%2,5 b)%5 c)%10 d)%20 e)%30 f)%40.

Şekil 5.15'te farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen, optimum bileşime sahip ince kum dolgulu numunelerin 200X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. İnce kum dolgular yüzey alanının artmasına bağlı olarak daha fazla bağlayıcıya ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla düşük bağlayıcı oranları ile üretilen numunelerde standart kum dolgulu numunelere benzer olarak bağlanmanın gerçekleşmesi için bağlayıcı oranının yeterli gelmediği gözlemlenmiştir (Şekil 5.15a-c). %20 bağlayıcı oranında ise taneler arası bağlanma gerçekleşmiştir (Şekil 5.15d). %30 ve %40 artan bağlayıcı oranları ile üretilen numunelerde taneler arası boşluklar tamamen kapanarak teması azalmıştır (Şekil 5.15e,f).





Şekil 5.15. Optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen ince kum dolgulu numunelerin 200X büyütmedeki SEM görüntüleri; a)%2,5 b)%5 c)%10 d)%20 e)%30 f)%40.

## BÖLÜM 6

### GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kalsine edilmemiş kaolin ve sodyum silikat esaslı inorganik bağlayıcının bileşiminin, üretim sıcaklığının, katkı oranının ve dolgu tane boyutunun son ürün iç yapısı ve özelliklerine olan etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Çalışma neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- 1) 240 °C sıcaklıkta CEN standart kuma %20 katkı oranıyla üretilen numunelerin basma dayanımı test sonuçlarına göre, optimum bağlayıcı bileşimi molar oranlarının  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3=1$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=5$  ve  $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3=30$  olduğu tespit edilmiştir. Optimum bileşimde 19,5 MPa basma dayanımı elde edilmiştir.
- 2) 200 °C sıcaklıkta ısıl işlem gören numunenin basma dayanımı oldukça düşük iken 240 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanan numunenin basma dayanımı belirgin olarak artmıştır. En yüksek basma dayanımı 300 °C sıcaklıkta ısıl işlem gören numunede 23,4 MPa olarak ölçülmüştür. Artan sıcaklık ile basma dayanımı bir miktar düşmüştür.
- 3) İnce ve standart kum dolgulu optimum bileşimdeki farklı bağlayıcı oranları ile 300 °C sıcaklıkta üretilen numunelerde en iyi basma dayanımı hem ince hem de standart kum dolgulu numuneler için %20 bağlayıcı oranında elde edilmiştir.
- 4) XRD analiz sonuçlarına göre numunelerde amorf faz ve kaolin fazı tespit edilmiştir. Uygulanan ısıl işlem sıcaklığının 320 °C sıcaklığa ulaşması ile numunelerde kristallığın belirgin olarak azaldığı görülmüştür.
- 5) DTA-TG analizleri ile numunelerde 100 °C sıcaklık altında endotermik bir tepkime ile başlayan kütle kaybının 700 °C sıcaklığa kadar devam ettiği ölçülmüştür. Numunelere uygulanan artan ısıl işlem sıcaklığının numunelerin zeolitik su içeriğini ve rehidratasyon eğilimini azalttığı görülürken, ısıl işlem



sıcaklığının dehidroksilasyon kaynaklı kütle kaybına belirgin bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

- 6) SEM analizlerinde bağlayıcı mikroyapısının 240 °C sıcaklıkta uygulanan ısı işlem ile bütünsellik kazandığı gözlenmiştir. Basma dayanımı değerleri ve mikroyapı görüntüleri bu tipteki bir bağlayıcı için en düşük ısı işlem sıcaklığının 240 °C olduğunu göstermektedir.
- 7) %30 ve üzerinde yapılan bağlayıcı katkısının hem standart hem de ince kum dolgulu numunelerde tozlar arasındaki gaz çıkışına izin veren boşluğun tamamen kapanmasına neden olduğu mikroyapı analizlerinde gözlenmiştir. Bu durum %30 ve üzerinde bağlayıcı içeren numunelerde, DTA-TG analizleri ile gözlenen ve yüksek sıcaklıklarda devam eden gaz çıkışı kaynaklı deformasyona neden olmuştur.

