



# **CAM TOZUNUN ALKALİ AKTİVASYONUNUN İNCELENMESİ**

**Merve CİVELEKOĞLU**

**2022  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman YAŞIN**

**CAM TOZUNUN ALKALİ AKTİVASYONUNUN İNCELENMESİ**

**Merve CİVELEKOĞLU**

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

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman YAŞIN**

**KARABÜK  
Eylül 2022**

Merve CİVELEKOĞLU tarafından hazırlanan “CAM TOZUNUN ALKALİ AKTİVASYONUNUN İNCELENMESİ” 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. 15/09/2022

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI (KBÜ)	.....
Üye :Dr. Öğr. Üyesi Süleyman YAŞIN (KBÜ)	.....

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.”*

Merve CİVELEKOĞLU

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **CAM TOZUNUN ALKALİ AKTİVASYONUNUN İNCELENMESİ**

**Merve CİVELEKOĞLU**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Dr. Öğr. Üyesi Süleyman YAŞIN**

**Eylül 2022, 48 sayfa**

Bu çalışmada cam tozunun alkali aktivasyonuna aktivatör çözeltideki NaOH derişiminin, aktivatör/cam tozu oranının ve ilave silika katkısının etkisi incelenmiştir. Uygun kompozisyondaki karışımlar kalıplandıktan sonra 80 °C sıcaklıkta 6 saat kür edilmesi ile numuneler üretilmiştir. Uzatılmış kürün etkisini görmek için bazı numuneler 80 °C sıcaklıkta 6 saat uygulanan kür işleminden sonra 28 gün sızdırmaz kapta bekletilmiştir. Uzatılmış kür uygulanan numuneler üzerinde yapılan ölçümler bir yıl sonra gerçekleştirilmiştir.

Basma dayanımı testi sonuçları aktivatör çözeltideki en uygun NaOH molaritesinin 6 olduğunu göstermiştir. Numune bileşimlerine silika katkısı numunelerin basma dayanımını geliştirmiştir. Basma dayanımı açısından en uygun silika katkısının %4 olduğu tespit edilmiştir. Aktivatör/cam tozu oranının basma dayanımını belirgin olarak etkilediği görülmüştür. Bununla birlikte uzatılmış kür, numune basma dayanımlarını artırmıştır. Optimum bileşimdeki numunede kısa kür sonrası ~61 MPa, uzatılmış kür

sonrası ~80 MPa basma dayanımı elde edilmiştir. Faz analizleri numunelerin amorf yapıda olduğunu göstermiştir. Alkali aktivasyon neticesinde, aktivatör molaritesi ile bağlantılı olarak cam tozunun bağ yapısında belirgin değişimler gözlenmiştir. DTA-TG analizleri ile numunelerde endotermik bir tepkime ile bileşimle bağlantılı olarak dehidratasyon ve dehidroksilasyon kaynaklı farklı kütle kayıpları tespit edilmiştir. Numune mikroyapılarının amorf bir bağlayıcı faz ve tepkimeye girmeden kalan cam tozlarından meydana geldiği görülmüştür. Silika ilavesi mikroyapıdaki kusurları azaltmıştır. Azalan aktivatör çözelti miktarı numunelerde daha yoğun mikroyapılara neden olmuştur.

**Anahtar Sözcükler :** Cam tozu, alkali aktivasyon, sodyum hidroksit, sodyum silikat.

**Bilim Kodu** : 91526

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE INVESTIGATION OF THE ALKALINE ACTIVATION OF GLASS POWDER**

**Merve CİVELEKOĞLU**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Metallurgy and Material Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Süleyman YAŞIN**

**September 2022, 48 pages**

In this study, the effects of NaOH concentration in activator solution, activator/glass powder ratio and additional silica on alkaline activation of glass powder were investigated. Samples were produced by curing the mixtures in the appropriate composition at 80 °C for 6 hours after moulding. To see the effect of the extended curing, some samples were kept in a sealed container for 28 days after curing at 80 °C for 6 hours. Measurements on extended cured samples were performed one year later.

The compressive strength test results showed that the optimal NaOH molarity in the activator solution was 6. Adding silica to the sample compositions improved the compressive strength of the samples. It was determined that the most suitable silica additive was 4 wt.% in terms of compressive strength. It was observed that the ratio of activator/glass powder significantly affected the compressive strength. However, prolonged curing increased the compressive strength of the samples. In the sample

with optimum composition, compressive strength of ~61 MPa after curing and ~80 MPa after prolonged curing was obtained. Phase analyses showed that the samples were amorphous. As a result of alkaline activation, significant changes were observed in the bond structure of the glass powder related to the activator molarity. Different mass losses with an endothermic reaction related to the composition due to dehydration and dehydroxylation were detected in the samples by DTA-TG analyses. It was observed that the sample microstructures consisted of an amorphous binder phase and unreacted glass powders. The addition of silica reduced the defects in the microstructure. The decreased amount of activator solution resulted in denser microstructures in the samples.

**Key Word** : Glass powder, alkaline activation, sodium hydroxide, sodium silicate.

**Science Code** : 91526



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Süleyman YAŞIN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sürecinde bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, deneysel çalışmalarımda gerekli olan cihaz ve ekipmanları temin ederek laboratuvar imkanlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI hocama teşekkürü borç bilirim.

Sevgili aileme maddi ve manevi olarak her zaman yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımdaki yardımlarından dolayı Damla GÜNGÖR' e, tez sürecim boyunca bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Şeyma KORKMAZ' a, yanımda her daim manevi desteklerini tüm kalbimle hissettiğim sevgili Beyza ELİYAZICI ve Faruk AKKAYA' ya sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: FYL-2019-2120. Bu çalışmaya 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
JEOPOLİMERLER VE ALKALİ AKTİVE MALZEMELER .....	4
2.1. JEOPOLİMERLER .....	4
2.1.1. Jeopolimerlerin Kimyasal Yapısı .....	5
2.1.2. Jeopolimerlerin Özellikleri .....	7
2.1.3. Jeopolimerlerin Türleri ve Kullanım Alanları .....	7
2.2. ALKALİ AKTİVE MALZEMELER.....	10
2.2.1. Alkali Aktivatörler.....	10
2.2.1.1. Sodyum Silikat.....	11
2.2.1.2. Sodyum Hidroksit .....	11
2.3. YAYGIN OLARAK ALKALİ AKTİVE EDİLEN ATIK KATILAR .....	12
2.3.1. Yüksek Fırın Cürufu .....	12
2.3.2. Uçucu Kül.....	13
2.4. CAM TOZUNUN ALKALİ AKTİVASYONU.....	14

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 3 .....	17
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	17
3.1. MALZEME .....	17
3.2. YÖNTEM.....	18
BÖLÜM 4 .....	23
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	23
4.1. BASMA DAYANIMI TESTİ SONUÇLARI .....	23
4.2. XRD ANALİZİ SONUÇLARI .....	26
4.3. FTIR ANALİZİ SONUÇLARI .....	29
4.4. DTA-TG ANALİZİ SONUÇLARI .....	33
4.5. SEM ANALİZİ SONUÇLARI.....	37
BÖLÜM 5 .....	42
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	42
KAYNAKLAR .....	44
ÖZGEÇMİŞ .....	48

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	Silokso tipi bir jeopolimerde gerçekleşen kondensasyon tepkimeleri .....	5
Şekil 2.2.	Jeopolimerlerin Yapısı .....	6
Şekil 2.3.	PSS tipi jeopolimerin NMR analizi .....	7
Şekil 2.4.	Jeopolimer kaplı sunta paneller .....	8
Şekil 2.5.	Jeopolimer esaslı briketin görüntüsü.....	9
Şekil 2.6.	Jeopolimer köpük malzeme.....	9
Şekil 3.1.	Kullanılan cam tozlarının görüntüsü. ....	17
Şekil 3.2.	Çalışmada kullanılan vibrasyon cihazı.....	19
Şekil 3.3.	Kalıptan çıkarılmış numunenin görüntüsü. ....	20
Şekil 3.4.	Numunelerin üretim yöntemi. ....	21
Şekil 4.1.	Farklı molaritede NaOH çözeltisi ile üretilen numunelerin basma dayanımları.....	24
Şekil 4.2.	Kütlece farklı SiO <sub>2</sub> ilaveli numunelerin basma dayanımları. ....	25
Şekil 4.3.	Farklı Aktivatör/Cam Tozu oranı ile üretilen numunelerin basma dayanımları.....	26
Şekil 4.4.	Numunelerin XRD paternleri. ....	28
Şekil 4.5.	Cam tozu ve farklı molaritedeki NaOH çözeltisi ile aktive edilen numunelere ait FT-IR spektrumları.....	31
Şekil 4.6.	Farklı oranlarda silika ilavesi içeren numunelere ait FT-IR spektrumları; a)%2 b)%4 c)%6. ....	32
Şekil 4.7.	Farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelere ait FT-IR spektrumları.....	33
Şekil 4.8.	Cam tozunun DTA-TG grafiği.....	34
Şekil 4.9.	6 M çözelti ile aktive edilen numunenin DTA-TG grafiği; a) Kısa kür, b) Uzatılmış kür.....	35
Şekil 4.10.	%4 Silika ilaveli numunenin DTA-TG grafiği; a)kısa kür b) uzatılmış kür.....	36
Şekil 4.11.	Farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelerin DTA-TG grafiği; a) 0,24, b) 0,44. ....	36
Şekil 4.12.	1 M derişimdeki aktivatör çözelti ile üretilen numunenin SEM görüntüsü.....	37
Şekil 4.13.	6 M derişimdeki aktivatör çözelti ile üretilen numunenin SEM görüntüsü.....	38

**Sayfa**

Şekil 4.14. 10 M derişimdeki aktivatör çözeltili ile üretilen numunenin SEM görüntüsü.....	39
Şekil 4.15. %4 Silika ilavesi ile üretilen numunenin SEM görüntüsü. ....	40
Şekil 4.16. Farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri. ....	41
Şekil 5.1. Alkali aktive cam tozu ve renkli kum dolgusu ile üretilen terrazzo numunesi. ....	43

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Cam tozunun kimyasal bileşimi.....	17
Çizelge 3.2. Çalışmada üretilen numunelerin bileşimleri.....	18

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

### **SİMGELER**

°C : Derece Santigrat

### **KISALTMALAR**

PSS : Polisialat silokso

NMR : Nükleer Manyetik Rezonans

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

XRD : X-Işını Difraktometresi

DTA-TG : Diferansiyel Termal Analiz ve Termo Gravimetre

FTIR : Fourier Dönüşüm Kızılötesi

MPa : Mega Paskal

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Küresel çevre sorunlarının getirdiği olumsuzluklar her geçen gün artmaktadır. Alkali aktivasyon ve jeopolimer teknolojisi, yapı malzemelerinden kaynaklanan yüksek CO<sub>2</sub> salınımını, kil esaslı seramiklere ve çimentoya alternatif ürünler sunmak suretiyle çözmek için umut verici bir gelişme olmuştur (Davidovits, 2008). Çimento ve seramik esaslı malzemeler 1000 °C üzerinde sıcaklıklara ihtiyaç duyarken alkali aktivasyon süreci 100 °C sıcaklığı altında gerçekleşmektedir. Bu süreçle üretilen ürünler kil ve çimento esaslı malzemelere göre kıyaslanabilir ya da daha iyi özellikler sunmaktadır. Jeopolimerlerin yüksek sıcaklıklarda ısıl işlemleri ile de farklı tipte seramikler elde edilebilmektedir (He, 2013; Kuenzel 2013).

Alkali aktivasyon alümina silikat kaynaklarının alkali çözeltiler ile kondensasyon tepkimeleri neticesinde şekillenmiş ve mukavim ürünler ortaya çıkmasına dayanan bir süreçtir. Alkali aktivasyon sonucu ortaya çıkan ürünlere genellikle alkali aktive edilmiş malzemeler ismi verilmektedir. Alkali aktivasyon konusundaki öncü çalışmalar Glukhovsky tarafından gerçekleştirilmiştir (Davidovits, 2017). Alkali aktive malzemelerin başlangıç malzemesi, kimyasal bileşimi ve üretim parametrelerine üç boyutlu bir inorganik polimer yapısının son üründe oluşması ve kimyasal kararlılığın yükselmesi amacıyla bazı kısıtlamaların uygulanması ile jeopolimer kavramı ve terminolojisi ortaya çıkmıştır (Davidovits, 1982; Davidovits, 2008).

Alkali aktive malzemeler ve jeopolimerlerin üretimlerinde yaygın olarak doğal bir kaynak olan kaolin minerali, kaolinin kalsinasyonu ile elde edilen metakaolin ve endüstriyel atık ürünler olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılır (Van Jaarsveld, 2003; Davidovits, 2008). Başlangıç malzemesi olarak endüstriyel atıkların kompozisyonlarda kullanılması hem bu atığın kullanım alanı bulmasına neden olup



depolama sorunlarını gidermekte hem de doğal kaynakları tüketmeden düşük sıcaklıkta üretime imkan sağlamaktadır.

Endüstriyel atık ürünlerden alkali aktivasyonla üretim yapmak üzere en çok üzerinde durulan malzemeler uçucu kül ve yüksek fırın cürufu olmuştur. Çünkü bu başlangıç malzemeleri amorf yapıları ve uygun kimyasal bileşimleri ile üstün performanslı ürünler sunarlar. Çevre kirliliğine neden olan önemli atıklardan biri de camlardır. Camlar bir ergime ürünüdür ve teknik olarak sınırsız bir çevrimle geri dönüştürülebilirler. Ancak pratikte camın geri dönüşümü noktasında temel engel farklı kompozisyonlardaki ve renklerdeki camların toplanırken karışması ya da camın kontamine olmasıdır. Cam ergitme fırınlarında bu tür uygunsuz cam harmanlarının geri dönüşüm amacı ile ergitilmesi cam üretiminde kusurlara neden olacağından dolayı camın önemli bir bölümü yeniden şekillendirilmiş bir cam olarak geri dönüştürülememektedir. Yaygın bir ambalaj malzemesi de olan camın yeniden üretime kazandırılmayan kısmının çevre sorununa dönüşmemesi için betonda puzolanik katkı olarak ya da kompozitlerde dolgu olarak kullanımı gibi alternatif tüketimlere ihtiyacı vardır.

Amorf yapıya sahip olan camlar yüksek silis içeriğine sahiptirler. Kimyasal bileşimlerinde alüminyum olmamasına rağmen öğütülmüş cam tozunun alkali aktive edilebilirliğini gösteren bazı çalışmalar yayınlanmıştır (Jin, 2001; Cyr, 2012). Bu çalışmalarda camın alkali aktivasyonu sonrasında diğer jeopolimerler gibi yüksek dayanımlara ulaşabildiği rapor edilmiştir.

Camın alkali aktivasyonu sonucunda ortaya çıkan ürün renksiz camların tozlarıyla üretildiğinde beyaz renklidir. Uçucu kül esaslı jeopolimerler gibi diğer tip jeopolimerler ise safsızlıklardan dolayı genellikle çeşitli renklerde üretilirler. Bu nedenle alkali aktive edilmiş cam tozu kimyasal kompozisyon ile birlikte estetik özellikleri ile de diğer jeopolimerlerden ayrılmaktadır.

Cam tozunun, alkali aktivasyon ile çevre dostu yapı malzemeleri üretimlerinde uygulama potansiyeli vardır. Bununla birlikte cam tozunun alkali aktivasyonu üzerine yapılan çalışmalar yeterli değildir. Bu çalışmada cam tozunun alkali aktivasyonuna;

aktivatör çözeltilerdeki NaOH molaritesinin etkisi, aktivatör çözeltiye sodyum silikat kaynaklı silika ilavesinin etkisi, aktivatör/cam tozu oranının etkisi ve uzatılmış kür sürecinin etkisi incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### JEOPOLİMERLER VE ALKALİ AKTİVE MALZEMELER

Jeopolimerler ve alkali aktive malzemeler kavramı literatürde bazen eş anlamlı olarak bazen de jeopolimerlerin kimyasal stabilitesinin yüksek olabilmesi için belirli kimyasal bileşimler içerisinde olması gerektiğinden ayrı kavramlar olarak ele alınmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada hem jeopolimer hem de alkali aktive malzeme kavramları ele alınmıştır.

