



Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Mortars in Thermal Curing Environment

Mustafa KOP^{1*} , Salih YAZICIOĞLU² 

¹National Defense University, Turkish Military Academy, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

¹Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 16/03/2023
Revision: 22/05/2023
Accepted: 13/06/2023

Keywords

Geopolymer
Blast Furnace Slag
Fly Ash
Sodium Silicate
Sodium Hydroxide

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/03/2023
Düzeltilme: 22/05/2023
Kabul: 13/06/2023

Anahtar Kelimeler

Geopolimer
Yüksek Fırın Cürufu
Uçucu Kül
Sodyum Silikat
Sodyum Hidroksit

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study; geopolymer mortars with different molarities containing high furnace slag, fly ash, and hybrid mixtures were investigated for their mechanical and microstructural properties under thermal curing conditions. / Bu çalışmada; yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit karışımlar içeren farklı molaritelere sahip geopolimer harçların ısı kütür koşulları altında mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır.

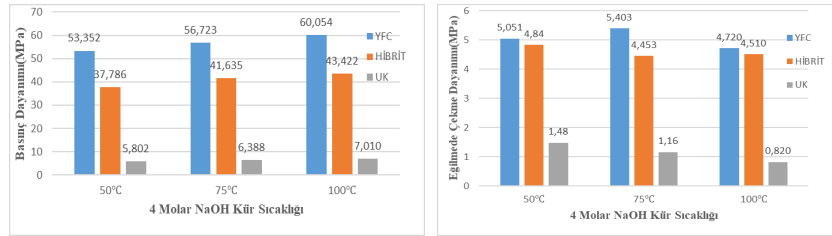


Figure A: Flexural and compressive strength at different curing conditions with 4 molar NaOH concentration / **Şekil A:** 4 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kütür şartlarındaki basınç ve eğilmede çekme dayanımı

Highlights (Önemli noktalar)

- Effect of thermal curing on the mechanical and microstructural properties of geopolymer mortars / Isıl kütürün geopolimer harçlarda, mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi
- The mechanical and microstructural properties of low molarity geopolymer mortars / Düşük molariteli geopolimer harçların mekanik ve mikroyapı özellikleri
- The mechanical and microstructural properties of high furnace slag, fly ash, and hybrid geopolymer mortars / Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit geopolimer harçların mekanik ve mikroyapı özellikleri

Aim (Amaç): The aim of this study is to determine the mechanical properties of fly ash and high furnace slag-based geopolymer mortars under thermal curing conditions. / Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçların ısı kütür ortamında mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): In this study, the mechanical and microstructural properties of geopolymer mortars with high furnace slag and fly ash additives were determined under different curing temperatures using 4M, 8M, and 12M NaOH (Sodium Hydroxide) and Na₂SiO₃ (Sodium Silicate) as alkali activators. / Bu çalışmada alkali aktivatör 4M, 8M, 12M NaOH ve Na₂SiO₃ (Sodyum Silikat) kullanılarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer harçların farklı sıcaklıklarda ısı kütür ortamında mekanik ve mikroyapı özellikleri belirlenmiştir.

Results (Bulgular): The average flexural strength of the samples produced with 4M NaOH, Na₂SiO₃ and blast furnace slag was 5.4 MPa and the compressive strength was 60.05 MPa. / 4M NaOH, Na₂SiO₃ ve yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerin ortalama eğilmede çekme dayanımı 5,4 MPa ve basınç dayanımı 60.05 MPa sonuçları elde edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): The compressive strengths of the specimens increased with the increase in curing temperature, but in general, their flexural tensile strengths decreased. It has been observed that the compressive and flexural strengths of the samples produced with fly ash are quite low compared to the blast furnace slag. / Kütür sıcaklığının artmasıyla numunelerin basınç dayanımları artmıştır, ancak genel olarak eğilmede çekme dayanımları azalmıştır. Uçucu kül ile üretilen numunelerde basınç ve eğilmede çekme dayanımları yüksek fırın cürufuna göre oldukça düşük olduğu görülmüştür.



Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Mortars in Thermal Curing Environment

Mustafa KOP^{1*} , Salih YAZICIOĞLU²

¹National Defense University, Turkish Military Academy, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

¹Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 16/03/2023
Revision: 22/05/2023
Accepted: 13/06/2023

Keywords

Geopolymer
Blast Furnace Slag
Fly Ash
Sodium Silicate
Sodium Hydroxide

Abstract

As a result of the clinker production of cement, CO₂ emission, which harms the nature and causes global warming, occurs. For this reason, studies continue on the production of geopolymer mortar by using mineral additives instead of Portland cement in order to reduce CO₂ emissions. In this study, 4M, 8M, 12M NaOH and Na₂SiO₃ (Sodium Silicate) were used as alkali activators. The ratio of Na₂SiO₃/NaOH was determined as 2 and kept constant in all experimental series. By producing blast furnace slag, fly ash and 50% hybrid geopolymer mortars from both, curing was carried out in the oven bag at 50 °C, 75 °C, 100 °C for 12 hours. In order to determine the mechanical properties of the samples after curing, flexural and compressive strength and Scanning Electron Microscope (SEM) tests were carried out for microstructure analysis. According to the results obtained, the compressive strength for all samples provided the best performance at 100 °C. The average flexural strength of the samples produced with 4M NaOH, Na₂SiO₃ and blast furnace slag was 5.4 MPa and the compressive strength was 60.05 MPa. It has been observed that the compressive and flexural strengths of the samples produced with fly ash are quite low compared to the blast furnace slag.

Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cüruf Esaslı Geopolimer Harçların Isıl Kür Ortamında Mekanik Özellikleri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/03/2023
Düzeltilme: 22/05/2023
Kabul: 13/06/2023

Anahtar Kelimeler

Geopolimer
Yüksek Fırın Cürufu
Uçucu Kül
Sodyum Silikat
Sodyum Hidroksit

Öz

Çimentonun klinkeri üretimi sonucu, doğaya zarar veren ve küresel ısınmaya neden olan CO₂ salınımı oluşmaktadır. Bu sebeple CO₂ salınımını azaltmak için portland çimentosu yerine mineral katkı malzemeleri kullanılarak geopolimer harç üretimi üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada alkali aktivatör olarak 4M, 8M, 12M NaOH ve Na₂SiO₃ (Sodyum Silikat) kullanılmıştır. Na₂SiO₃/NaOH oranı 2 olarak belirlenip bütün deney serilerinde sabit tutulmuştur. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve her ikisinden %50 oranında hibrit geopolimer harçlar üretilerek 12 saat süresince fırın torbası içerisinde 50 °C, 75°C, 100°C etüvde kür uygulaması yapılmıştır. Kür uygulaması sonucunda mekanik özelliklerini belirlemek için numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımı, mikroyapı analizleri için ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün numuneler için basınç dayanımı 100 °C'de en iyi performansı sağlamıştır. 4M NaOH, Na₂SiO₃ ve yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerin ortalama eğilmede çekme dayanımı 5,4 MPa ve basınç dayanımı 60.05 MPa sonuçları elde edilmiştir. Uçucu kül ile üretilen numunelerde basınç ve eğilmede çekme dayanımları yüksek fırın cürufuna göre oldukça düşük olduğu görülmüştür.

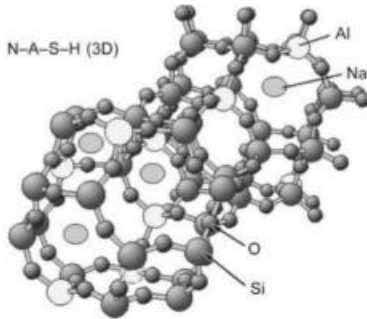
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, çimento endüstrisinin çevreye verdiği zararlar önemli bir küresel endişeye yol açmıştır [1].