Bu çalışmada kompozisyon ve üretim parametrelerinin son ürün özelliklerine etkisi incelenen inorganik bağlayıcının kısa sürede üretime izin veren ve metakaoline ihtiyaç duymayan bir nitelikte olması nedeni ile metal döküm işlemlerine ilaveten refrakterik yapıştırıcılarda ve yapı malzemesi alanlarında kullanımının da incelenmesi önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Davidovits, J., “30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs.” *Geopolymer 2002 Conference*, Melbourne, 1-16 (2002).
2. Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A. Fernandez Jimenez, A. “Crucial Insights on the Mix Design of Alkali-Activated Cement-Based Binders”, “Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes”, **Woodhead Publishing**, Cambridge, 49-73 (2015).
3. Boutterin, C., Davidovits, J., “Geopolymeric Cross-Linking (LTGS) and Building Materials”, *Cordi-Geopolimere*, 88(1): 79-88 (2003).
4. Görhan, G., Kürklü, G., “The Influence of the NaOH Solution on the Properties of the Fly-Ash- Based Geopolymer Mortar Cured at Different Temperatures”, *Composites Part B Engineering*, (58): 371-377, (2014).
5. Davidovits, J., “Mineral Polymers and Methods of Making Them”, *US Patent*, 4349386, Saint Quentin, 1-10 (1982).
6. Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D., “Alkali Activated Cements and Concretes”, *Taylor & Francis*, New York, 1-375 (2006).
7. Davidovits, J., “Geopolymer Chemistry and Applications 2<sup>nd</sup> ed.” *Institut Geopolymere*, Saint Quentin, 1-587 (2008).
8. Uzun, M., Çoğürçü, M. T., Keskin, Ü. S., “Cam Tozunun Beton Basınç Dayanımına Etkisi”, *Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2): 42-51 (2018).
9. Kürklü, G., “Oda Sıcaklığında Kür Edilen Granüle Yüksek Fırın Cürufllu Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* (16): 356-367 (2016).
10. Balun, B., Karataş, M., “Compressive Strength of Pumice Based Alkali-Activated Hybrid Cement”, *3<sup>rd</sup> International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS)*, Skopje, 318-325 (2018).
11. Uluer, O., Karaağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanları, A., ve Çelik D. N., “Genleştirilmiş Perlitin Isı Yalıtım Teknolojilerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1): 36-42 (2018).

12. Davidovits, J., “Geopolymers Based on Natural and Synthetic Metakaolin a Critical Review” *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 38(3): 201-214 (2018).
13. Davidovits, R., Pelegris, C., Davidovits, J., “Standardized Method in Testing Commercial Metakaolins for Geopolymer Formulations”, *Institut Geopolymere*, Saint Quentin, Technical Paper 26 MK Testing, 1-8 (2019).
14. Panagiotopoulou, Ch., Kontori, E., Perraki, Th., and Kakali, G., “Dissolution of Aluminosilicate Minerals and By-Products in Alkaline Media”, *Journal of Materials Science*, 42(9): 2967-2973 (2007).
15. Twordaska, H. J., Langer, H. J., “Heat Curable Foundry Binder Systems” *US Patent*, 5474606, Ohio, 1-12 (1994).
16. Yetiş, Ü., “Çimento Sektörü”, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi İçin Teknik Yardım Projesi*”, 2007TR16IPO 001.3.06/SER/42, Ankara, 2-66 (2017).
17. Taban, H., Gökçe, H. S., and Abama, H. İ., “Çimento Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Doğal Puzolanların Ekolojik Etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 15(4): 185-190 (2012).
18. Gao, X., “Alkali Activated Slag-Fly Ash Binders: Design, Modeling and Application”, Ph.D. Thesis, *Eindhoven University of Technology, The Netherlands*, Eindhoven, 1-229 (2017).
19. Provis, J.L., “Activating Solution Chemistry for Geopolymers”, *Geopolymers Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, *Woodhead Publishing*, Cambridge, 50-71 (2009).
20. 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, 25-29 (2016).
21. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes J., and Jalali S., “Alkali-Activated Binders: A Review Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products”, *Construction and Building Materials*, Portugal, (22): 1305-1314 (2008).
22. Provis, J.L., Doxson, P., Kavalerova E., Krivenko, P.V., Pan, Z., Puertas, F., and Van Deventer J.S.J., “Historical Aspects and Overview”, *Alkali Activated Materials*, *Springer*, Netherlands, 11-57, (2014).
23. Davidovits, J., “Geopolymer Chemistry and Applications 4<sup>th</sup> ed.”, *Institut Geopolymere*, Saint Quentin, 3-20 (2015).