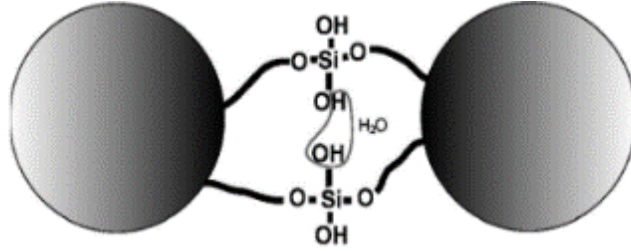
#### 2.1. JEOPOLİMERLER

Jeopolimerler, genellikle alüminosilikat malzeme ve alkali çözelti ile reaksiyon sonucu elde edilen malzemelerdir (Davidovits,2008). Başlangıç malzemelerinin nitelikleri üretilen jeopolimer özelliklerine etki etmektedir. Jeopolimerizasyon sürecinde, bileşim ve süreçle ilişkili olarak meydana gelen dönüşüm oranı mekanik özellikler için önemli rol oynamaktadır. Jeopolimer bağlayıcılarından yeterli mukavemeti sağlamak için, bağlayıcı malzeme ideal bir bileşimde olmalıdır (Davidovits, 2008; Nazari ve Sanjayan, 2015). Bununla birlikte jeopolimer bağlayıcıların bileşimlerinde atık malzemelerin kullanımı, atıkların değerlendirilmesi için çevreci bir çözüm sunmaktadır (Tchadjie vd., 2015).

Jeopolimerler birçok uygulamalarıyla beraber aynı zamanda yaygın olarak üzerinde araştırmalar yapılan bir beton çeşididir (Davidovits,2008; Annakoa, 2019). Bu beton çeşidinin sıradan portland çimentosuna göre farkı, düşük CO<sub>2</sub> salınımı ile üretimi ve mukavemetin polikondensasyon tepkimeleri ile meydana gelmesidir. Jeopolimerlerin iki temel bileşeni alümina silikat bazlı malzemeler ve alkali çözeltilerdir (Davidovits, 1982; Nazari ve Sanjayan, 2015).

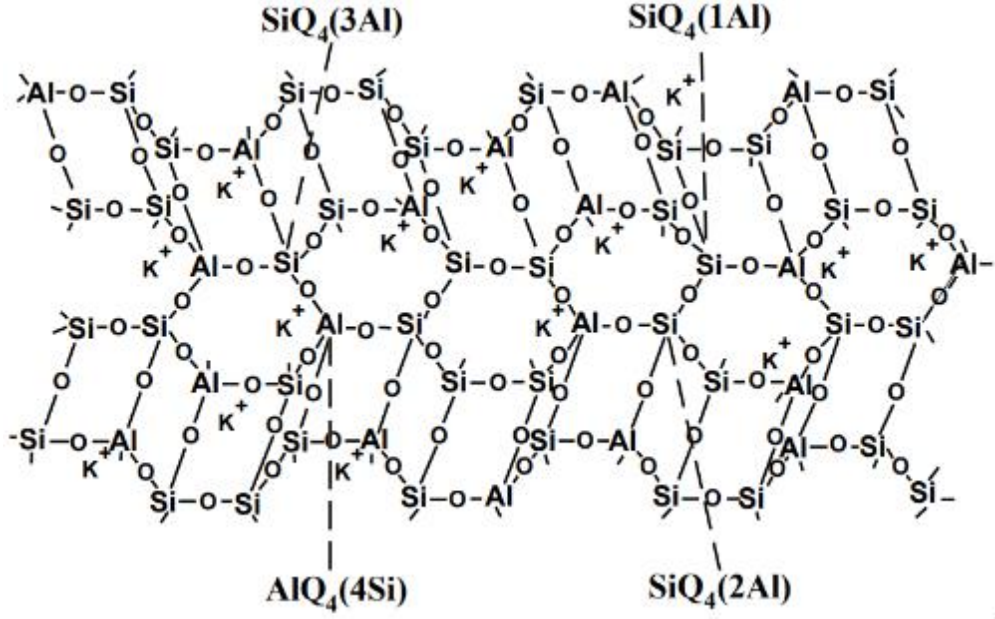
### 2.1.1. Jeopolimerlerin Kimyasal Yapısı

Alkalinasyon sonrası başlangıç maddelerinin mukavemetli kalıplanmış yapılar ortaya çıkardığı süreç genellikle uygun silikat ve alümina silikat kaynaklarının uygun molaritedeki alkali bir çözelti ile temas ettiğinde çözünmesiyle ve tane yüzeylerinin hidroksitlenmesi ile başlar. Alümina ve silika içeren çözelti belirli bir doyuma ulaştığından OH<sup>-</sup>-OH<sup>-</sup> molekülleri arasındaki su açığa çıkaran kondensasyon tepkimeleri yapıyı birbirine bağlar (Davidovits, 2008). Şekil 2.1’de silokso tipi bir jeopolimerde gerçekleşen kondansasyon tepkimesi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Silokso tipi bir jeopolimerde gerçekleşen kondensasyon tepkimeleri (Davidovits, 2005).

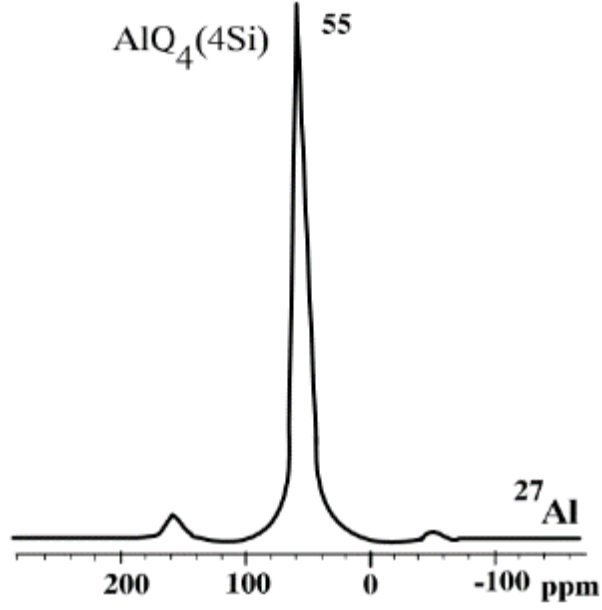
Kondensasyon tepkimeleri ortam sıcaklığı ile bağlantılı bir kinetiğe sahiptir ve suyun içerisinde gerçekleşir. Bu durum pratikte uygun sıcaklık ve rutubeti gerektiren bir kür sürecinin uygulanmasını gerektirir. Kür süreci sonrasında alümina silikat yapı, alümina ve silika tetrahedralarının rastsal olarak bağlantılı bir şebekesini meydana getirir (Davidovits, 2008). Şekil 2.2’de jeopolimerlerin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Jeopolimerlerin Yapısı (Davidovits, 1994).

Jeopolimerler çoğunlukla amorf olmasına rağmen başlangıç malzemeleri ve süreç farklılıklarından dolayı bazı tiplerinde hidrosodalit gibi kristalin zeolitik fazlar içerir (Davidovits, 2008). Jeopolimerlerin amorf yapıda olması nedeni ile tanımlanmalarında NMR analizleri FTIR analizleri aydınlatıcı olmaktadır.

Şekil 2.3’de poli sialat silokso tipi bir jeopolimere ait NMR analizi verilmiştir. Bu analiz jeopolimer yapıda alüminyumun da silisyum gibi dördü koordinasyonla yer aldığını göstermektedir. Alkali kation kafes yapıda alüminyum tarafından tutulmaktadır, ancak cam tozunun tepkimeleri neticesinde ortaya çıkan iç yapının hem düşük alümina içeriği hem de başlangıç malzemesinin kalsiyum katyonu içeriği nedeni ile daha karmaşık olacağı açıktır.



Şekil 2.3. PSS tipi jeopolimerin NMR analizi (Davidovits, 1994).

### 2.1.2. Jeopolimerlerin Özellikleri

Jeopolimerlerin bileşimleri hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri üzerinde belirgin olarak etkilidir (Davidovits, 2008). Jeopolimerlerin ne kadar süre ve hangi sıcaklıklarda kür edildiğinin basma dayanımları üzerinde etkisi vardır.

Jeopolimer malzemeler uzun yıllar boyunca dayanımından fazla kayıp vermeden dış etkenlere ve çevrenin koşullarına karşı dayanım göstermektedirler. Jeopolimerlerin temel avantajları olarak yüksek asit dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük ısı iletkenlik göstermesi ve düşük yoğunluğa sahip olması söylenebilir (Davidovits, 2008). Jeopolimerlerin üstünlüklerinden bir diğeri de bileşimle bağlantılı olarak malzeme ömrünün oldukça uzun olabilmesidir, bu nedenle de eski tarihi yapılar üzerinde kullanılmış olabilen jeopolimerler üzerinde araştırmalar yürütülmektedir (Davidovits, 2008)

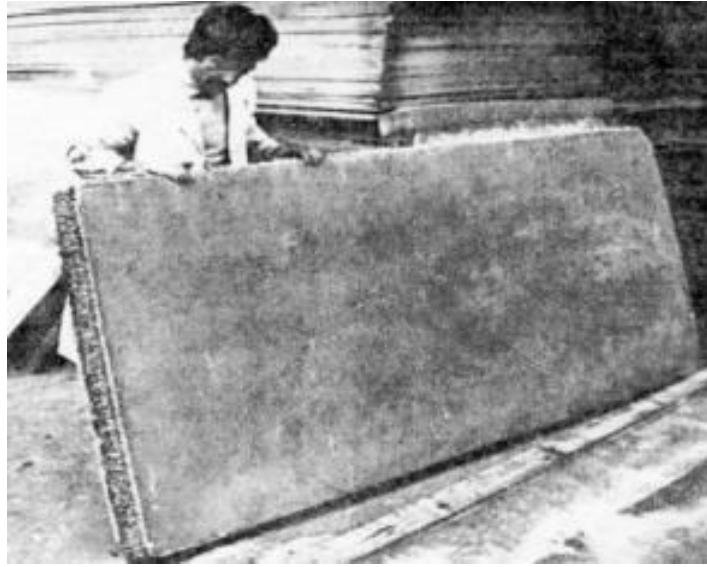
### 2.1.3. Jeopolimerlerin Türleri ve Kullanım Alanları

Yaygın olarak bilinen jeopolimer türleri şunlardır; (Davidovits, 2008).

- (Si-O-Si-O-) bağ yapısına sahip Si/Al oranı 0 olan silokso tipleri,

- (Si-O-Al-O-) bağ yapısına sahip Si/Al oranı 1 olan sialat tipleri,
- (Si-O-Al-O-Si-O-) bağ yapısına sahip Si/Al oranı 2 olan sialat silokso tipleri,
- (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) bağ yapısına sahip Si/Al oranı 3 olan sialat disilokso tipleri

Jeopolimerlerin öncü uygulamaları sunta üzerine kaolin esaslı jeopolimerler kaplanarak gerçekleştirilmiştir. Böylece yangına dayanıklı paneller üretilebilmiştir. Şekil 2.4'te bahsedilen panelin bir görüntüsü verilmiştir.



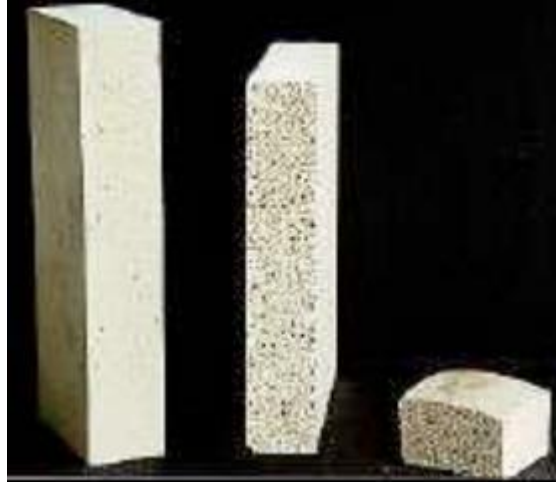
Şekil 2.4. Jeopolimer kaplı sunta paneller (Davidovits, 2002).

Kaolin esaslı jeopolimerlerin yapı malzemelerinde öncü kullanımı üzerine yapılan ilk çalışmalarda jeopolimer esaslı briketler üretilmiştir (Davidovits, 2002). Bu briketlerde jeopolimer faz diğer dolguları bir araya getiren bir bağlayıcı olmuştur (Şekil 2.5). Günümüzde çeşitli kompozisyonlardaki çevre dostu jeopolimer briketlerin ticari satışları gerçekleştirilmektedir (<https://watershedmaterials.com/>, 2022).



Şekil 2.5. Jeopolimer esaslı briketin görüntüsü (Davidovits, 2002).

Jeopolimer malzemelerin çeşitli ajanlar ile sertleşme öncesinde köpürtülmesiyle yalıtım malzemeleri geliştirilmiştir. Bu yenilikçi çalışmalar ile geliştirilen jeopolimer köpük malzemeler yanma dayanımı ve termal değerleri ile organik ve inorganik rakiplerine önemli bir alternatif olmuştur (Davidovits, 2008). Şekil 2.6'da bir jeopolimer köpüğün görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.6. Jeopolimer köpük malzeme (Davidovits, 2002).

Akışkanlığı yüksek jeopolimer reçineler ve fiberler kullanılarak inorganik matrisli yeni nesil kompozitler geliştirilmiştir (Davidovits, 2008). Farklı içerikteki jeopolimer reçinelerin reolojik özellikleri, bu reçinelerin agregalar ile kullanılmasıyla birlikte çevreci betonların elde edilmesine imkân tanımıştır (Davidovits, 2008). Jeopolimer



çimentolar üzerine yapılan çalışmalar ve ticari girişimler her geçen gün devam etmektedir. Günümüzde havaalanları gibi bazı büyük projelerde de jeopolimer betonların kullanım alanı bulduğu görülmektedir (<https://www.geopolymer.org/news/70000-tonnes-geopolymer-concrete-airport/>, 2022).

Jeopolimer çimentoların yaygın uygulamalarından biri uçucu kül esaslı jeopolimer reçinelerin betonda alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılmasıdır. Jeopolimer betonların temel üstünlükleri asit dayanımı, üretimlerinde atıkların kullanılabilirliği, düşük CO<sub>2</sub> salınımları ve yüksek dayanımlarıdır (Davidovits 2008; Topçu ve Toprak, 2009).

## **2.2. ALKALİ AKTİVE MALZEMELER**

Alkali aktive malzemeler jeopolimerler ile aynı süreçler sonucunda elde edilir. Alkali aktive malzemelerde jeopolimer yapıları için öngörülen son üründe serbest alkalinin olmaması için kafes yapısında yüksek alüminyum katyonu olması zaruri değildir. Bu durum alkali aktive malzemeler kavramının başlangıç malzemesi (silisce zenginler de dahil olduğundan) ve bileşim olarak jeopolimer kavramından daha geniş bir yelpazeyi kapsamasına neden olmaktadır.

### **2.2.1. Alkali Aktivatörler**

Puzolanik özelliği bulunan metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, volkanik küller gibi birçok katı tozun alkali ile tepkimesi neticesinde alkali aktive malzemeler üretilebilmektedir (Davidovits, 2008; Cihangir, 2011). Bu amaçla; alkali hidroksitler, alkali silikatlar, alkali karbonatlar ve alkali alüminatlar alkali aktivatör olarak kullanılabilirler (Davidovits 2008). Bunlardan en yaygın olarak kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit detaylı olarak ele alınmıştır.