1 ton çimento, üretimi sırasında 1 ton CO₂ üretir [2–5]. CO₂, üretiminin her kilogramı için yaklaşık 0,66–0,82 kg ölçen ve küresel ısınmaya yol açabilecek ve dolayısıyla çevresel durumu etkileyebilecek zararlı

bir sera gazıdır [6-7]. Dünya çapındaki yıllık çimento üretimi, yılda %5 artışla 2050 yılında yaklaşık 4,38 milyar ton olacağı düşünülmektedir [8]. Bu nedenle portland çimentosunun yerine alternatif bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir. Geopolimerler, farklı türden mineral katkı malzemeleri kullanılarak harç ve beton formülasyonu için geniş çapta araştırmalar yapılmıştır [9-13].

Geopolimerler yarı kristal veya amorf yapıya ve inorganik polimerik malzeme türüdür. Geopolimer malzemelerin üretimi için, yüksek oranda silisyum ve alüminyum oksit içeren alüminosilikat malzeme ve Na (sodyum) veya K (potasyum) silikatlar ve hidroksitlerin alkali çözeltisi olarak kullanılır. Geopolimerler ilk olarak, termoset polimerlere göre sıcaklığa daha dayanıklı alternatifler olarak geliştirilmiştir ancak günümüzde çeşitli uygulamalarla inşaat malzemeleri olarak da geliştirilmektedir [14]. Alkali aktivasyon teknolojisi 1908'de Kuhl tarafından tanıtılmıştır [15]. Geopolimer kompozitlerin özellikleri ve dayanıklılığı bazen Portland çimentosundan elde edilenlerden bile daha iyidir [16]. Yüksek basınç dayanımı, oligomerlerin birbirine bağlı yapısı ile ilişkilidir [17-18]. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi alüminat ve silis içeriği zengin olan malzemeler alkali aktivasyon ile birlikte ortaya çıkan temel reaksiyon, amorf yapıdaki N-A-S-H alkali alüminosilikat hidrattır. Silisyum ve alüminyum düzgün dört yüzlü yapı şeklindeki rastgele dağılımı ürünün üç boyutlu yapısını oluşturmaktadır. N-A-S-H jeline ait üç boyutlu görünüm Şekil 1'de verilmiştir.[19]



Şekil 1. N-A-S-H jeline ait üç boyutlu görünüm

[20] (Three dimensional view of N-A-S-H gel)

Uçucu kül, kömürle çalışan termik santrallerin yan ürünlerinden biridir. Bu atık malzemenin bileşimi,

kömür kaynağına ve yakma koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Uçucu külün kimyasal bileşimi, kristalin ve cam fazların içerikleri ve parçacık boyutu dağılımı, ön maddenin reaktivitesini ve alkali çözeltilerdeki çözünürlüğünü belirleyen faktörlerdir. Geopolimerin mikro yapısı ise, özellikle partikül inceliği, amorf fazın bileşimi ve oksitlerin içeriği gibi faktörlerden etkilenmektedir. Yüksek fırın cürufu, demir cevherinin eritilmesiyle bir yan ürün olarak ortaya çıkar. Bu malzeme, mineral bağlayıcıların üretiminde kullanılan kalsiyumca zengin bir hammaddedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, gehlenit ve akermanit gibi bileşenlerin oldukça camsı fazların bir karışımını içermektedir. [21].

Genel olarak geopolimer malzemelerde yeterli mukavemet artışını sağlamak için tipik bir fırın kullanılarak 6-48 saat aralığında ve 40-90 °C arasında değişen sıcaklıklarda ısıtma uygulanır [22]. Yazıcı ve Karagöl yapmış oldukları çalışmada 90°C ve 72 saat ısı küründe NaOH ve Na₂SiO₃ alkali aktivatörlerin birlikte kullanımının erken yaş dayanımını artırdığını belirtmişlerdir [23]. Danial Nasr v.d. yapmış oldukları çalışmada kür şartlarının ve alkali aktivatör yoğunluklarının (su, ısıtma ve çevresel kurlama), alkali aktif cüruf harçlarının ısıtma direnci özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, alkali aktivatörünün oranları ne olursa olsun su ve çevresel kurlama koşullarına kıyasla, ısıtma kurlama yüksek sıcaklıkların etkisiyle alkali aktif cüruf harçlarının basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur [24].