24. Cihangir, F., “Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufunun Macun Dolguda Bağlayıcı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 20-70 (2011).
25. Davidovits, J., “Geopolymers of The First Generation: Siliface-Process, Geopolymer”, **Geopolymer 88**, 49-48 (1988).
26. Autef, A., Joussein, E., Poulesquen, A., Gasgnier, G., Pronier, S., Sobrados, I., Sanz, J., and Rossignol S., “ Influence of Metakaolin Purities on Potassium Geopolymer Formulation: The Existence of Several Networks”, **Journal of Colloid and Interface Science**, (408):43-53 (2013).
27. Zhang, Z.H., Zhu, H.J., Zhou, C.H., and Wang, H., “Geopolymer from Kaolin in China: An Overwiev”, **Applied Clay Science**, (119): 31-46 (2016).
28. Carrasco, M.T., Puertas, F., “Alkaline Activation of Different Aluminosilicates as an Alternative to Portland Cement: Alkali Activated Cements or Geopolymers”, **Revista Ingenieria de Construcción**, 32(2):5-12 (2017).
29. İnternet: İnovatif Kimya Dergisi, “Sodyum Hidroksit-NaOH”, <https://inovatifkimyadergisi.com/sodyum-hidroksit-naoh> (2017).
30. U.S. Department of Health and Human Services, “Sodium Hydroxide”, **Agency for Toxic Substances and Disease Registry**, CAS#1310-73-2, Atlanta, 1-2 (2002).
31. Euro Chlor, “Caustic Soda”, **Public Information**, 3-4, Brussels, (2016).
32. Permanent Committee on Technology and Safety Japon Soda Industry Association, “Safe Handling of Caustic Soda (Sodium Hydroxide)”, **Japon Soda Industry Association**, 1-29 (2006).
33. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, T.C. Kalkınma Bakanlığı ve Dokuz Eylül Üniversitesi, “Sanayiden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Belirlenmesi ve Azaltılmasına Yönelik Uygulamanın Kolaylaştırılmasının Sağlanması Projesi, **Klor-Alkali Tesisleri Sektörel Uygulama Klavuzu**, İzmir, 1-22, (2018).
34. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, “Kimya Sektörü Özel İhtisas Komisyonu Sudkostik-Klor-Klorür Asidi Alt Komisyon Raporu”, **DPT Yayınları**, Ankara, 1-30 (1987).
35. Özcan, A. S., “Yükseltgenme İndirgenme ve Elektrokimya”, Genel Kimya, **T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını 2. Baskı**, Eskişehir, 262-286 (2011).
36. Alpaydın, S., Şimşek, A., “Genel Kimya”, **Eğitim Yayınevi 11. Baskı**, Konya 360-365 (2016).

37. Wang, H., Li, H., Yan, F., “Synthesis and Mechanical Properties of Metakaolinite-Based Geopolymer” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268(1-3): 1-6 (2005).
38. İbrahim, W.M.W., Hussin, K., Abdullah, M.M.A., Kadir, A.A., and Deraman, L.M., “Effects of Sodium Hydroxide (NaOH) solution Concentration on Fly Ash-Based Lightweight Geopolymer”, *3rd Electronic and Green Materials International Conference, Vol 2*, Krabi, 1-8 (2017).
39. Yahya, Z., Abdullah, M.M.A.B., Talib, S.Z.A., and Razak, R.A., “Comparative Study on Early Strength of Sodium Hydroxide (NaOH) Activated Fly Ash Based Geopolymer”, *AIP Conference Proceeding, 1887*, East Java, 1-6 (2017).
40. Umwelt Bundes Amt, “Geman Notes on BAT for the Production of Large Volume Solid Inorganic Chemicals Sodium Silicate”, *Federal Environmental Agency*, Alfred-Herrhausen, 1-21 (2001).
41. İnternet: European Commission, “Large Volume Inorganic Chemical-Solids and Others Industry”, *European Commission Joint Research Centre*, 1-666 (2007). [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/lvic-s\\_bref\\_0907.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/lvic-s_bref_0907.pdf)
42. Salahudeen, N., Ahmed, A.S., “Characterization on Sodium Silicate Prepared from Kankara Kaolin”, *Nigerian Journal of Scientific Research*, 13(1): 72-75 (2014).
43. Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J.G., and Puertas, F., “Alkali Activated Slag Mortars: Mechanical Strength Behaviour”, *Cement and Concrete Research*, 29(8): 1313-1321 (1999).
44. Bakharev, T., Sanjayan, J.G., and Cheng, Y., “Alkali Activation of Australian Slag Cement”, *Cement and Concrete Research*, 29(1): 113-120 (1999).
45. Zivica, v., “Effects of Type and Dosage of Alkaline Activator and Temperature on The Properties of Alkali-Activated Slag Mixtures” *Construction and Building Materials*, 21(7): 1463-1469 (2007).
46. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, “Kimya Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, **DPT: 2564-ÖİK: 580**, 1-428 (2001).
47. İnternet: Ünsal, A., “Soda Külü ve Ekonomisi”, *Eti Holding A.Ş. Tesis Mühendislik Hizmetleri Başkanlığı*, 1-11 [https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi129/d129\\_2835.pdf](https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi129/d129_2835.pdf)
48. Akboğao, A., Girgin, İ., “Doğal Kaynaklardan Sodyum Karbonat Üretimi Yöntemleri”, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 26(1): 25-33 (1987).
49. Wisniak, J., “Sodium Carbonate-From Natural Sources to Leplanc and Back”, *Indian Journal of Chemical Techology*, (10): 99-112 (2003).