### 2.2.1.1. Sodyum Silikat

Sodyum silikat çözeltileri cam suyu olarak da bilinmektedir. Çözelti ya da katı olarak temin edilebilir. Sodyum karbonat ve silika ile üretilebilir (Eşitlik 2.1).



Sodyum silikat çözeltileri alkali ve silis oranına göre farklı özelliklerde farklı uygulamalar için piyasadan temin edilebilir. Sodyum silikatların ticari kalitede olanları şeffaf renkten sapabilir. Alkali silikatların modülleri ve su oranları alkali aktive edilen son ürün üzerinde belirgin eklilere sahiptir (Davidovits 2008).

Sodyum silikatlar refrakter sanayisinde bağlayıcı olarak, seramik üretiminde döküm çamurlarının akışkanlıklarının ayarlanmasında, silika jellerin üretiminde, yangın geciktirici malzeme bileşenlerinde ve jeopolimerlerde yaygın olarak kullanılır (Davidovits 2008; Uygun, 2011).

### 2.2.1.2. Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit kimya sektöründe yaygın olarak kullanılan bir kimyasaldır. Sodyum hidroksitler piyasadan boncuk, pul ve çözelti şeklinde temin edilebilirler. Katı formları su ile karıştırıldığında kuvvetli ekzotermik tepkime vererek çözünür. Tepkimeleri olumsuz etkilememesi için alkali aktive edilecek prekursorlardan ayrı olarak çözündürülmesi önerilir. Sodyum hidroksitin aşındırıcı etkisi nedeni ile kullanıcı dostu jeopolimer bileşimlerinde sodyum silikat çözeltisi ile belirli bir karışımda kullanılması tavsiye edilmektedir (Davidovits, 2008). Kullanıcı dostu alkali aktivatör bileşimleri üretimde özellikle insan teması söz konusu ise daha fazla önem taşır.

## 2.3. YAYGIN OLARAK ALKALİ AKTİVE EDİLEN ATIK KATILAR

### 2.3.1. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu yüksek fırında demir çelik üretimi esnasında ortaya çıkan, ağırlıklı olarak kalsiyum, silisyum ve alüminyumun oksitlerinden meydana gelen bir yan üründür. Alkali aktive edildiğinde oldukça yüksek dayanımda son ürünler verebilir. Tepkimeler açısından amorf formda olan yüksek fırın cürufları tercih edilir (Davidovits, 2008).

Li vd. (2010) çalışmalarında, alkalilerin kullanılmasıyla aktive edilen metakaolin ve yüksek fırın cürufunu karşılaştırmışlardır. Kullandıkları malzemelerin birbirlerinden farklı reaksiyon mekanizmasına sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Elibol (2012), çalışmasında yüksek fırın cürufunu farklı alkaliler ile aktive ederek harçlar hazırlamıştır. Çalışma sonucunda basınç dayanımları üzerine kıyaslamalar yapmıştır. Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ve sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )' ları aktive edici malzeme olarak, kullanmıştır. Çalışmasının sonucunda sadece çimentoyla üretilen numuneye en yakın dayanım  $\text{NaOH}$  ile aktive edilen cürufu içeren numunelerde elde edilmiştir.

Rajesh vd. (2013) ise çalışmalarında alkaliyle aktive edilen yüksek fırın cürufu ile beton üretiminde farklı alkali aktivatörlerin performanslarını incelemişlerdir. Sodyum karbonat, sodyum silikat ve sodyum hidroksitle aktive ettikleri yüksek fırın cürufunun basınç dayanımları üzerine çalışmışlardır. Çalışmaları sonucunda en iyi basınç ve çekme dayanımının sodyum silikatla aktive edilen yüksek fırın cürufunda olduğunu tespit etmişlerdir.

Bakharev vd. (1999) sodyum silikat ile aktive edilen cürufların konsantrasyon ve çözeltinin modülüne bağlı olarak dayanım verdiğini belirtmişlerdir.

Shi vd. (2018), alkali dozajının ve silikatın alkaliyle aktive edilen yüksek fırın cürufu esaslı harçların karbonatlaşması üzerine etkilerini çalışmışlardır. Farklı dozlardaki

alkali ve silikatlarla, sodyum hidroksit ve silikat kombinasyonu ile aktive ettikleri harçlarını 24 saat boyunca %90 ve üzeri nemli ortam içerisinde kürlenmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda hem alkali dozunun hem de silikat modülünün artmasıyla karbonasyon direncinin arttığını ve karbonasyon direncinin artmasının gözenek solüsyonundaki yüksek alkalinite ile birlikte azalan gözeneklilikle bağlantılı olduğunu rapor etmişlerdir.

### 2.3.2. Uçucu Kül

Uçucu kül termik santrallerinin baca filtrelerinden toplanan bir yan üründür. Alümina silikat esaslı bileşime sahiptir. Amorf yapıda ve puzolanik bir malzemedir. Küresel morfolojisi kullanıldığı betonda işlenebilirliği geliştirir. Uçucu kül jeopolimer üretiminde kullanılan temel bir hammaddedir (Davidovits, 2008)

Widayanti vd. (2018), uçucu kül ve alkali aktivatör oranlarındaki değişimlere bağlı olarak mekanik özellikleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH alkali aktivatörlerini 0,5 ve 2,5 oranlarına göre kullanarak basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Uçucu kül oranının %75, alkali aktivatör oranının ise %25 olduğu jeopolimerleri akrilik silindir kalıpların içerisinde 24 saat bekleterek çıkarmışlardır. Basınç dayanım testlerini ise ürettikleri jeopolimerleri oda sıcaklığında kapalı kap içerisinde 28 gün bekletme sonrasında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda en iyi alkali aktivatör kompozisyonunun 8M NaOH,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının 2,5 olduğunu rapor etmişler ve bu numunede 98,6 MPa basma dayanımına ulaşmışlardır.

Ramuje ve Potharaju (2016), çalışmalarında uçucu kül esaslı jeopolimer betonunun aşınmaya karşı direnci üzerine araştırma yapmışlardır. NaOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  aktivatör çözelti olarak kullanılmıştır. Karışımların işlenebilirliğini artırmak için süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Dere kumu ve granit agrega olarak kullanılmıştır. Çalışmaları sonucunda jeopolimerin çimento esaslı malzemelerden daha iyi aşınma direncine sahip oldukları rapor edilmiştir. Çimento esaslı numunenin ortalama aşınma derinliği 12 saat süresinde %61 daha fazla olmuştur.

## 2.4. CAM TOZUNUN ALKALİ AKTİVASYONU

Yaygın olarak üretilen camların bileşimlerinde  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{NaO}$  bulunduğundan atık camların bileşimleri de genellikle bu şekildedir. Renkli camlarda renk verici oksitler de atık cam bileşimde görülebilmektedir. Atık camın amorf yapısı ve yüksek silika içeriği atık camı hem çözünerek aktivatör çözeltilerinin eldesinde hem de aktivatör çözeltilerinin varlığında aktive edilerek kullanılabilen bir toz haline getirir.

Atık cam tozu aynı zamanda puzolanik özellikleri ile de araştırılmaktadır. Vaitkevičius vd., (2014) beton içerisinde silika kaynağı olarak cam tozu kullanılmasının beton özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışma neticesinde cam tozu kuvars yerine kullanıldığında yüksek dayanım verirken, silis dumanı yerine kullanıldığında daha düşük puzolanik özelliği nedeni ile dayanımı geliştirememiştir.

Soliman ve Tagnit-Hamou (2017) tarafından yapılan çalışmada ince cam tozunun ultra yüksek performanslı betonda kullanıldığında, silis dumanı ve çimento arasındaki boşlukları doldurmak için faydalı olduğu rapor edilmiştir.

Geri dönüştürülmüş camın geleneksel betonda kullanımı ile ilgili çalışmalardan farklı olarak camın alkali aktivasyonu konusu çevre dostu çimento teknolojileri açısından ilgi çekicidir. Bir atık malzeme olan camın alkali aktivasyonu yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi diğer kaynaklara nispeten farklılık içermektedir. Bahsedilen ve yaygın olarak üzerine çalışmalar yapılan bu kaynaklar bol miktarda reaktif alümina içermektedirler. Ancak cam tozu cam yapıcı oksit olan silisyum dioksit nedeni ile ve cam bileşimlerindeki düşük alüminyum oksit nedeni ile silis ve alkalice zengindir.

Nispeten silisce zengin olan kaynakların alkali aktivasyonu hususunda az çalışma bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak doğal bir kaynak olan perlit ve pomzanın alkali aktivasyonunu içeren çalışmalar verilebilir. Yadollahi vd. (2015) pomza esaslı jeopolimer üretmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, elde edilen basınç dayanımlarının yapısal malzeme olarak kullanılacak seviyede olduğu belirlenmiştir.

Allahverdi vd. (2008), uygun alkali aktivatör çözeltileri kullanılarak pomzadan yeterli işlenebilirliğe ve kabul edilebilir basma dayanımına sahip bağlayıcıların üretilebileceğini rapor etmiştir.

Benzer olarak Erdoğan (2011) perlitli kullanarak jeopolimerler üretmiştir. Vaou ve Panias (2010), perlit esaslı jeopolimerleri köpürtücü ajanlarla köpürterek perlit esaslı jeopolimer köpükler üretmişlerdir.

Cam tozunun çözündürülerek sodyum silikat çözeltilerine alternatif bir alkali aktivatör olarak kullanılabilmesi alkali aktive malzemeler için ekonomik ve çevresel açıdan önem taşıyan bir konudur. Torres-Carrasco ve Puertas (2015), atık cam tozunun NaOH ile çözündürülmesi ile aktivatör çözeltiler hazırlamış ve bu çözeltiler ile uçucu kül aktive edilerek jeopolimer numuneler üretilmiş ve çalışma neticesinde atık cam tozunun çözündürülerek alkali aktivatör olarak kullanılabileceği rapor edilmiştir.

Cyr vd. (2012), cam tozunun alkali aktivasyonunda; tozların yüzey alanı, kür süresi, kür sıcaklığı ve aktivatör molaritesinin etkisini incelemişlerdir. Çalışma neticesinde üretimde cam suyuna ihtiyaç olmadığı, yüksek yüzey alanına sahip cam tozunun daha yüksek mukavemete neden olduğu rapor edilmiştir. Çalışmada 5 molariteli aktivatör çözeltiler ile yüksek dayanımlı numuneler elde edilmiştir.

Tashima vd. (2012), alkali aktive edilen atık cam elyaflarının alkali aktivasyonunu incelemişlerdir. En yüksek basma dayanımı 77 MPa olarak 65 °C sıcaklıkta üç gün kür sonrasında elde edilmiştir.

Si vd. (2020), metakaolin esaslı jeopolimere cam tozu ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda düşük miktarda cam tozu katkısının dayanımı iyileştirdiği görülmüştür.

Novais vd. (2016) floresan lambası atık camlarının jeopolimer içerisinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda üretilen atık cam içerikli jeopolimerlerin özelliklerinde kür koşullarının daha çok, NaOH molaritesinin ise daha

az etkili olduğunu rapor etmişlerdir. Atık cam tozu içeren jeopolimerlerin yük taşımayan yapı malzemelerinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Vafaei ve Allahverdi (2017), alkali aktive cam tozunun içerisine kalsiyum alüminat çimentosu ilave ederek karışımların reaktif alümina içeriğini yükseltmiştir. Artan alümina nedeni ile daha çapraz bağlı son ürünler elde edildiği rapor edilmiş ve optimum numunede 87 MPa basma dayanımı elde edilmiştir.

## BÖLÜM 3

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1. MALZEME

Bu çalışmada alkali aktive edilen katı kaynak olarak bilyalı değirmende öğütülmüş cam tozu kullanılmıştır (Şekil 3.1). Kullanılan cam tozunun kimyasal bileşimi Çizelge 3.1 'de verilmiştir. %27 SiO<sub>2</sub>, %8 Na<sub>2</sub>O ve %65 H<sub>2</sub>O kimyasal bileşimine sahip Merck marka sodyum silikat çözeltisi, Merck marka katı NaOH peletleri ve distile su sıvı aktivatör çözelti hazırlamak için kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Kullanılan cam tozlarının görüntüsü.

Çizelge 3.1. Cam tozunun kimyasal bileşimi.

Kimyasal Kompozisyon (%)					
SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diğerleri
70,2	13,9	10	3,4	1,2	1,3



### 3.2. YÖNTEM

Çalışmada aktivatör çözeltideki 1-10 molarite aralığında NaOH derişiminin etkisi, sodyum silikat çözeltisi kaynaklı SiO<sub>2</sub> ilavesinin optimum molaritedeki NaOH çözeltisi ile aktive edilen numunelere farklı oranlarda ilavesinin etkisi ve aktivatör/cam tozu oranının etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmada üretilen numunelerin bileşimleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çalışmada üretilen numunelerin bileşimleri.

Numune Numarası	Aktivatör Çözeltideki NaOH Molaritesi	Aktivatör Çözeltideki İlave SiO <sub>2</sub>	Aktivatör Sıvı/Katı Cam Tozu Oranı
1	1	0	0,4
2	2	0	0,4
3	3	0	0,4
4	4	0	0,4
5	5	0	0,4
6	6	0	0,4
7	7	0	0,4
8	8	0	0,4
9	9	0	0,4
10	10	0	0,4
11	6	0,5	0,4
12	6	1	0,4
13	6	2	0,4
14	6	4	0,4
15	6	6	0,4
16	6	4	0,44
17	6	4	0,4
18	6	4	0,36
19	6	4	0,32
20	6	4	0,28
21	6	4	0,24

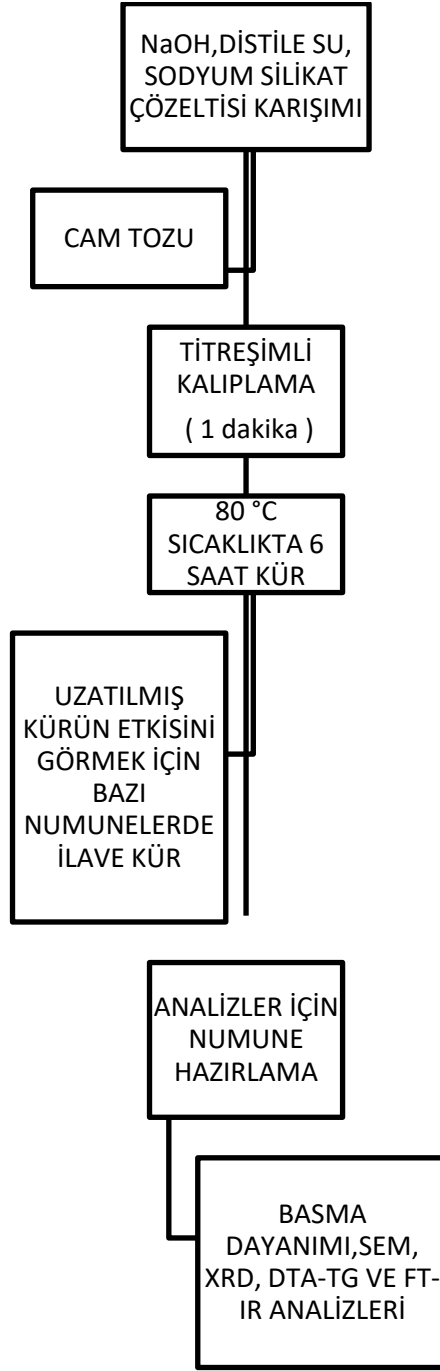
Öncelikle NaOH peletleri hesaplanan miktarda su içerisinde çözündürülerek çözelti dinlendirilmiştir. Eğer numuneler SiO<sub>2</sub> ilavesi içeriyor ise bu karışıma hesaplanan miktarda sodyum silikat çözeltisi ilave edilmiştir. Bu numunelerde sodyum silikat çözeltisinden gelen su ve NaOH başta ilave edilen katı NaOH ve sudan düşülerek





Şekil 3.3. Kalıptan çıkarılmış numunenin görüntüsü.