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzemeler (Materials)

Geopolimer harç numunelerinin üretimi için Çayırhan Termik Santraline ait uçucu kül ve Karçimsa'ya ait yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan mineral esaslı bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel analizleri Tablo 1 ve 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Uçucu kül (Çayırhan) [25] ve yüksek fırın cürufu (Karçimsa) kimyasal özellikleri (Fly ash (Çayırhan) and blast furnace slag (Karçimsa) chemical properties)

Bileşen(%)	Uçucu kül	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	50.98	33.48
Al ₂ O ₃	13.11	8.93
Fe ₂ O ₃	9.74	1.25
S+A+F	73.83	43.66
CaO	11.82	34.47
MgO	3.91	8.30
Na ₂ O	2.71	0.32
K ₂ O	1.91	0.84
SO ₃	3.94	0.83
K.K	0.86	-
Cl-	0.014	0.016

Tablo 2. Uçucu kül (Çayırhan) [25] ve yüksek fırın cürufu (Karçimsa) fiziksel özellikleri (Fly ash (Çayırhan) and blast furnace slag (Karcimsa) physical properties)

	Uçucu kül	Yüksek Fırın Cürufu
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.36	2.83
Özgül Yüzey (Blaine, cm ² /g)	2754	4125

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak NaOH ve 2 modül Na₂SiO₃ solüsyonu karışımları kullanılmıştır. Kullanılan NaOH'in CAS No: 1310-73-2 olup kimyasal özellikleri Tablo 3'te

verilmiştir. Deney serilerinde standart CEN kumu ve Ankara şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 3. Sodyum hidroksit kimyasal özellikleri (Sodium hydroxide chemical properties)

NaOH	≥% 99.0
Na ₂ CO ₃	% 0.3
NaCl	% 0.02
Fe	15 ppm
SiO ₂	% 0.01
NaSO ₄	% 0.002
Molar Kütlesi	40 g/mol

2.2. Geopolimer Harçların Hazırlanması (Preparation of Geopolymer Mortars)

Geopolimer harç numunelerin hazırlanmasında alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ karışımları kullanılmış olup bağlayıcı olarak da yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit karışımlar oluşturulmuştur. 1 gün önceden laboratuvar ortamında hazırlanan NaOH solüsyonunun molaritesi 4M, 8M ve 12M olarak numune karışımlarına eklenmiştir ve Na₂SiO₃/NaOH oranı 2 alınarak bütün serilerde sabit tutulmuştur. Tablo 4'te belirtilen NaOH katı haldeki ağırlığıdır. Geopolimer harçları sentezlemek için su/bağlayıcı oranı 0.40'ta sabit tutulurken aktivatör/bağlayıcı değişkenlik göstermektedir. Deney numuneleri TS EN 196-7'ye [26] uygun olarak her deney serisi için 3 adet numune 40x40x160 mm³ kalıplarda hazırlanmıştır. Kalıplardan çıkarılan numuneler Şekil 2'de görüldüğü gibi fırın torbası içerisinde 12 saat süresince 50 °C, 75°C, 100°C etüvde kür uygulanmıştır. Karışım oranlarına ait çizelge tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 2. Deney numuneleri (40mm*40mm*160mm) (Testing specimens (40mm*40mm*160mm))

Tablo 4. Geopolimer harç karışım oranları (Geopolymer mortar mixing ratios)