50. Gözke, G., “Kazan Trona Mineralinin Ters Flotasyonla Zenginleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-6 (2006).
51. Steinhauser, G., “Cleaner Production in The Solvay Process: General Strategies and Recent Developments”, *Journal of Cleaner Production*, 16 (7): 833-841 (2008).
52. Madima, T., “Manufacturing of Synthetic Soda Ash”, MSc. Thesis, *University of The Western Cape*, 4-19 (2009).
53. Osborne, C., Pack, M., “Sodium Carbonate-A Versatile Material”, *The Royal Society of Chemistry*, London, 1-33 (2000).
54. Matazimov, D., “Beypazarı ve Kazan Trona Cevherlerinin Flotasyon ve Manyetik Ayırma Yöntemleriyle Zenginleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 22-24 (2005).
55. Yuan, B., Yu, Q. L., and Brouwers, H. J. H., “Evaluation of Slag Characteristics on The Reaction Kinetics and Mechanical Properties of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Activated Slag”, *Construction and Building Materials*, (131): 334-346 (2017).
56. Büchel, K.H., Moretto, H.H., Woditsch, P., “Industrial Inorganic Chemistry”, 2nd ed., Translated by Terrel, D. R., *Wiley-Vch*, Weinheim, 223-225 (2000).
57. Garret, D.E., “Sodium Sulfate: Handbook of Deposits, Processing, Properties and Use”, *Academic Press*, California, 1-341 (2001).
58. Wells, R.C., “Sodium Sulphate: Its Sources and Uses”, *U.S. Department of The Interior*, Washington, 1-43 (1923).
59. Kostick, D.S., “Sodium Sulfate”, *U.S. Department of The Interior Bureau of Mines*, 1-14 (1993).
60. Gündoğan, İ., Mordoğan, H., ve Helvacı, C., “Türkiye’deki Acı Göllerden Sodyum Sülfat Üretimi”, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 257-266 (1995).
61. Battagin, A.F., “The Influence of Alkali Activator on The Early Hydration Cement”, *Brazilian Association of Portland Cement*, Sao Paulo, 1-4.
62. Rashad A.M., Basheer, P.A.M., Collier, N.C., Milestone, N.B., “Chemical and Mechanical Stability of Sodium Sulfate Activated Slag After Exposure to Elevated Temperature”, *Cement and Concrete Research*, (42): 333-343 (2012).
63. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “Demir Çelik Cüruf Raporu”, *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği*, 1-31 (2015).