Kısa süre kür edilen numuneler etüv fırınında kür işlemi uygulandıktan sonra oda sıcaklığında 24 saat boyunca kurumaya bırakılmış takiben bu numunelerin analiz ve testleri tamamlanmıştır. Uzun süre kür işlemi uygulanan numuneler fırından çıkarıldıktan sonra 28 gün sızdırmaz kapta bırakılmış daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler 1 yıl süre boyunca atmosfere açık olarak bekletilmiş takiben bu numuneler üzerinde ölçümler yapılmıştır. Şekil 3.4'te hazırlanan numunelerin üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Numunelerin üretim yöntemi.

Kür işleminden sonra kalıptan çıkarılan numunelere kurutulmasının ardından zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Yüzeyleri paralel olarak zımparalanan numunelere basma testi uygulanmıştır. Parlatma işlemi yapılan numunelerin ise mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Numunelerin havan yardımı ile öğütülme işlemi yapılmış ve öğütülen numuneler üzerinde FT-IR, XRD ve DTA-TG testleri uygulanmıştır.

Numunelere Zwick/Roell marka 600 kN kapasiteli mekanik test cihazında basma testi uygulanmıştır. 25x25x25 mm'lik ebatlara sahip küplere 1 mm/dk hızında basma testleri yapılmıştır. Basma testi esnasında ulaşılan en yüksek değer kaydedilerek her bir numune için üç ölçümün ortalaması kaydedilmiştir.

Faz yapısını incelemek için toz halindeki numunelere XRD analizi yapılmıştır. Analiz için kullanılan cihaz Rigaku markadır. Analizler 5°/dk hızında ve 5-70° tarama aralığında yapılmıştır.

Termal özellikleri incelemek amacı ile Hitachi STA 7300 marka DTA-TG cihazı kullanılmıştır. Analizler oda sıcaklığı ile 600 °C sıcaklık aralığında, dakika da 10 °C ısıtma hızı uygulanarak yapılmıştır.

Numunelerin bağ yapısını incelemek için Bruker marka FTIR cihazı kullanılmıştır. Yapılan ölçüm 400-4000 cm<sup>-1</sup> aralığındadır.

Numunelerin mikroyapısal analizleri için Carl Zeiss Gemini marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ölçüm öncesinde numunelerin yüzeyi iletkenliği sağlamak amacı ile kaplanmıştır.

## BÖLÜM 4

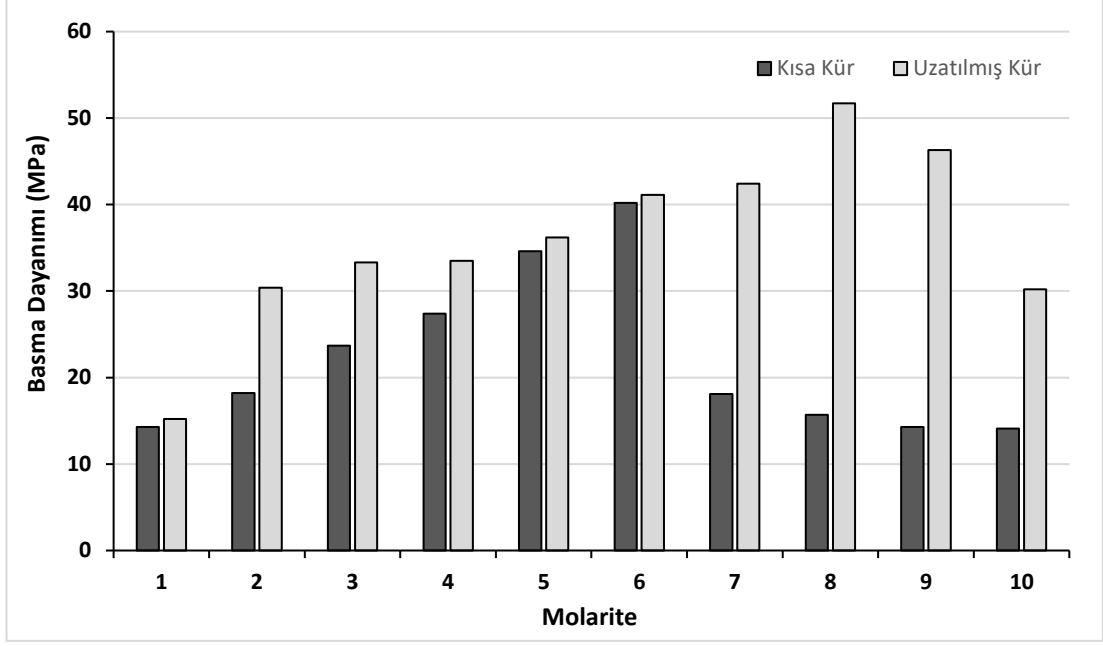
### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 4.1. BASMA DAYANIMI TESTİ SONUÇLARI

Şekil 4.1’de farklı molaritede NaOH çözeltisi ile üretilen numunelerin basma dayanımları verilmiştir. Kısa süre kür edilen numunelerde en düşük basma dayanımları ~14 MPa olarak 1 ve 10 M’lik NaOH çözeltisi ile aktive edilen numunelerde gözlenmiştir. 1 M’den 6 M aktivatör çözelti derişimine kadar artan molarite ile numunelerin basma dayanımı yükselmiştir. 6 M’lik çözelti ile aktivasyon sonucu çalışılan molarite aralığında elde edilen en yüksek değer olan ~40 MPa basma dayanımına ulaşılmıştır.

Altıdan daha yüksek değerlere artan molarite ile birlikte basma dayanımı değeri belirgin olarak düşmüştür. Cyr vd. (2012) 1, 5 ve 10M’lik çözeltiler ile aktive ettikleri cam tozundan en yüksek basma dayanımı değerlerini 5 M’lik çözeltiler ile elde etmişlerdir. Yüksek molaritelerde alkali içeriğinin iyon hareketliliğini kısıtlaması nedeni ile tepkimelerin yavaşlamasının bir neticesi olarak basma dayanımının düşebileceği bilinmektedir (Cyr vd., 2012).

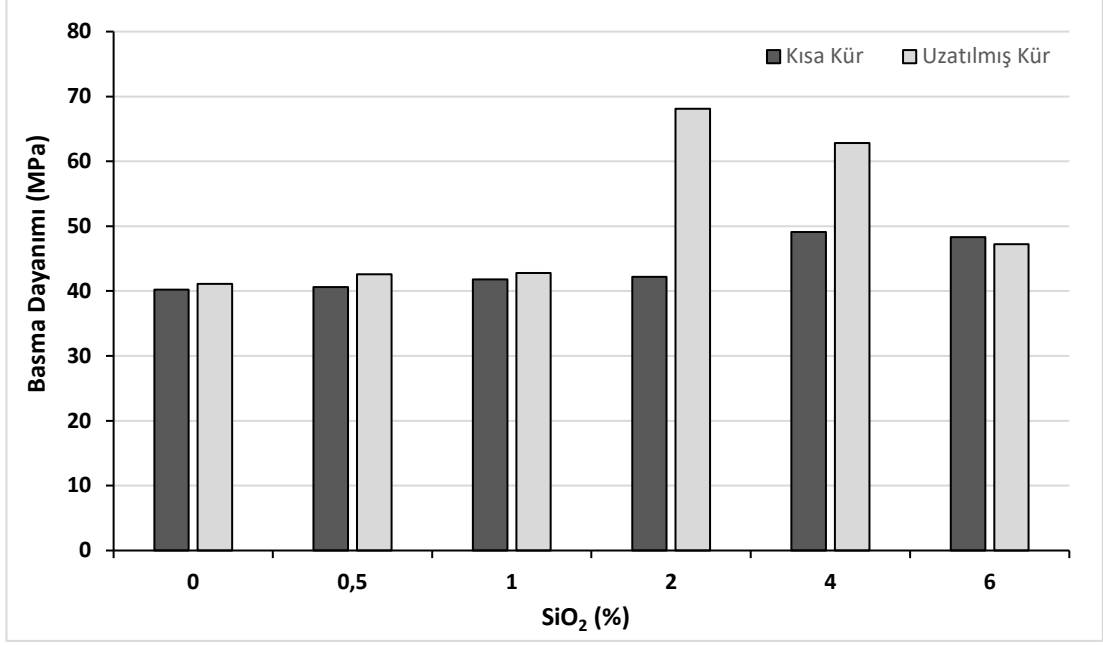
Uzatılmış kür, numunelerin basma dayanımlarında artışlara neden olmuştur. Bu artış oranları en fazla 6 molarite üzerindeki numuneler için belirgindir. 8 M’lik çözeltide uzatılmış kür ile ~51 MPa basma dayanımı elde edilmiştir. Uzatılmış kür süresi muhtemelen tepkimelerin devam etmesi nedeni ile basma dayanımlarını artırmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlara benzer olarak, literatürde üretildikten iki sene sonra yapılan ölçümde alkali aktive edilmiş cam tozunun basma dayanımının geçen sürede arttığı rapor edilmiştir (Jin, 2001). Ancak 8 M değerinden daha yüksek derişimlerde, bağlayıcı faz kafes yapısına giren aşırı alkali katyonun olumsuz etkileri ile uzun süre kürde de artan molarite ile birlikte basma dayanımında düşüş gözlenmiştir.



Şekil 4.1. Farklı molaritede NaOH çözeltisi ile üretilen numunelerin basma dayanımları.

Şekil 4.2’de artan silika katkısının numunelerin basma dayanımına olan etkisi verilmiştir. Artan silika ilavesi ile birlikte basma dayanımı %4 oranına kadar yükselmiştir. Optimum katkı oranında kısa süre kür edilen numunelerde ~40 MPa olan basma dayanımı %4 silika ilavesi ile ~49 MPa değerine yükselmiştir. Uzatılmış kür uygulanan numunelerde ise optimum silika ilavesi %2 olarak tespit edilmiştir.

Yüksek katkı oranlarında aktivatördeki aşırı silikat çözeltisinin tepkime ortamındaki iyon derişimi artırması ile tepkime ortamını daha yüksek viskoziteli ve yoğun hale getirmesinden dolayı çözünme ve kondensasyon tepkimelerinin olumsuz etkilendiği düşünülmektedir.



Şekil 4.2. Kütlece farklı SiO<sub>2</sub> ilaveli numunelerin basma dayanımları.

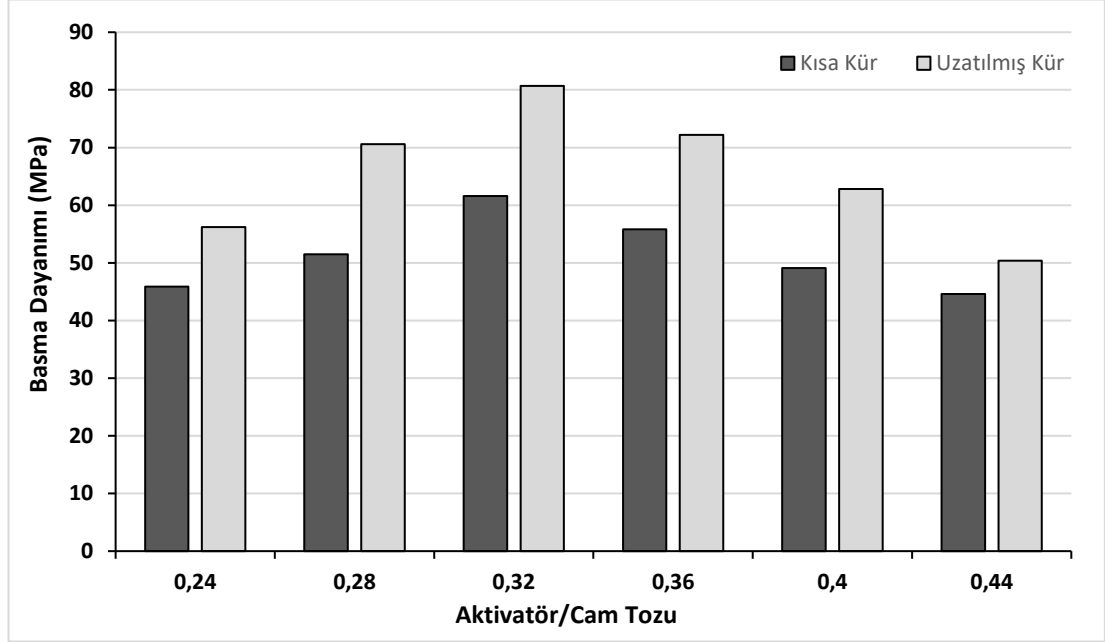
Şekil 4.3'te farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelerin basma dayanımı değerleri verilmiştir. En yüksek basma dayanımı değeri 0,32 aktivatör/cam tozu oranında kısa süre kür edilen numuneler için ~61 MPa, uzun süre kür edilen numuneler için ~80 Mpa olarak ölçülmüştür. Bu değerden artan ve düşen aktivatör çözelti miktarı dayanımı düşürmüştür.

Aktivatör çözelti miktarı aynı zamanda karışımdaki toplam su miktarı ile doğru orantılıdır. Portland çimentosu içeren sistemlerde suyun hem kimyasal tepkimelerde tüketimi mevcutken hem de reaksiyona girmeden kalan fazla suyun buharlaşmadan sonra gözenekler bırakarak geçirgenliği artırma ve basma dayanımını düşürme etkisi mevcuttur (Jansen, 2017). Bu nedenle portland çimentosu içeren sistemlerde uygulama alanı ve şekli ile bağıntılı olarak uygun reolojik özellikleri sağlayacak optimum bir su içeriği olmalıdır.

Bu çalışmadaki numunelerde de aktivatör çözeltinin etkisi portland çimentosu sistemlerindeki suyun etkisi ile benzerlik göstermiştir. Aktivatör çözelti miktarı 0,32 aktivatör/cam tozu oranına kadar azalırken dayanım artmıştır. Bu duruma azalan su ile daha iyi paketlenen tozların neden olduğu söylenebilir. Ancak daha düşük oranlarda



azalan işlenebilirlik ve düşük alkali içeriği numuneleri basma dayanımı açısından daha dezavantajlı hale getirmiştir.



Şekil 4.3. Farklı Aktivatör/Cam Tozu oranı ile üretilen numunelerin basma dayanımları.

Cam tozunun alkali aktivasyonu ile elde edilen optimum basma dayanımı değerlerinin metakaolin (Aouan vd., 2021) ve uçucu kül (Moutaoukil vd., 2021) esaslı jeopolimerler ile kıyaslanabilir ya da daha yüksek olduğu görülmüştür. Metakaolin ve uçucu kül ile kıyaslandığında, cam tozunun kimyasal özellikleri nedeniyle kür sıcaklığındaki alkali ortamda sahip olduğu yüksek çözünürlüğü tepkimelerde cam tozunu üstün hale getirmektedir. Elde edilen sonuçlar cam tozunun alkali aktive malzemeler arasındaki mekanik özellikler açısından önemini göstermektedir.

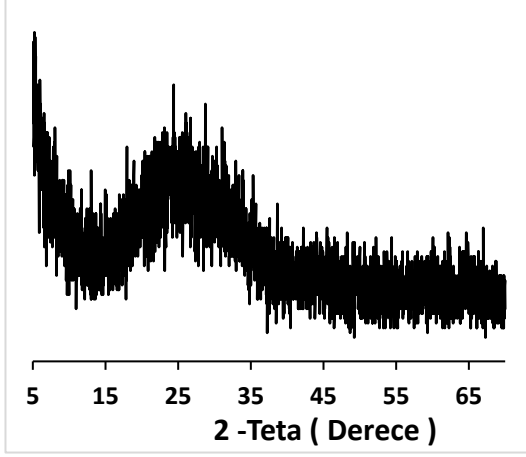
## 4.2. XRD ANALİZİ SONUÇLARI

Şekil 4.4a da cam tozunun XRD paterni verilmiştir. Çalışmada kullanılan cam tozunun tamamen amorf yapıda olduğu görülmüştür. Şekil 4.4b-f’de çalışmada üretilen numunelerin XRD paternleri verilmiştir.