YFC (g)	UK (g)	Kum (g)	Molarite	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	Su / Bağlayıcı	Su (g)	Na ₂ SiO ₃ / NaOH
450	0	1350	4	28,8	57,6	0,4	180	2
225	225	1350	4	28,8	57,6	0,4	180	2
0	450	1350	4	28,8	57,6	0,4	180	2
450	0	1350	8	57,6	115,2	0,4	180	2
225	225	1350	8	57,6	115,2	0,4	180	2
0	450	1350	8	57,6	115,2	0,4	180	2
450	0	1350	12	86,4	172,8	0,4	180	2
225	225	1350	12	86,4	172,8	0,4	180	2
0	450	1350	12	86,4	172,8	0,4	180	2

Isıl kür işleminin ardından aynı gün içinde oda sıcaklığına gelen 40x40x160 mm³ boyutundaki sertleşmiş numuneler Şekil 3'te görüldüğü gibi eğilmede çekme ve basınç dayanımları TS EN 196-1'e (2016) [27] göre belirlenmiştir. TS EN 196-1

standardında belirtilen deney yöntemleri doğrultusunda, harçların basınç dayanımı deneyinde yükleme hızı 2400 N/sn, eğilmede çekme dayanımı deneyinde ise yükleme hızı 50 N/sn olarak kullanılmıştır [27].



Şekil 3. Basınç ve eğilmede çekme deneyi, eğilme deneyi sonucu numuneler (Compressive and flexural tensile testing, appearance of specimens after flexural testing)

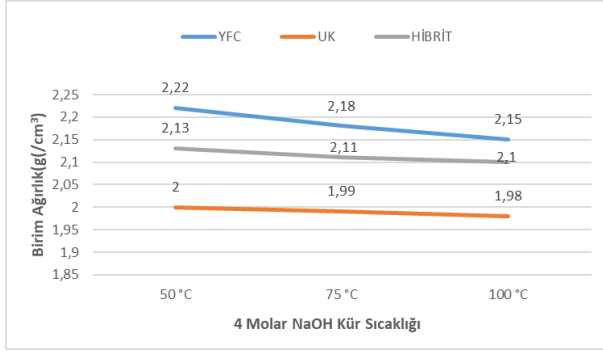
3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Birim Ağırlık (Unit Weight)

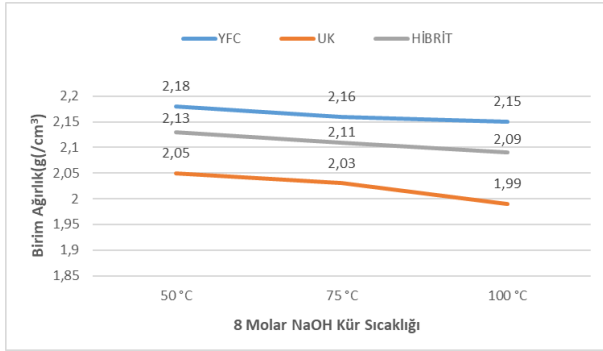
Geopolimer harç numunelerinin birim ağırlıkları, yapılan çalışma sonucunda 1,98-2,22 g/cm³ aralığında hesaplanmıştır. Yüksek fırın cürufu katkılı geopolimer harçların uçucu kül içeren

geopolimer harçlardan daha yüksek birim ağırlıklara sahip olduğu görülmüştür. Bu farklılık, yüksek fırın cürufunun daha yüksek özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, geopolimer harçların birim ağırlıklarında çok çarpıcı farklılıklar gözlemlenmesinde daha yüksek

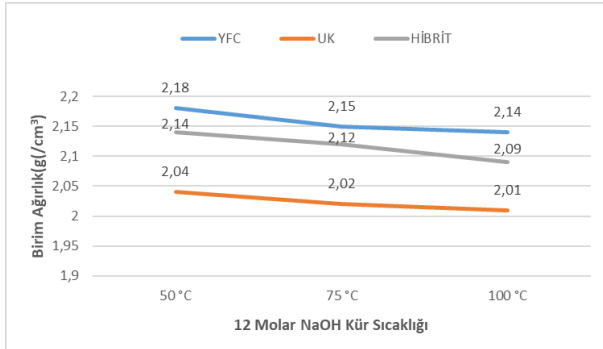
sıcaklıklarda uygulanan kürde bir miktar birim ağırlıklarda düşüş görülmüştür. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da, geopolimer harçların birim ağırlıkları verilmiştir.