64. Duxson, P., “Geopolymer Precursor Design”, Geopolymers Structure, Processing, Properties and Industrial Applications, **Woodhead Publishing**, Cambridge, 37-49 (2009).
65. Shekhovtsova, J., “Using South Africa Fly Ash as a Component of Alkali-Activated Binder”, Ph. D. Thesis, **Faculty of Engineering, Built Environmental and Technology University of Pretoria**, Pretoria, 1-10 (2015).
66. Adam, A.A., “Strength and Durability Properties of Alkali Activated Slag and Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”, Ph.D. Thesis, **School of Civil, Environmental and Chemical Engineering RMIT Unüversity**, Melbourne, 7-11 (2009).
67. Eren, E., “Borik Asit ve Borik Asit Atıklarının Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Alkali Aktivasyonu Sürecine Etkilerinin Araştırılması”, Doktora tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 26-29 (2018).
68. Tokyay, M., Erdoğan, K., “Cüruflar ve Cürufu Çimentolar”, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, 8. Baskı Fersa Matbaacılık, Ankara, AR-GE/Y 97.2, 1-44 (2009).
69. Wesche, K., “Fly Ash in Concrete Properties and Performance”, **E&FN SPON**, London, 1-284 (1991).
70. APK Dairesi Başkanlığı Strateji Geliştirme Müdürlüğü, “Kömür Sektör Raporu (Linyit) 2017”, **T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu**, Ankara, 1-89 (2018).
71. Şengül, Ü., “Uçucu Kül ve Çevresel Etkileri”, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 7(1):89-104 (2007).
72. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, ve Mordoğan, H., “Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları”, **Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2Q05**, İzmir, 419-423 (2005).
73. Hewlett, P.C., “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete 4nd ed.”, **Elsevier**, Oxford, 33-37 (1988).
74. İsmail, K. N., Hussin, K., Idris, M. S., “Physical, Chemical & Mineralogical Properties of Fly Ash”, **Journal of Nuclear Related Technology**, (4): 47-51 (2007).
75. Turgut, P., “Uçucu Kül, Kireç ve Cam Tozu Kullanarak Blok Üretimi”, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 24(3): 413-418 (2018).
76. Tuyan, M., Boyacı, O. C., Çakır, Ö. A., ve Ramyar, K., “Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özellik ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması”, **İstanbul Hazır Beton Kongresi**, İstanbul, 1-10 (2017).

77. Siddique, R., “Waste Materials and By-Products in Concrete”, *Springer*, Berlin, 1-413 (2008).
78. Kocabag, D., “Cam Hammaddeleri: Bir İşlevsel Değerlendirme”, *2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 110-122 (1997).
79. Davilla, L. P., Risbud, S. H., and Shackelford, J. F., “Quartz and Silicas”, *Ceramic and Glass Materials Structure, Properties and Processing*, *Springer*, New York, 71-86 (2008).
80. Bourhis, E. L., “Glass Mechanics and Technology”, *Willey Wch*, Weinhem, 1-50 (2008).
81. Arslan Güvel, Ş. B., “Refrakter Kaynaklı Cam Hatalarının Fırın İçerisindeki Oluşum Yerlerinin Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 7-10 (2011).
82. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, “Türkiye Cam ve Cam Ürünleri Sanayi Meclisi Sektör Raporu”, *TOBB Yayınları*, Ankara, 1-72 (2012).
83. İnternet: “Higher Strength Concrete Using Glass Powders”, 1-11, [https://www.academia.edu/11166483/Higher\\_Strength\\_concrete\\_using\\_glass\\_powders](https://www.academia.edu/11166483/Higher_Strength_concrete_using_glass_powders).
84. Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., and Rodrigez, D., “Studies on Concrete Containing Ground Waste Glass”, *Cement and Concrete Research*, (30):91-100 (2000).
85. Yüksel, C., Mardani-Aghabaglou, A., Beglarigale, A., Yazıcı, H., Ramyar, K., and Çakır, Ö.A., “Bazalt ve Atık Cam Agregalı Betonlarda Alkali-Silis Reaksiyonu Genleşmeleri ve Alkali Sızıntısı Seviyeleri”, *İMO Teknik Dergi*, 28(477): 7865-7882 (2017).
86. Pascual, A.B., Tognonvi, M.T., and Tagnit-Hamao, A., “Waste Glass Powder-Based Alkali Activated Mortar”, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(13):15-19 (2014).
87. Tamanna, N., Sutan, N.M., Tuladhar, R., Lee, D.T.C., and Yakub, İ., “Pozzolanic Properties of Glass Powder in Cement Paste”, *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 7(2): 75-81 (2016).
88. Tashima, M. M., Soriano, L., Borrachero, M. V., Monzo, J., Cheeseman, C. R., Paya, J., “Alkali-Activation of Vitreous Calcium Aluminosilicate Derived from Glass Fibre Waste”, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(3): 83-93 (2012).
89. Cyr, M., Idir, R., and Pointot, T., “Properties of Inorganic Polymer (Geopolymer) Mortars Made of Glass Cullet”, *Journal of Material Science*, (47): 2782-2797 (2012).