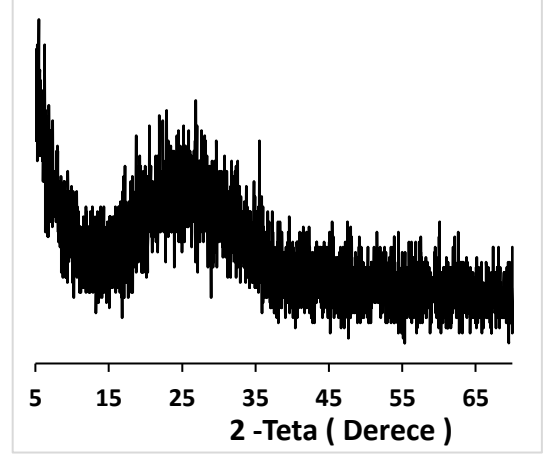
Üretilen tüm numunelerin diğer bileşim parametrelerinden bağımsız olarak amorf yapıda olduğu gözlenmiştir. Metakaolin ve uçucu kül gibi alümina silikat kaynakları ile üretilen jeopolimerlerin genellikle amorf yapıda olduğu rapor edilmiştir (Davidovits, 2008). Cyr vd. (2012) cam tozunun alkali aktivasyonu neticesinde elde edilen ürünün de amorf yapıda olduğunu rapor etmişlerdir.

Cam tozunun alkali aktivasyonu neticesinde ortaya çıkan reaksiyon ürününün zeolitik fazlar gibi kristal yapı içermeyen monofaz amorf yapıda olması camın kimyasal bileşimi ve çözünme davranışı nedeni ile sodyum silikat çözeltisi açısından zengin bir reaksiyon ortamının mevcudiyetinden kaynaklanabilir. Zhang vd. (2009) NaOH çözeltisinin ve sodyum silikat çözeltisinin varlığında metakaolini alkali aktive ederek iki çözeltinin son ürüne etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada NaOH'ın tek başına aktivatör olarak kullanıldığında kristalleşmeye neden olduğu ancak sodyum silikat çözeltisinin mevcudiyeti durumunda son ürünlerin amorf yapıda olduğu rapor edilmiştir.

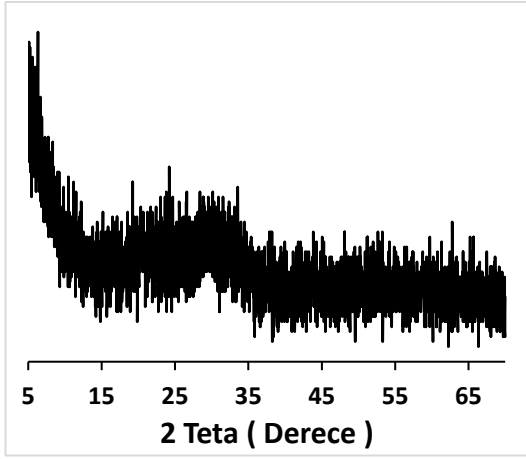
Cam tozunun amorf yapısı ve alkali aktivasyon neticesinde meydana gelen alkali aktive fazın amorf yapısı XRD analizi ile tepkime kaynaklı dönüşümü takip etmeyi tüm numunelerde amorf fazın gözlenmesi nedeni ile olanaksızlaştırmıştır. Bu nedenle basma dayanımı başta olmak üzere tüm malzeme özelliklerine belirgin etkileri olan alkali aktivasyon kaynaklı dönüşümün daha iyi anlaşılabilmesi için FT-IR, DTA-TG ve SEM analizlerinden yararlanılmıştır.



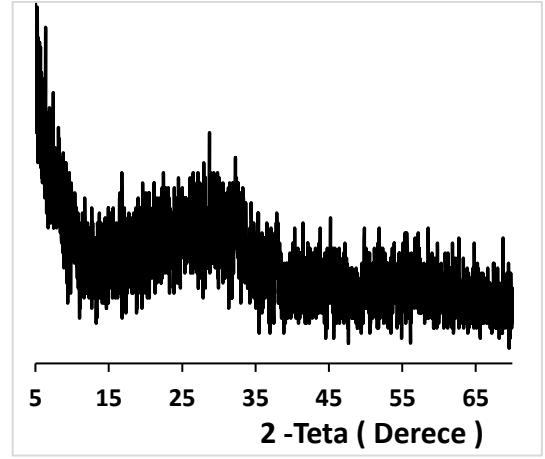
a) Cam tozu



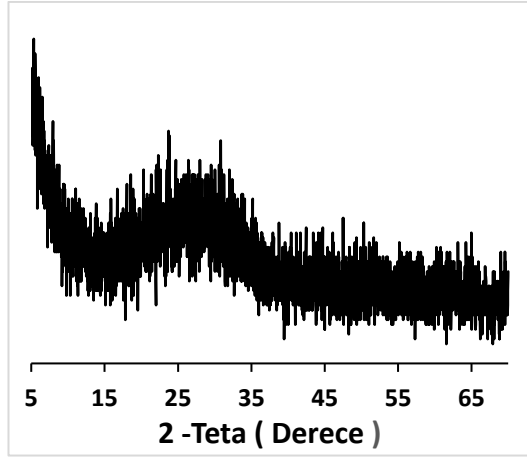
b) 1 M aktivatör çözelti ile üretilen numune



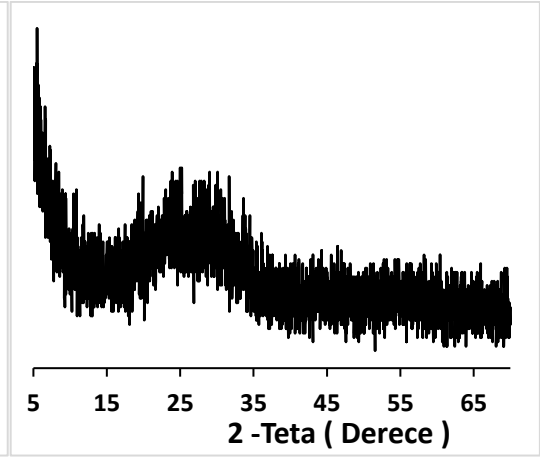
c) 6 M çözelti ile üretilen numune



d) 10 M çözelti ile üretilen numune



e) %4 silika ilaveli numune



f) %6 silika ilaveli numune

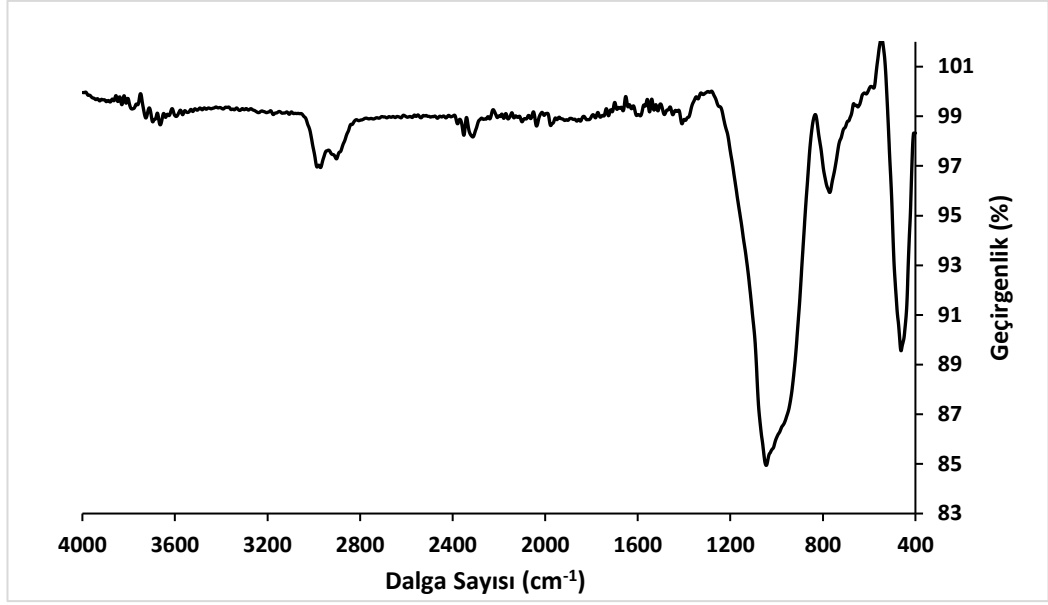
Şekil 4.4. Numunelerin XRD paternleri.

### 4.3. FTIR ANALİZİ SONUÇLARI

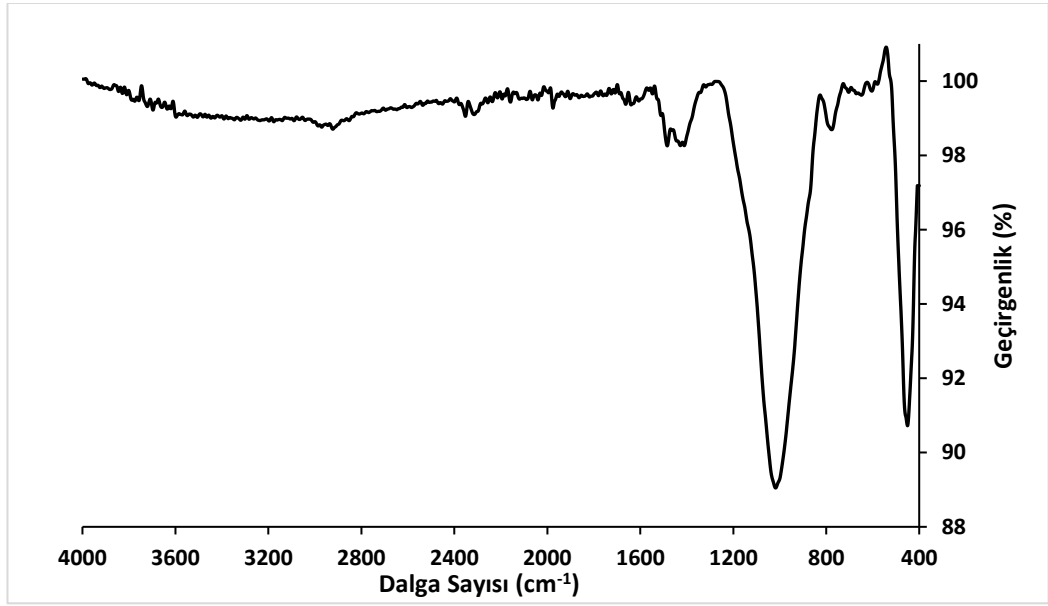
Şekil 4.5 de cam tozu ve farklı molaritedeki NaOH çözeltisi ile aktive edilen numunelere ait FT-IR spektrumu verilmiştir. Cam tozunda 462, 770 ve 1045  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısındaki pikler tespit edilmiştir. Bu piklerin literatürde Si-O-Si, bağlarına işaret ettiği rapor edilmiştir (El-Naggar ve El-Dessouky, 2017). Alkali aktivasyon sonrasında tüm numunelerin Si-O-Si bağlarına işaret eden piklerde değişimler meydana gelmiştir.

Alkali aktive edilmiş numunelerin spektrumunda 1400  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısı civarında yeni bir pikin oluşumu görülmüştür (Şekil 4.5b-d). Bu pik karbonasyon neticesinde meydana gelen sodyum karbonata işaret etmektedir (Barbosa vd., 2000). Tepkimelerden arta kalan serbest sodyumun atmosferdeki karbonatla tepkimesi neticesinde meydana gelen bu tip karbonasyon çiçeklenme olarak da bilinmektedir.

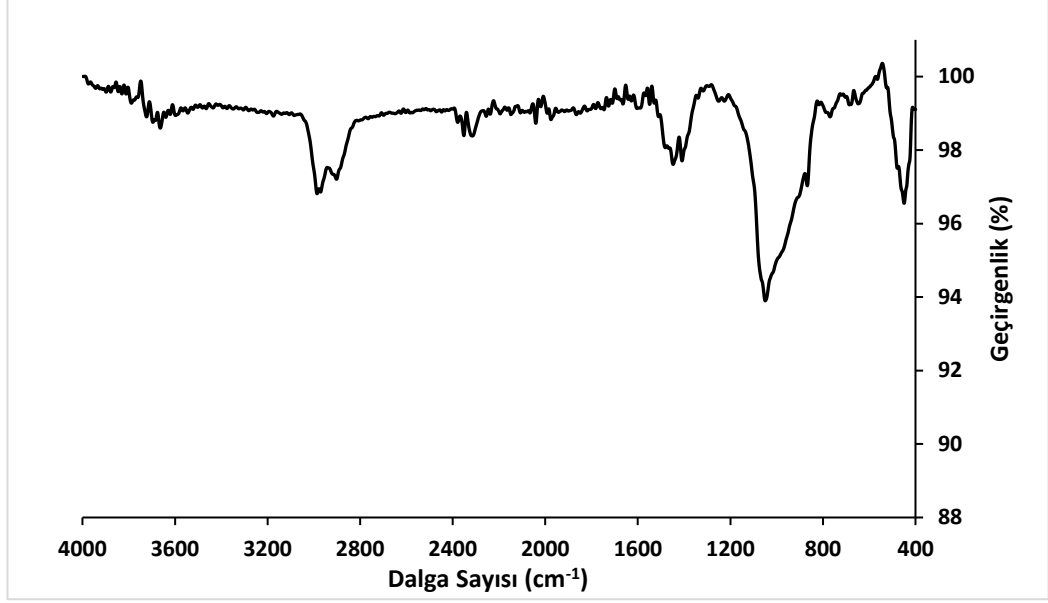
Aktivatör sıvıdaki artan sodyum hidroksit molaritesi ile birlikte orantılı olarak numunelerin Si-O-Si bağlarına işaret eden pikler zayıflamıştır (Şekil 4.5b-d). Bu durum artan molarite ile birlikte cam tozunun daha yüksek oranda dönüşüme uğradığını göstermektedir.