Şekil 4. 4 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki birim ağırlıklar (Unit weights at different curing conditions with 4 molar NaOH concentration)



Şekil 5. 8 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki birim ağırlıklar (Unit weights at different curing conditions with 8 molar NaOH concentration)



Şekil 6. 12 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki birim ağırlıklar (Unit weights at different curing conditions with 12 molar NaOH concentration)

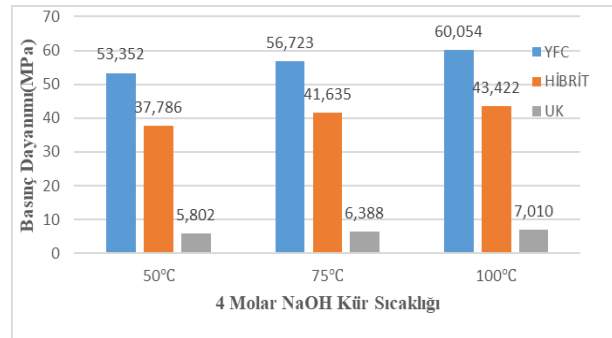
3.2. Basınç Dayanımı (Compressive Strength)

Farklı molaritede, kür koşullarında ve farklı malzeme türlerine ait basınç dayanımları Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 3,4,5 incelendiği zaman basınç dayanımı açısından en iyi sonuçlar yüksek fırın cürufu geopolimer harç için,

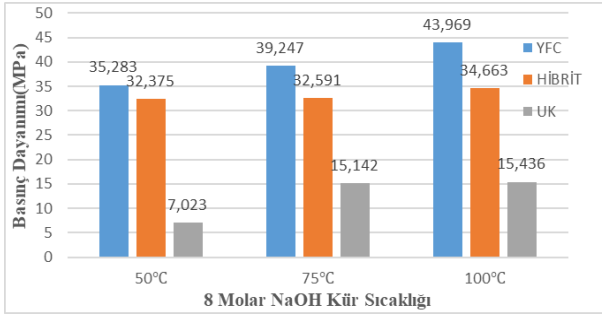
100 °C'de 4 molar NaOH konsantrasyonunda 60,054 MPa, hibrit geopolimer harç için 100 °C'de 4 molar NaOH konsantrasyonunda 43,422 MPa ve uçucu küllü geopolimer harç için 100 °C'de 8 molar NaOH konsantrasyonunda 15,436 MPa ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıkta ısıl kür ve düşük molariteli geopolimer harçlar basınç dayanımına olumlu katkılar sağlamıştır. Yaprak, H.; Kaplan, G yapmış oldukları araştırmada da benzer sonuçlar gözlemlenmiştir [28].

Düşük molariteli NaOH kullanımı, geopolimer harçların düşük porozite ve yüksek bağlanma gücüne sahip olmalarına ve dolayısıyla daha yüksek dayanıma sahip olmalarına yol açmaktadır. Bu durum, malzemenin mekanik özelliklerinin artırılması açısından önemlidir. Düşük molariteli NaOH kullanımı ayrıca daha düşük kür sıcaklıklarında bile yeterli reaksiyon hızını sağlar. Yüksek dayanımın ana nedeni, alüminosilikatik malzemenin, düşük molariteli NaOH kullanımıyla daha fazla oligomer oluşturmasıdır. Yüksek molariteli NaOH kullanıldığında ise daha az oligomer oluşumu gerçekleşmektedir. Oligomerler, malzemenin sertleşmesinde önemli bir rol oynar ve yüksek dayanımı sağlar [29].