90. Gündüz, L., Şapçı, N., “Pomza Madenciligi, Endüstrisi ve Türkiye Açısından Önemi (Gelişen Yeni Bir Sektör)”, **Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı IMCET 20Q5**, İzmir, 397-407 (2005).
91. Binici, H., Sevinç, A. H., Durgun, M. Y., “Pomza, Barit, Kolemanit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların Dayanımı ve Sülfat Direnci”, **Elektronik Journal of Construction Technologies**, 7(1): 39-51 (2011).
92. Türkel, S., Kadiroğlu, B., “Pomza Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 13(3), 353-359 (2007).
93. Gündüz, L., Rota, A., ve Hüseyin, A., “Türkiye ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme Karakteristiği Analizi” 4. **Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu**, İzmir, 175-188 (2001).
94. Dinçer, İ., Orhan, A., ve Çoban, S., “Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi Fizibilite Raporu”, **Ahiler Kalkınma Ajansı**, 7-30 (2015).
95. Balun, B., “Alkalilerle Aktive Edilmiş Bitlis Yöresi Pomzası İçeren Hibrit Bağlayıcıların Üretilirliğinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 9-33 (2019).
96. Yadollahi, M. M., Benli, A., Demirboğa, R., “The Effects of Silica Modulus and Aging on Compressive Strength of Pumice-Based Geopolymer Composites”, **Construction and Building Materials**, (94): 767-774 (2015).
97. Yadollahi, M. M., Demirboğa, R., Polat, R., Atashafraze, M., “Behavior Investigation of NaOH-Activated Pumice-Based Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperature”, **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, 2(2): 137-142 (2013).
98. Allahverdi, A., Mehrpour, K. Kani, E. N., “Investigating the Possibility of Utilizing Pumice-Type Natural Pozzonal in Production of Geopolymer Cement”, **Ceramics Silicaty**, 52(1): 16-23 (2008).
99. Ramezaniyanpour, A. A., “Cement Replacement Materials Properties, Durability, Sustainability”, **Springer**, Berlin, 225-256 (2014).
100. Pera, J., “Metakaolin and Calcined Clays”, **Cement & Concrete Composites**, (23): 1, (2001).
101. Yazıcı, Ş., Anuk, D., ve Arel, H.Ş., “Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi”, **S.Ü. Müh.-Mim.Fak.Derg.**, 25(2): 13-24 (2010).
102. Görür, E.B., “Alkali ile Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 17-34 (2015).

103. Pacheco-Torgal, F., Moura, D., Ding, Y., and Jalali, S., “Composition, Srength and Workability of Alkali-Aktivated Metakaolin Based Mortars”, *Construction and Building Materials*, (25): 3732-3745 (2011).
104. Luga, E., “Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 15-20 (2015).
105. Yaşın, S., “Alunitli Kaolinler ile Jeopolimer Sentezi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya 1-28 (2010).
106. Chen, L., Wang, Z., Wang, Y., and Feng, J., “PerapARATION and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer”, *Materials*, 9(767): 1-12 (2016).
107. Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vazquez, T., and Grutzeck, M.W., “Chemical Stability of Cementitious Materials Based on Metakaolin”, *Cement and Concrete Research*, 29 (7): 997-1004 (1999).
108. Zhang, Z., Provis, J.L., Wang, H., Bullen, F., and Reid, A., “Quantitative Kinetic and Structural Analysis of Geopolymers.Part 2. Thermodynamics of Sodium Silicate Activation of Metakaolin”, *Thermochimica Acta*, (565):163-171 (2013).
109. Soleimani, M.A., Naghizadeh, R., Mirhabibi, A.R., and Golestanifard, F., “Effect of Calcination Temperature of The Kaolin and Molar Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> Activator Ratio on Physical and Microstructural Properties of Metakaolin Based Geopolymers”, *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 9 (4):43-51 (2012).
110. Bing-Hui, M., Zhu, H., Xue-Min, C., Yan, H., and Si-Yu, G., “Effect of Curing Temperature on Geopolymerization of Metakaolin-Based Geopolymers”, *Applied Clay Science*, (99): 144-148 (2014).
111. Rownanik, P., “Effect of Curing Temperature on The Development of Hard Structure of Metakaolin-Based Geopolymer”, *Construction and Building Materials*, 24 (7): 1176-1183 (2010).
112. Malayoğlu, U., Akar, A., “Killerin Sınıflandırılmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi”, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 125-133 (1995).
113. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, “Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri I (Seramik Killeri-Kaolen-Feldspat-Pirofillit-Wollastonit-Talk) Çalışma Grubu”, **DPT: 2611-ÖİK: 622**, Ankara, 39-84 (2001).
114. Arcasoy, A., “Seramik Teknolojileri”, *Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Seramik Anasanat Dalı Yayınları*, İstanbul, 1-277 (1983).