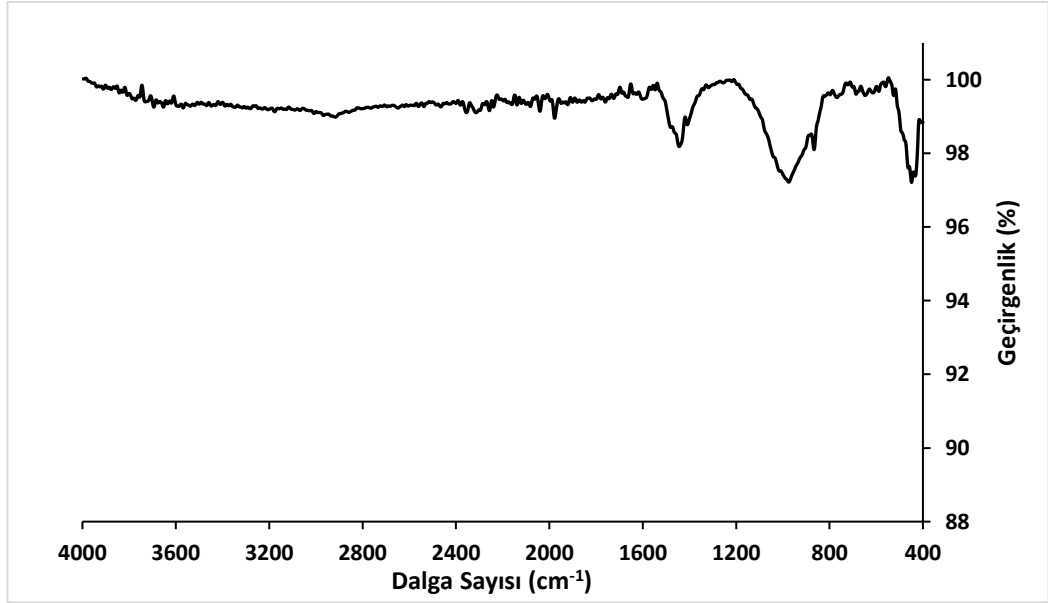
a) Cam tozu



b) 1 M'lik çözelti ile aktive edilen numune



c) 6 M'lik çözelti ile aktive edilen numune



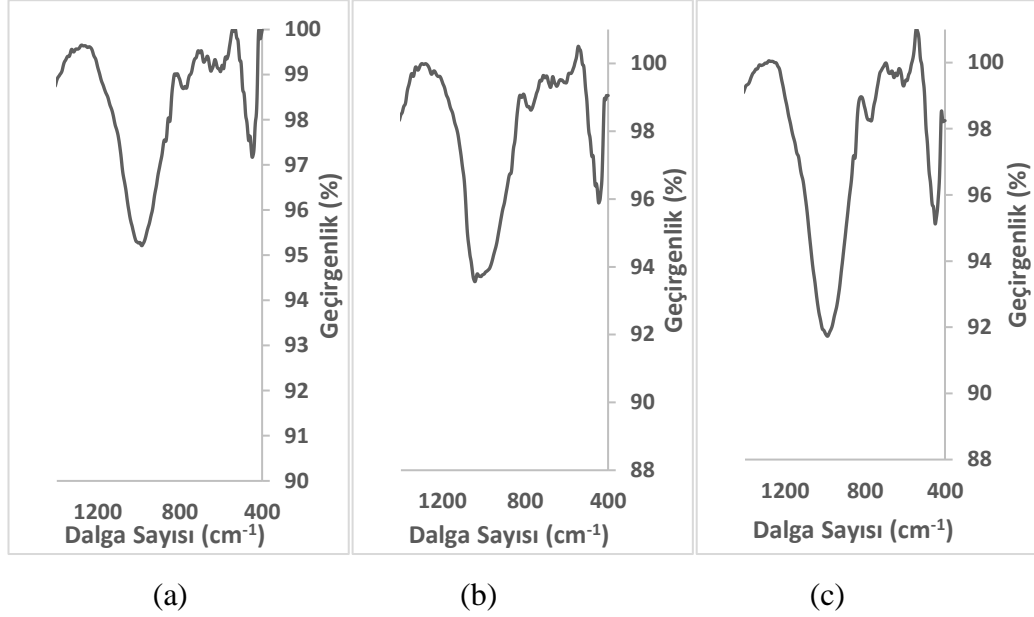
d) 10 M'lik çözelti ile aktive edilen numune

Şekil 4.5. Cam tozu ve farklı molaritedeki NaOH çözeltisi ile aktive edilen numunelere ait FT-IR spektrumları.

Şekil 4.6 de farklı silika ilavesi içeren numunelerin FT-IR spektrumu verilmiştir. Yapıya giren silika miktarı arttıkça cam tozuna ait olan ve Si-O-Si bağlarına işaret eden piklerin daha az dönüşüme uğradığı görülmüştür (Şekil 4.6a-c).

Bu durum tepkime ortamına beslenen ilave silikanın, yüksek miktarda silika içeren amorf cam tozunun aktivatör çözeltideki çözünürlüğünü düşürmesinden

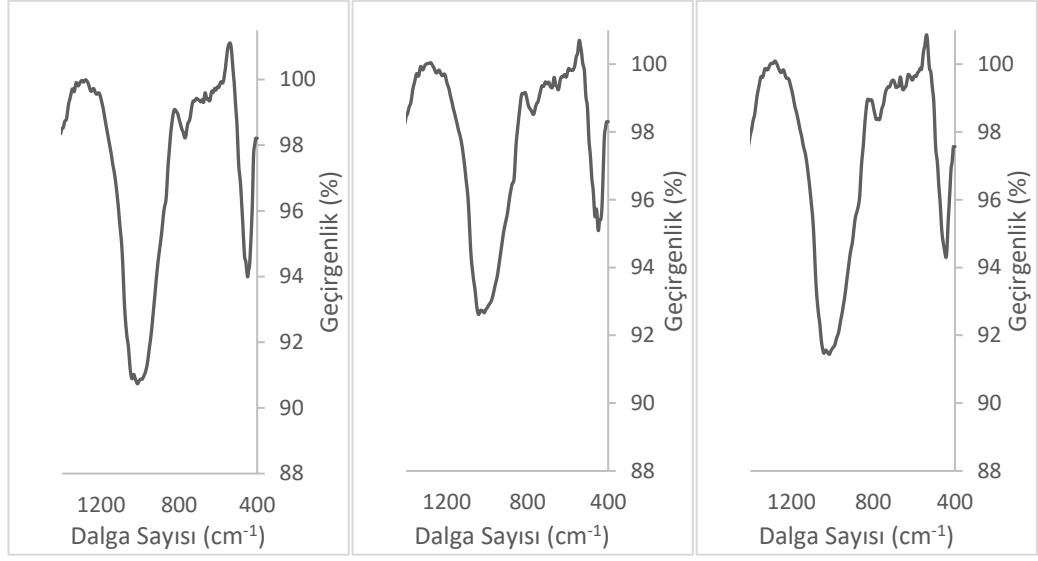
kaynaklanabilir. Tüm numunelerde tepkimelerden arta kalan cam tozu yapıda bir dolgu işlevi görecektir. Bu durumda artan silis ilavesi ile birlikte kondensasyon tepkimelerinde cam tozunun çözünmeyen kısımları yerine sodyum silikat çözeltisi kaynağından beslenen silikanın rol aldığı ve son ürünlerde tepkimelerden arta kalan cam tozunun miktarının arttığı tahmin edilebilir.



Şekil 4.6. Farklı oranlarda silika ilavesi içeren numunelere ait FT-IR spektrumları; a)%2 b)%4 c)%6.

Şekil 4.7’de farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelere ait FT-IR spektrumları verilmiştir. Farklı aktivatör oranı numunelerin spektrumlarında belirgin değişimlere neden olmamıştır (Şekil 4.7a-c). Bu durum aktivatör/cam tozu oranı ile değişen basma dayanımında daha çok fiziksel etkenlerin rol aldığına işaret etmektedir.

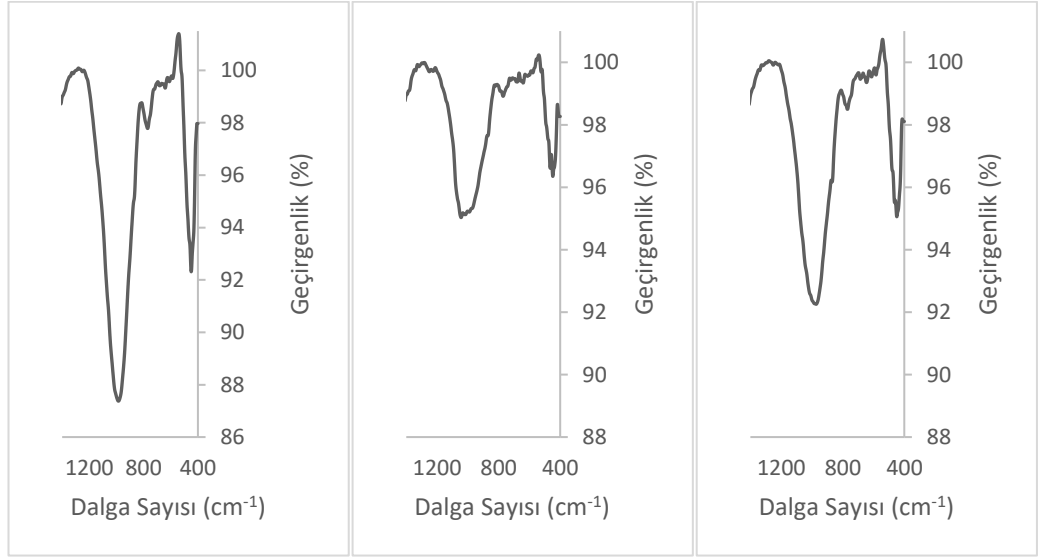
Uzatılmış kür ile numunelerin FT-IR diyagramları aktivatör/cam tozu oranı ile bağlantılı olarak değişimler göstermiştir (Şekil 4.7d-f). 0,24 ve 0,44 oranlarında uzatılmış kür işlemi spektrumlarında güçlü değişimlere neden olmaz iken 0,32 oranında cam tozuna ait pikleri zayıflatmıştır.



a)0,24

b)0,32

c)0,44



d)0,24 uzatılmış kür

e)0,32 uzatılmış kür

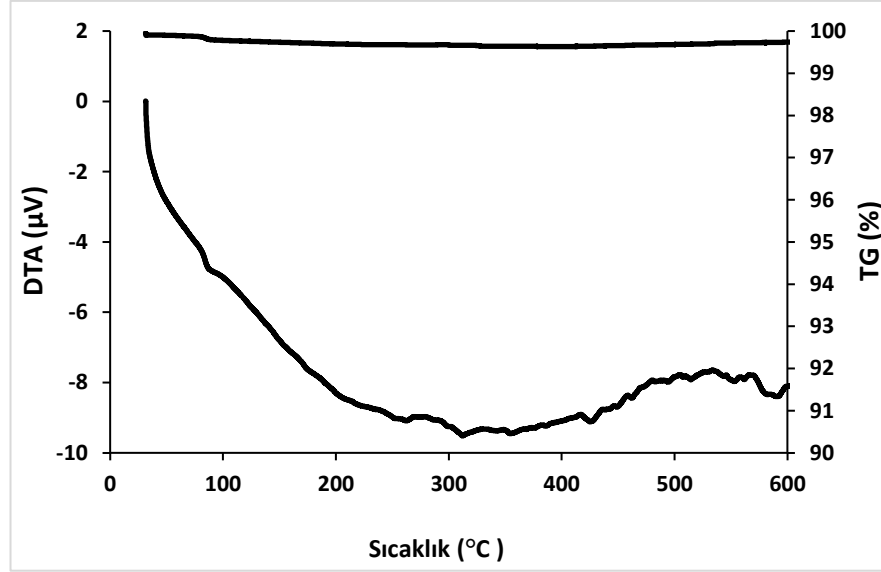
f)0,44 uzatılmış kür

Şekil 4.7. Farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelere ait FT-IR spektrumları.

#### 4.4. DTA-TG ANALİZİ SONUÇLARI

Şekil 4.8' de cam tozunun DTA-TG grafiği verilmiştir. Cam tozu ölçüm yapılan aralıkta termal bir etkinlik göstermemiş ve kütlesi sabit kalmıştır.





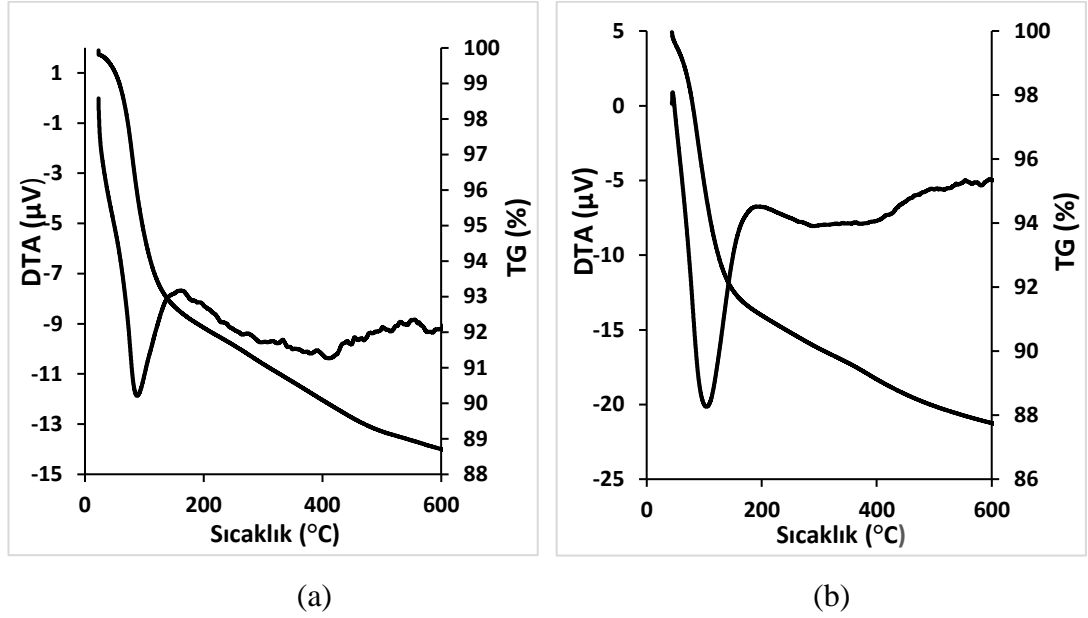
Şekil 4.8. Cam tozunun DTA-TG grafiği.

Şekil 4.9’da 6 molaritlik NaOH çözeltisi ile üretilen numunenin DTA-TG grafiği verilmiştir. Cam tozu alkali aktivasyon sonrasında DTA eğrisinde 95 °C sıcaklık civarında endotermik bir pik göstermiştir. Endotermik tepkime ile birlikte TG eğrisinde numuneden kütle kaybı gerçekleşmiştir. Takiben artan sıcaklık ile birlikte numuneden meydana gelen kütle kaybı kademeli olarak yavaşça devam etmiştir.

Jeopolimer malzemelerde numune katılaştıktan sonra gözeneklerde kalan fiziksel su düşük sıcaklıklarda endotermik tepkimeler ile uzaklaşmaktadır (Davidovits, 2008). Bu çalışmadaki alkali aktive cam tozunda da benzer olarak fiziksel suyun buharlaşma sıcaklıklarında belirgin bir kütle kaybı gözlenmiştir. Jeopolimerlerde artan sıcaklıkla beraber gerçekleşen bir diğer kütle kaybı gözenek yüzeylerindeki daha yüksek sıcaklıklarda uzaklaşabilen zeolitik suyun buharlaşması kaynaklıdır (Davidovits, 2008). Oldukça yüksek sıcaklıklara kadar devam eden başka bir kütle kaybı gerekçesi ise yapıdaki tepkimeye girmeden kalan OH<sup>-</sup> moleküllerinin artan sıcaklıkla beraber tepkimeye girip su meydana getirerek yapıyı kademeli olarak terk etmesidir (Davidovits, 2008).

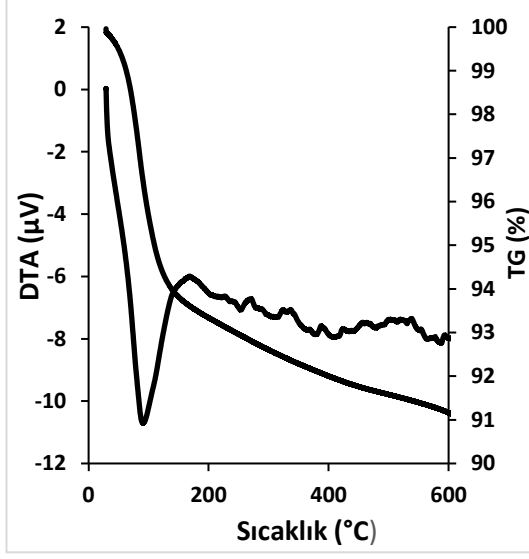
Bu çalışmadaki numunelerde gözlenen ve endotermik tepkime tamamlandıktan sonra yüksek sıcaklıklara kadar yavaşça devam eden kütle kaybının cam tozu yüzeylerindeki tepkimeye girmeden kalan OH<sup>-</sup> moleküllerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Numunede meydana gelen toplam kütle kaybı 600 °C sıcaklıkta ~%11 değerine ulaşmıştır (Şekil 4.9a). Uzatılmış kür ile numune termal davranışında belirgin bir değişim olmamıştır (Şekil 4.9b).