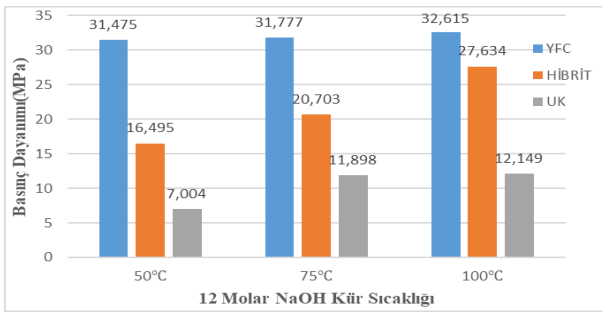
Yüksek fırın cürufu, uçucu küllü karşılaştırıldığında daha yüksek miktarda silika ve alüminyum oksit içerir. Bu nedenle, yüksek fırın cürufu içeren geopolimerler, daha fazla Si-O-Si ve Al-O-Al bağları oluşturabilirler, bu da daha güçlü bir yapı oluşturur. Ayrıca, yüksek fırın cürufu, uçucu küllü karşılaştırıldığında daha yüksek kalsiyum oksit içerir. Kalsiyum oksit, su ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksit oluşturabilir, bu da geopolimerizasyon sürecini hızlandırır ve daha hızlı bir sertleşme sağlar. Bu faktörler, yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimerlerin genellikle daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğunu göstermektedir [30-31].



Şekil 7. 4 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki basınç dayanımı (Compressive strength at different curing conditions with 4 molar NaOH concentration)



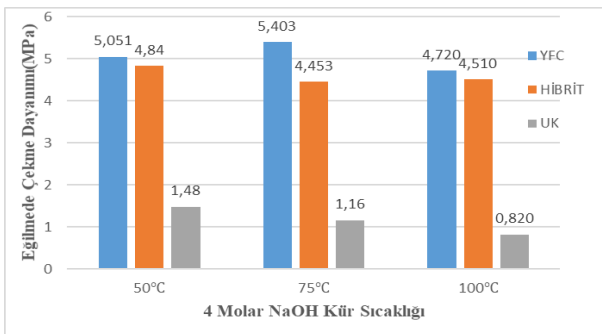
Şekil 8. 8 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki basınç dayanımı (Compressive strength at different curing conditions with 8 molar NaOH concentration)



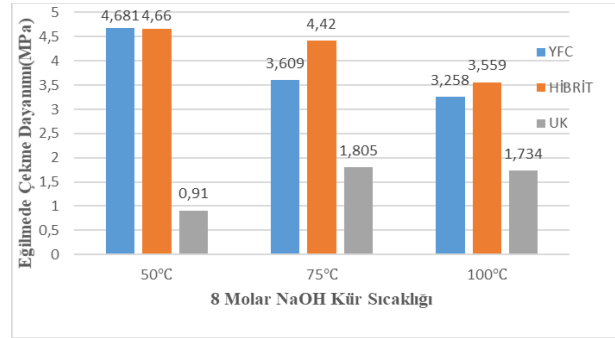
Şekil 9. 12 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki basınç dayanımı (Compressive strength at different curing conditions with 12 molar NaOH concentration)

3.3. Eğilmede Çekme Dayanımı (Flexural Tensile Strength)

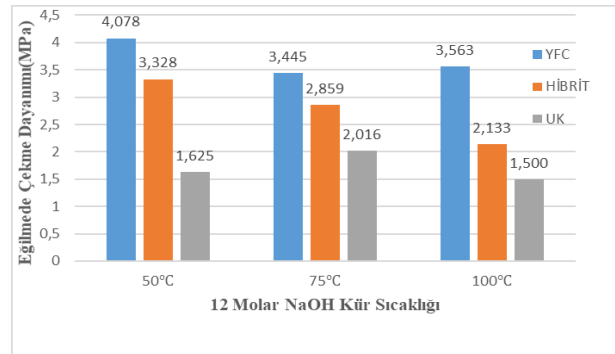
Farklı molaritede, kür koşullarında ve farklı malzeme türlerine ait eğilmede çekme dayanımları Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 6,7,8 incelendiği zaman eğilmede çekme dayanımı açısından en iyi sonuçlar yüksek fırın cürüflü geopolimer harç için, 75 °C’de 4 molar NaOH konsantrasyonunda 5,403 MPa, hibrit geopolimer harç için 50 °C’de 4 molar NaOH konsantrasyonunda 4,84 MPa ve uçucu küllü geopolimer harç için 75 °C’de 12 molar NaOH konsantrasyonunda 2,016 MPa ölçülmüştür.