115. Watts, A.S., "Mining and Treatment of Feldspat and Kaolin", *Department of The Interior Bureau of Mines*, Washington, 65-89 (1913).
116. Sazcı, H., "Seramikte Kullanılan Killerin Tanımı", *4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 28-42 (2001).
117. Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., and Rahier, H., "Characterization of Alkali Activated Kaolinitic Clay", *Applied Clay Science*, (75-76): 120-125 (2013).
118. Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Lugman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi, C.M., and Liew, Y.M., "Kaolin-Based Geopolymers with Various NaOH Concentrations", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 20 (3): 313-322 (2013).
119. Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Lugman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi, C.M., and Liew, Y.M., "Effect of Curing Profile on Kaolin-Based Geopolymers", *International Conference on Physics Science and Technology*, (22): 305-311 (2011).
120. Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Lugman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi, C.M., and Liew, Y.M., "Study on Solids-to-Liquid and Alkaline Activator Ratios on Kaolin-Based Geopolymers", *Construction and Building Materials*, (35): 912-922 (2012).
121. Jaya, N.A., Mustafa Al Bakri, A.M., Ghazali, C.M.R., Binhussain, M., Hussin, K., and Ahmad, R., "Characterization and Microstructure of Kaolin-Based Ceramic Using Geopolymerization", *Key Engineering Materials*, (700): 3-11 (2016).
122. Giannopoulou, I., Panias, D., "Structure, Design and Applications of Geopolymeric Materials", *3rd International Conference on Deformation Processing and Structure of Materials*, Serbia, 5-15 (2007).
123. Rabbii, A., "Sodium Silicate Glass as An Inorganic Binder in Foundry Industry", *Iranian Polymer Journal*, 10(4): 229-235 (2001).
124. Kadioğlu, S., "Döküm Endüstrisinde Sodyum Silikat Bağlayıcılı Kalıp/Maça Kum Özelliklerinin Mikrodalga Yöntemiyle Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 17-29 (2014).
125. Izdebska-Szanda, I., Balinski, A., "New Generation of Ecological Silicate Binders", *Procedia Engineering*, (10): 887-893 (2011).
126. Jina, W., Zitian, F., Xiaolei, Z., and Di, P., "Properties of Sodium Silicate Bonded Sand Hardened by Microwave Heating", *China Foundry*, 6(3): 191-196 (2009).

127. Jina, W., Zitian, F., Hua-Fang, W., Xuan-pu, D., and Nai-Yu, H., "An Improved Sodium Silicate Binder Modified by Ultra-Fine Powder Materials", *China Foundry*, 4(1): 26-30 (2007).
128. Ekmen, Ş., Mermerdaş, K., "Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi", *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 93-101 (2018).
129. Yaprak, H., Kaplan, G., "Farklı Kür Koşullarının Taban Külü Katkılı Geopolimerlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi", *Türk Bilim Araştırma Vakfı*, 9(3): 41-51 (2016).
130. Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Ruzaidi, C.M., Lugman, M., Heah, C.Y., and Liew, Y.M., "Preliminary Study on Effect of NaOH Concentration on Early Age Compressive Strength of Kaolin-Based Green Cement", *International Conference on Chemistry and Chemical Process*, Singapore, 18-24 (2011).
131. Akman, M.S., "Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, (426):30-36 (2003).
132. Davidovits, J., Morris, M., "The Pyramids An Enigma Solved", *Hippocrene Books*, New York 1-427 (1988).
133. Faheem, M.T.M., Mustafa Al Bakri, A.M., Ruzaidi, C.M., Kamarudin, H., Izzat, A.M., and Alida, A., "New Processing Method of Kaolin-Based Geopolymer Brick by Using Geopolymer Brick Machine" *Key Engineering Materials*, (594-595): 406-410 (2014).
134. Arslan M.A. ve Aktaş M., "İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi", *Politeknik Dergisi*, 21(2): 299-320 (2018).
135. Orhun, O., "Perlit", *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 8(4): 213-222 (1969).
136. Vaou, V., Panias, D., "Thermal Insulating Foamy Geopolymers from Perlite", *Minerals Engineering*, 23 (14): 1146-1151 (2010).
137. Erdoğan, S.T., "Use of Perlite to Produce Geopolymers" *31<sup>st</sup> Cement and Concrete Science Conference Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials*, London, 1-4 (2011).
138. Arifuzzaman, M., Kim, H.S., "Development of New Perlite/Sodium Silicate Composites", *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, Bangladesh, 1-6 (2014).
139. Kelley, K.C., "Ceramic Adhesive", *US Patent*, 5468290, Washington, 1-8 (1994).