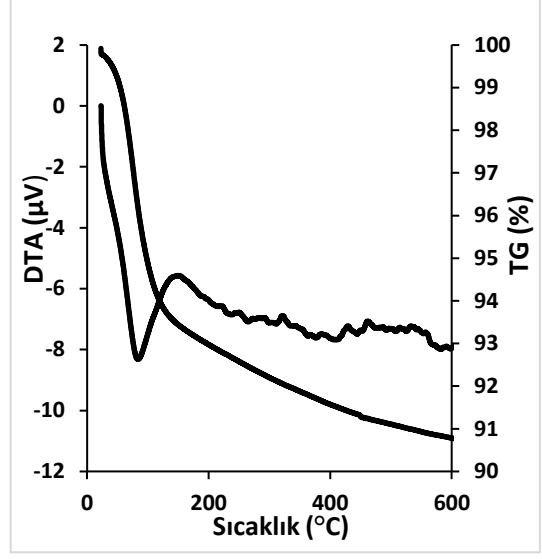


Şekil 4.9. 6 M çözelti ile aktive edilen numunenin DTA-TG grafiği; a) Kısa kür, b) Uzatılmış kür.

Şekil 4.10.'de %4 silika ilaveli numunenin DTA-TG grafiği verilmiştir. Numunelere silika ilavesi ile numunelerdeki toplam kütle kaybı bir miktar azalmıştır. Bu durum silis ilavesi ile cam tozunun tepkime ortamındaki çözünürlüğünün ve dönüşüm miktarının azalması ile ilişkili olabilir. Uzatılmış kür işlemi numunenin termal davranışında değişime neden olmamıştır.



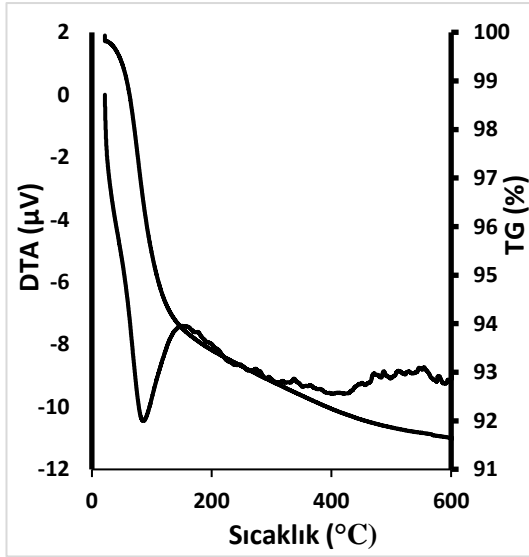
(a)



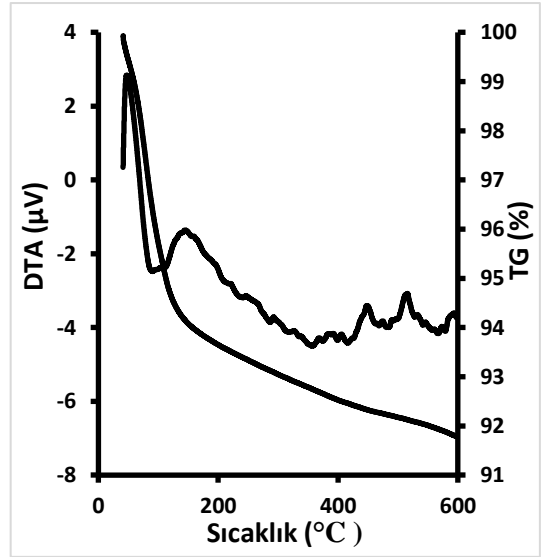
(b)

Şekil 4.10. %4 Silika ilaveli numunenin DTA-TG grafiği; a)kısa kür b) uzatılmış kür.

Farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelerin DTA-TG grafiği Şekil 4.11.'de verilmiştir. Aktivatör çözelti miktarının değişimi hem kısa hem de uzatılmış kür sonrası numunelerin termal davranışını değiştirmemiştir.



(a)

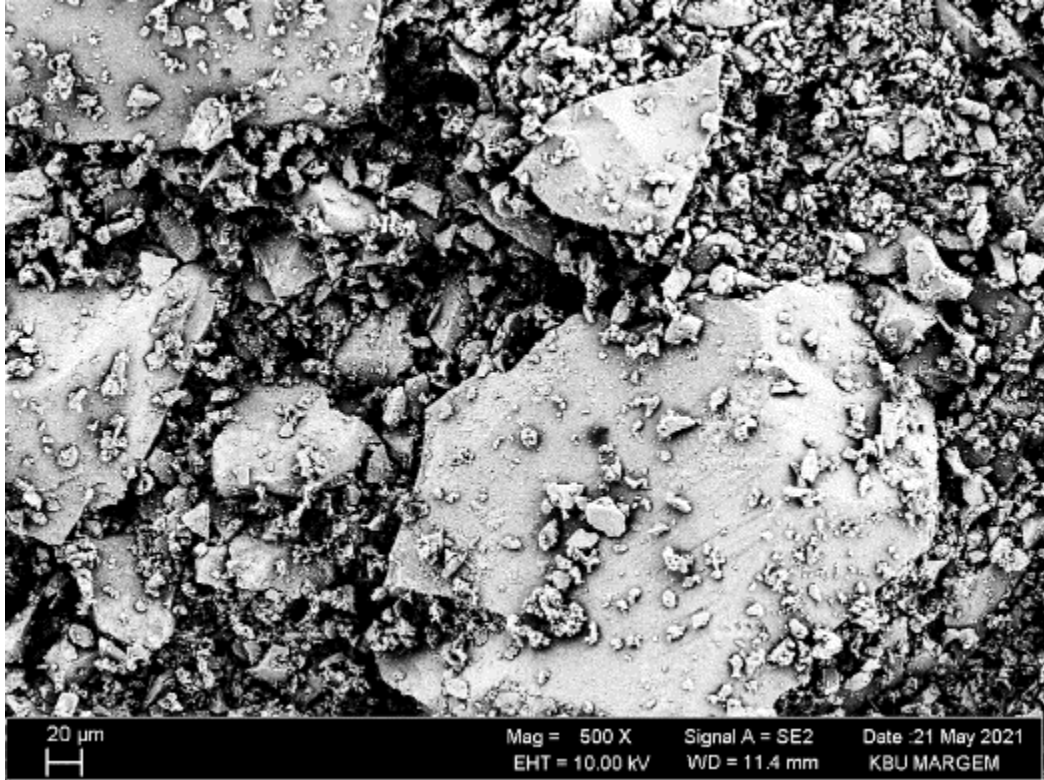


(b)

Şekil 4.11. Farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelerin DTA-TG grafiği; a) 0,24, b) 0,44.

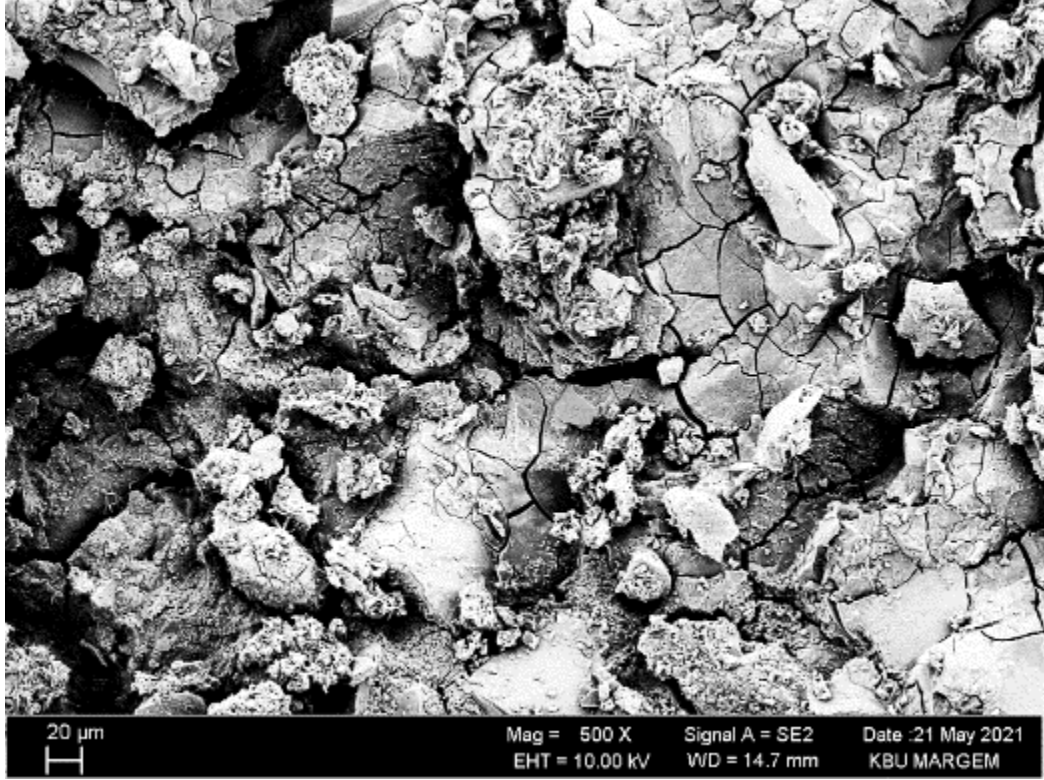
#### 4.5. SEM ANALİZİ SONUÇLARI

SEM incelemelerinde numune mikroyapılarının, çözünme ürünlerinin meydana getirdiği kompozisyonla bağlantılı özelliklere sahip bir bağlayıcı faz ve tepkimeye girmeden kalan ve yine kompozisyonla bağlantılı miktarlardaki cam tozlarından oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.12.'de 1 M NaOH derişimindeki aktivatör çözelti ile üretilen numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Numunenin mikroyopısında fazla miktarda tepkimeye girmeden kalan cam tozları ve boşluklu bir bağlayıcı faz yapısı görülmüştür. Çözelti derişiminin yetersiz gelmesi ve uygun miktarda cam tozlarını çözmemesi nedeni ile ortaya çıkan bu mikro yapı numunede kaydedilen düşük basma dayanımını açıklamaktadır.



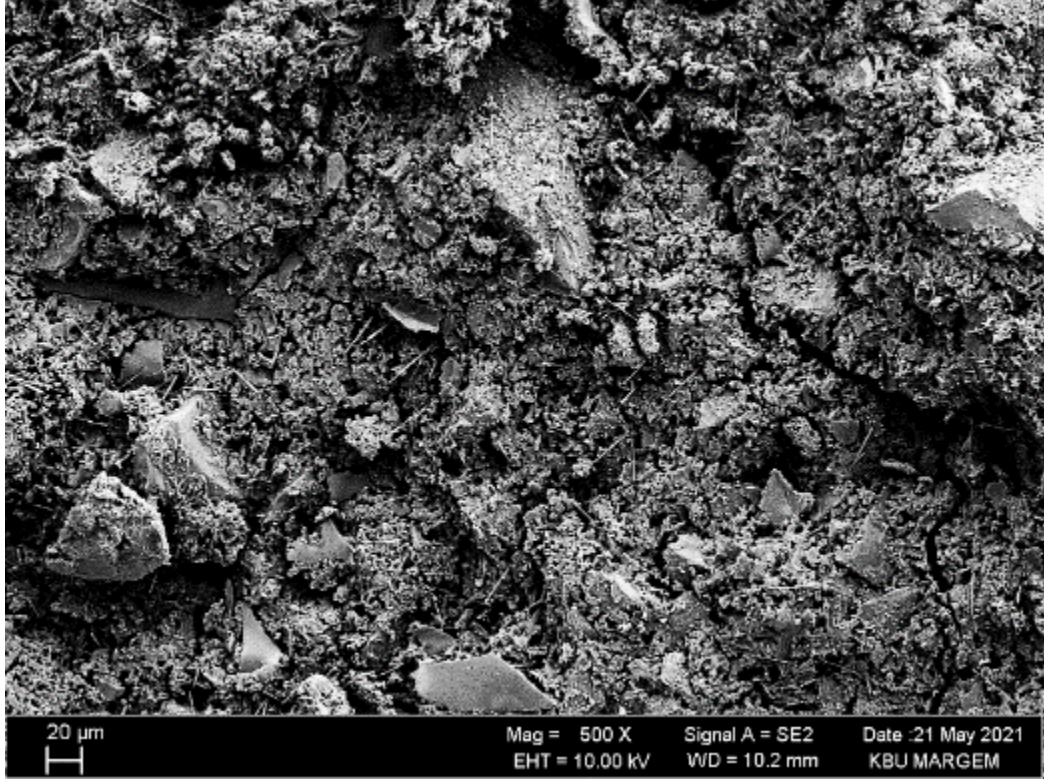
Şekil 4.12. 1 M derişimdeki aktivatör çözelti ile üretilen numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 4.13'de 6 M NaOH derişimindeki aktivatör çözelti ile üretilen numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Artan aktivatör molaritesi cam tozlarının büyük oranda çözünmesine neden olmuş ve belirgin bir bağlayıcı faz artışı ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte bağlayıcı fazın mikro çatlaklar içerdiği görülmüştür.



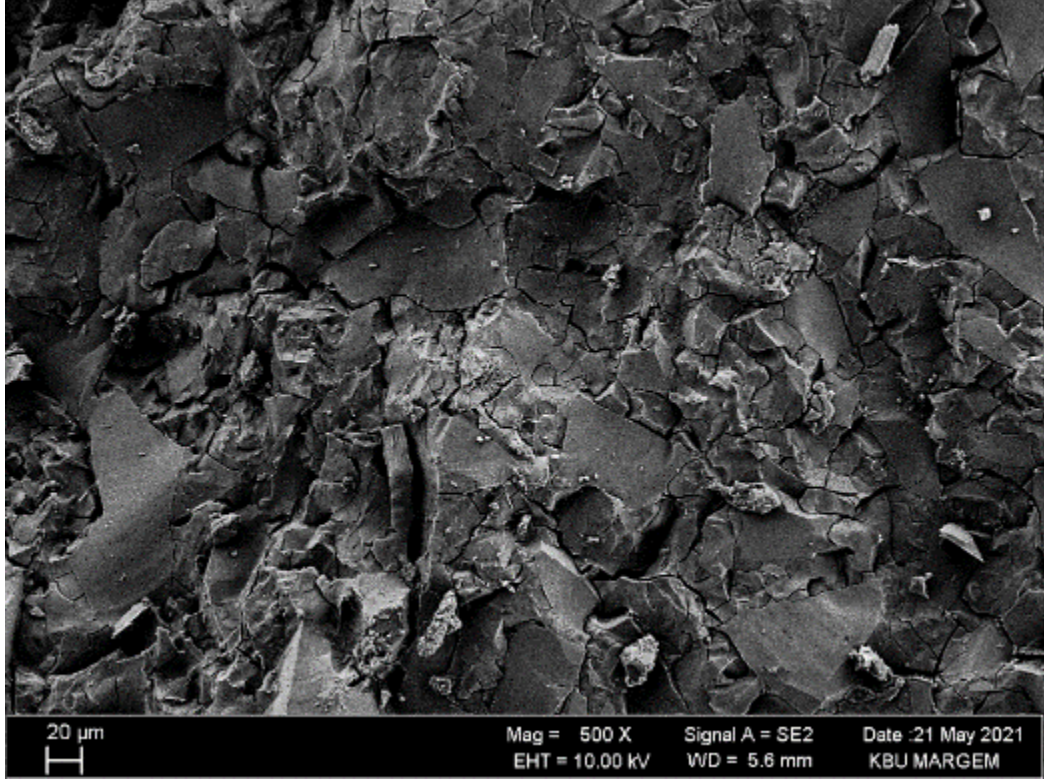
Şekil 4.13. 6 M derişimdeki aktivator çözeltili ile üretilen numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 4.14.'te 10 M NaOH derişimdeki aktivator çözeltili ile üretilen numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Bu numunede yüksek aktivator derişimi nedeni ile cam tozlarının büyük oranda çözüldüğü görülmüştür. Numune bileşiminde bulunan yüksek sodyum hidroksit nedeni ile tepkimeye girmeden kalan sodyum katyonunun karbonasyonu kaynaklı iğnemsî sodyum karbonat oluşumları numune mikroyapısında tespit edilmiştir.