140. NSAI Standards, "Methods of Testing Cement-Part 1:Determination of Strength", *Irish Standard*, I.S.EN 196-1:2016.
141. Internet: Normensand, "CEN-Standards Sand According to EN 166-1", <https://www.normensand.de/en/products/cen-standard-sand-en-196-1/>
142. Duxson, P., Provis, J., Lukey, G., Mallicoat, S., Kriven, W., and Deventer, J., "Understanding The Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1-3): 47-58 (2005).
143. Afrugh, S., Zeinali, E., Eslami, H., and Khanbabai, G., "Effect of Water Content and SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Metakaolin-Based Geopolymer", *11<sup>th</sup> International Seminar on Polymer Science and Technology*, Tehran, 1-2 (2014).
144. Kani, E.N., Allahverdi, A., "Effect of Chemical Composition on Basic Engineering Properties of Inorganic Polymeric Binder Based on Natural Pozzolan", *Ceramic Silikaty*, 53(3): 195-204 (2009).
145. Khale, D., Chaudhary, R., "Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review", *Journal of Material Science*, (42): 729-746 (2007).
146. He, P., Jia, D., Wang, M., and Zhou, Y., "Thermal Evolution and Crystallization Kinetics of Potassium-Based Geopolymer", *Ceramic International*, 37(1): 59-63 (2011).
147. Hu, S., Wu, J., Yang, W., He, Y., Wang, F., and Ding, Q., "Preparation and Properties of Geopolymer-Lightweight Aggregata Refractory Concrete", *Journal of Central South University of Technology*, 16(6): 914-918 (2009).
148. Steinerova, M., "Mechanical Properties of Geopolymer Mortars in Relation to Their Porous Structure", *Ceramica Silikaty*, 55(4): 362-372 (2011).
149. Bhowmick, A., Ghosh, S., "Effect of Synthesizing Parameters on Workability and Compressive strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar", *International Journal of Civil Structural Engineering*, 3(1): 168-177 (2012).
150. Davidovits, J., "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials", *Journal of Thermal Analysis*, (37): 1633-1656 (1991).
151. Zhang, B., Mackenzie, K.J.D., and Brown, I.W.M., "Crystalline Phase Formation in Metakaolinite Geopolymers Activated with NaOH and Sodium Silicate", *Journal of Material Science*, (44): 4668-4676 (2009).
152. Yunsheng, Z., Wei, S., and Zongjin., "Composition Design and Microstructural Characterization of Calcined Kaolin Based Geopolymer Cement", *Applied Clay Science*, (47): 271-275 (2010).

153. Liew, Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C., and Heah, C., "Processing and Characterization of Calcined Kaolin Cement Powder", *Construction and Building Materials*, (30): 794-802 (2012).
154. Barbosa, V., MacKenzie, K., and Thaumaturgo, C., "Synthesis and Characterization of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers, *International Journal of Inorganic Materials*, (2): 309-317 (2000).
155. Zaharaki, D., Komnitsas, K., and Perdikatsis, V., " Use of Analytical Techniques for Identification of Inorganic Polymer Gel Composition, *Journal of Material Science*, (45): 2715-2724 (2010).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Selin DEMİR 1990 yılında Samsun’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Samsun ilinin sırasıyla 23 Nisan İlk Öğretim Okulu ve Mareşal Fevzi Çakmak Süper Lisesi’nde tamamladı. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nden 2015 yılında mezun oldu. 2016 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Öğrenimine başladı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Kadifekale Mahallesi, Paşamahmut Sokak No:11 Kat:3 İlkadım/SAMSUN

Tel : 0(544) 290 19 30

E-posta : selindemir055@gmail.com