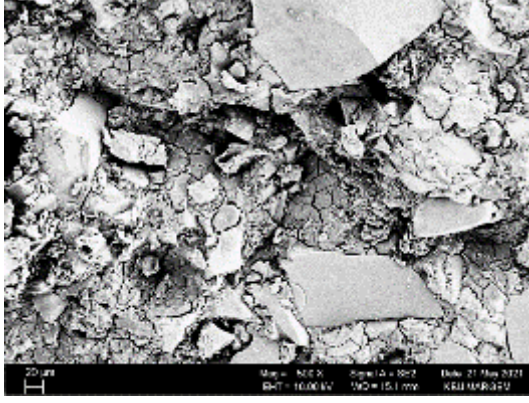
Şekil 4.14. 10 M derişimdeki aktivator çözeltili ile üretilen numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 4.15'te %4 silika ilavesi ile üretilen numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Silika ilavesi numunenin mikroyapısını yoğunlaştırmıştır. Silika ilaveli olmayan numunede görülen çatlaklı bağlayıcı faz yapısı yerini sürekliliği daha yüksek olan ve daha az mikro çatlak içeren bir bağlayıcı faza bırakmıştır. Silis esaslı camlara benzer olarak alkali aktive edilmiş amorf fazın içeriğindeki sodyum katyonunun azalması ve silikanın artmasının yapıda tertahedral birimlerin sürekliliğinin artmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Bununla birlikte yapıya beslenen silis doğrudan bağlayıcı faza dahil olduğundan bağlayıcı yoğunluğunu artırmış olabilir.

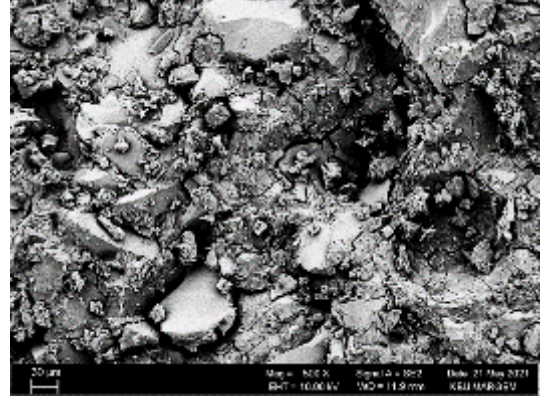


Şekil 4.15. %4 Silika ilavesi ile üretilen numunenin SEM görüntüsü.

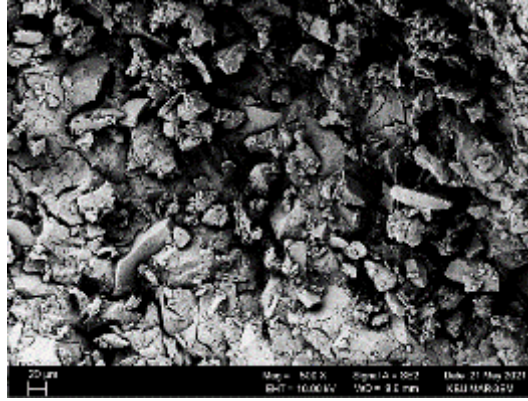
Şekil 4.16’da farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelerin SEM görüntüsü verilmiştir. 0,44 oranında yüksek sıvı nedeni ile daha gevşek paketlenmiş bir mikroyapı görülmüştür (Şekil 4.16c). Azalan aktivatör oranı mikroyapının daha sıkı paketlenmesine neden olmuş ve 0,24 oranında oldukça yoğun bir mikroyapı elde edilmiştir (Şekil 4.16a).



a) 0,24



b) 0,32



c) 0,44

Şekil 4.16. Farklı aktivatör/cam tozu oranı ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri.



## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada cam tozunun alkali aktivasyon sürecine aktivatör çözeltideki NaOH molaritesinin etkisi, karşımı ilave edilen silikanın etkisi, aktivatör/cam tozu oranının etkisi ve uzatılmış kür sürecinin etkisi incelenmiştir.

Basma dayanımı testleri neticesinde farklı molaritedeki NaOH içeren aktivatörler ile üretilen numuneler için en yüksek basma dayanımı 6 M değerinde elde edilmiştir. Sodyum silikat çözeltisi ile karışıma ilave edilen silika basma dayanımı değerini artırmıştır. Basma dayanımı açısından optimum ilave silika katkısı %4 olarak bulunmuştur. Aktivatör/cam tozu oranının numune basma dayanımlarında belirgin etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. En yüksek basma dayanımı değeri 6 Molarite NaOH çözeltisi ile aktive edilen, %4 silika ilavesi içeren ve aktivatör/cam tozu oranı 0,32 olan numunede ~61 MPa olarak ölçülmüştür. Uzatılmış kür, numunelerin basma dayanımını genel olarak artırmıştır. Optimum bileşimdeki numune basma dayanımı uzatılmış kür ile ~80 MPa değerine ulaşmıştır.

Numunelere yapılan XRD analizleri tüm numunelerin amorf yapıda olduğunu göstermiştir. FTIR analizleri aktivatör çözeltideki artan NaOH molaritesi ile numunelerdeki tepkimeye girmeden kalan cam tozu kaynaklı Si-O-Si piklerinin zayıfladığını göstermiştir. İlave edilen silika katkısı ile tepkimeye girmemiş cam tozu kaynaklı Si-O-Si bağlarını gösteren piklerin şiddetinin arttığı görülmüştür.

Termal analizler numunelerden endotermik bir tepkime ile ~90-100 °C sıcaklık aralığında fiziksel suyun uzaklaştığını, artan sıcaklıkla beraber de yapılan ölçüm aralığı boyunca numunelerin dehidroksilasyon nedeni ile kütle kaybetmeye devam ettiğini göstermiştir.

SEM analizleri numunelerin son üründe tepkimeye girmeden kalan cam tozları ve bunu saran alkali aktivasyon neticesinde oluşmuş bağlayıcı fazdan oluşan bir mikroyapıya sahip olduğunu göstermiştir. Mikroyapıdaki tepkimeye girmeden kalan cam tozlarının artan aktivatör molaritesi ile birlikte azaldığı görülmüştür. Numunelere yapılan silika katkısı bağlayıcı fazın sürekliliğini artırarak daha az mikroçatlak içeren bir mikroyapıya neden olmuştur. Karışımda azalan aktivatör çözelti oranı bileşenlerin daha sıkı paketlenmesini sağladığından numunelerde daha yoğun mikroyapılar oluşmuştur.

Çalışma sonuçları cam tozlarının uygun bileşimlerde alkali aktivasyonu ile çevreci ve yüksek performanslı yapı malzemelerinin geliştirilebileceğini göstermektedir. Alkali aktive edilmiş cam tozunun beyaz renk ve yarı geçirgen optik davranış gibi sahip olduğu estetik özellikleri ile gelecekte çeşitli prekest mimari yapı malzemelerinde kullanılabileceği düşünülmektedir. Şekil 5.1’de bu çalışmadaki üretim süreçleri ve optimum bileşime sahip bağlayıcı ve renkli kum dolgusu karışımı ile üretilen bir terrazzo numunesi verilmiştir. Bağlayıcının daha iyi tanınması ve mühendislik uygulamalarında güvenle kullanılabilmesinin önünün açılabilmesi için, sonraki çalışmalarda alkali aktive cam tozu ve çeşitli agregaların uzun süreli etkileşimleri üzerine araştırmalar yapılması önerilmektedir.



Şekil 5.17. Alkali aktive cam tozu ve renkli kum dolgusu ile üretilen terrazzo numunesi.

## KAYNAKLAR

Allahverdi, A., Mehrpour, K., and Kani, E. N., “Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzonal in production of geopolymer cement”, *Ceramics Silikaty*, 52(1): 16-23 (2008).

Annakoa, M. A. I., “Geopolimer betonda cam tozu kullanımının araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu, 7-8 (2019).

Aouan, B., Alehyen, S., Fadil, M., EL Alouani, M., Khabbazi, A., Atbir, A. and Taibi, M., “Compressive strength optimization of metakaolin-based geopolymer by central composite design, *Chemical Data Collections*, 31: 100636 (2021).

Bakharev, T., Sanjayan, J. G., and Cheng, Y. B., “Alkali activation of Australian slag cements”, *Cement and Concrete Research*, 29(1): 113-120 (1999).

Barbosa, V., MacKenzie, K. and Thaumaturgo, C., “Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers”, *International Journal of Inorganic Material*, 2: 309-317 (2000).

Cihangir, F., “Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufunun Macun Dolguda Bağlayıcı olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 25-26 (2011).

Cyr, M., Idir, R. and Poinot, T., “Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet”, *Journal of Materials Science*, 47: 2782–2797 (2012).

Davidovits, J., “30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs”, *Geopolymer Conference*, Melbourne (2002).

Davidovits, J., “Geopolymer Chemistry & Applications 2nd ed.”, *Institut Geopolymere*, France, 0-587 (2008).

Davidovits, J., “Geopolymer chemistry and sustainable development. The poly(sialate) terminology :a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry” *Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions*, 9-15 (2005).

Davidovits, J., “Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers.”, *J. Ceram. Sci. Technol*, 8: 335-350 (2017).

Davidovits, J., “Mineral polymers and methods of making them”, *US Patent*, 4349386 (1982).

Davidovits, J., “Properties of geopolymer cements.”, *First international conference on alkaline cements and concretes*, Kiev (1994).

Elibol, C., “Alkalilerle Aktive Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 54-55 (2012).

El-Naggar, M., El-Dessouky, M., “Re-use of waste glass in improving properties of metakaolin-based geopolymers: Mechanical and microstructure examinations”, *Construction and Building Materials*, 132: 543-555 (2017).

Erdoğan, S. T., “Use of Perlite to Produce Geopolymers”, *31st Cement and Concrete Science Conference Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials*, United Kingdom, 1-4 (2011).

He, P., Jia, D. and Wang, S., “Microstructure and integrity of leucite ceramic derived from potassium-based geopolymer precursor”, *Journal of The European Ceramic Society*, 33: 689-98 (2013).

İnternet: Geopolymer Institute, “70,000 tonnes Geopolymer Concrete for airport.”, <https://www.geopolymer.org/news/70000-tonnes-geopolymer-concrete-airport/> (2022).

İnternet: Watershed Materials, “Watershed Materials Develops Technology to Produce Beautiful, Sustainable Masonry with Less Cement Using Recycled Materials.”, <https://watershedmaterials.com/> (2022).

Jansen, M., “Effect of Water-Solids Ratio on the Compressive Strength, Degree of Reaction and Microstructural Characterization of Fly Ash-Waste Glass-Based Geopolymers”, Yüksek Lisans Tezi, *University of Minnesota*, Minnesota, 1-112 (2017).

Jin, W., “Inorganic binders employing waste glass”, *US Patent*, 6,296,699 (2001).

Kaya, M., “Farklı Tür Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 145-152 (2016).

Kuenzel, C., Grover, L. M., Vandeperre, L., Boccaccini, A. R. and Cheeseman, C. R., “Production of nepheline/quartz ceramics from geopolymer mortars”, *Journal of The European Ceramic Society*, 33: 251-258 (2013).

Li, C., Sun, H., and Li, L., “A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements”, *Cement and Concrete Research*, 40(9): 1341-1349 (2010).

Moutaoukil, G., Alehyen, S., Sobrados, I., Fadıl, M. and Taıbı ,M., “Optimization of compressive strength of fly ash-based geopolymers using central composite design.” *Bull Mater Sci*, 44: 138 (2021).

- Nazari, A. and Sanjayan, J. G., “Synthesis of geopolymer from industrial wastes”, *Journal of Cleaner Production*, 99: 297-304 (2015).
- Novais, R.M, Ascensão, G., Seabra, M. P. and Labrincha, J.A., “Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers”, *Waste Management*, 52: 245–255 (2016)
- Rajesh, D. V. S. P., Narender Reddy, A., Venkata Tilak, U. and Raghavendra, M., “Performance of alkali activated slag with various alkali activators”, *International Journal of Innovative Research, Engineering and Technology*, 2(2): 378-386 (2013).
- Ramujee, K. and Potharaju, M., “Abrasion resistance of geopolymer composites”, *Procedia Materials Science*, 6: 1961-1966 (2014).
- Shi, Z., Shi, C., Wan, S., Li, N. and Zhang, Z., “Effect of alkali dosage and silicate modulus on carbonation of alkali-activated slag mortars”, *Cement and Concrete Research*, 113: 55-64 (2018).
- Si, R., Dai, Q., Guo, S. and Wang, J., “Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder”, *Journal of Cleaner Production*, 242(118502): 1-12 (2020).
- Soliman, N. A. and Tagnit-Hamou, A., “Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap”, *Construction and Building Materials*, 139: 374-383 (2017).
- Tashima, M. M., Soriano, L., Borrachero, M. V., Monzó, J., Cheeseman, C. R. and Payá, J. “Alkali activation of vitreous calcium aluminosilicate derived from glass fiber waste”, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(3): 83-93 (2012).
- Tchadjié, L. N., Djobo, J. N. Y., Ranjbar, N., Tchakouté, H. K., Kenne, B. D., Elimbi, A. and Njopwouo, D., “Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis”, *Ceramics International*, 42(2): 3046-3055 (2016).
- Topçu, İ. B. ve Toprak, M. U., “Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2): 153-164 (2009).
- Torres-Carrasco, M., Puertas, F., “Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterization”, *Journal of Cleaner Production*, 90: 397-408 (2015)
- Uygun, F., “Seramik çamurunda kullanılan silikat içeriğinin döküm özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 29-34 (2011).
- Vafaei, M and Allahverdi, A., “High strength geopolymer binder based on waste-glass powder.”, *Advanced Powder Technology*, 28: 215–222 (2017).

Vaitkevičius, V., Šerelis, E. and Hilbig, H., “The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, 68: 102-109 (2014).

Van Jaarsveld, J., Van Deventer, J. and Lukey, G., “The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers”, *Materials Letters*, 57: 1272-1280 (2003).

Vaou, V. and Papias, D., “Thermal insulating foamy geopolymers from perlite”, *Minerals Engineering*, 23(14): 1146-1151 (2010).

Widayanti, A., Soemitro, R. A. A., Suprayitno, H. and Ekaputri, J. J., “Characterization and compressive strength of fly ash based-geopolymer paste”, *MATEC Web of Conferences*, 195(01023): 1-11 (2018).

Yadollahi, M. M., Benli, A. and 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).

Zhang, B., MacKenzie, K. and Brown, I., “Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate”, *Journal of Materials Science*, 44: 4668–4676 (2009).

## ÖZGEÇMİŞ

Merve CİVELEKOĞLU 2013 yılında Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde lisans eğitimine başladı ve 2017 yılında ise mezun oldu. 2018 yılında Karabük Üniversitesinde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2019 yılında Karabük ilinde ERSOYLAR ÇELİK HASIR firmasında üretim mühendisi olarak görev aldı. 2020 yılında Karabük DOFER YAPI MALZEMELERİ firmasında 2 yıl üretim mühendisi olarak çalıştı. 2022 yılı mayıs ayından itibaren ise KARDEMİR A.Ş. Demiryolu Tekerleri Üretim Tesisinde işletme mühendisi olarak görevine devam etmektedir.