Şekil 10. 4 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki eğilmede çekme dayanımı (Flexural strength at different curing conditions with 4 molar NaOH concentration)



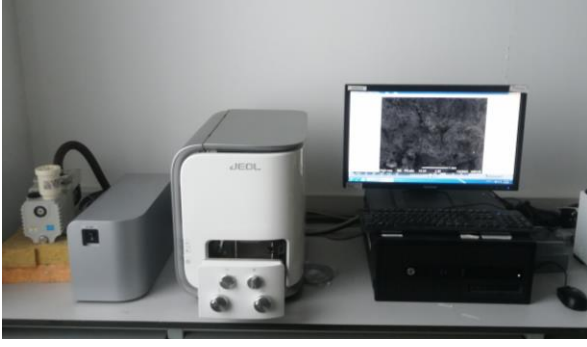
Şekil 11. 8 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki eğilmede çekme dayanımı (Flexural strength at different curing conditions with 8 molar NaOH concentration)



Şekil 12. 12 molar NaOH konsantrasyonlu farklı kür şartlarındaki eğilmede çekme dayanımı (Flexural strength at different curing conditions with 12 molar NaOH concentration)

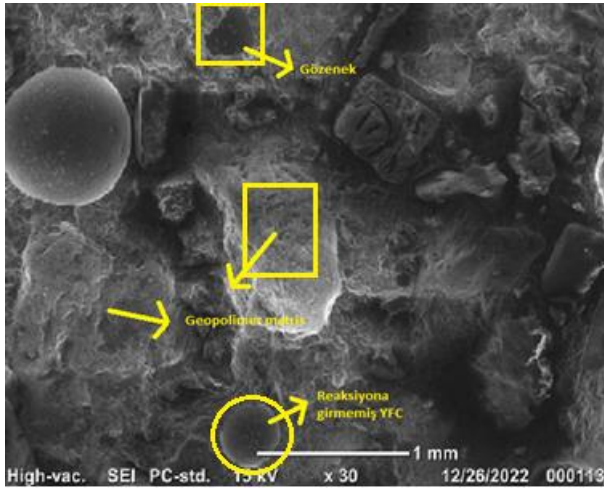
3.4. Mikroyapı Deneyi (Microstructure Analysis)

8 molar derişimlerle hazırlanan geopolimer harçların 100°C’de ısıl kür sonrasındaki mikroyapı analizleri (SEM) deneyi yapılmıştır. Ayrıca yüksek performans sağlayan 100°C’de ısıl kür uygulanmış 4 molar derişimli yüksek fırın cüruf katkılı geopolimer harcında mikroyapı analizi yapılmıştır. SEM analizleri Şekil 13’de görüldüğü gibi JEOL(JCM-6000) marka taramalı elektron mikroskopunda yapılmıştır. Uçucu kül içerikli geopolimer harçların, yüksek fırın cürufu ve hibrit içerikli geopolimer harçlara göre daha gözenekli yapıya sahip olduğu ve çukurların oluştuğu görülmüştür. Uçucu kül içerikli geopolimer harçlarda jel fazları belli bölgelerde oluştuğu ve diğer bölgelerde tepkimeye girmeyen uçucu kül tanelerinin olduğu ve jel fazlarının net olarak oluşmadığı görülmüştür [32].

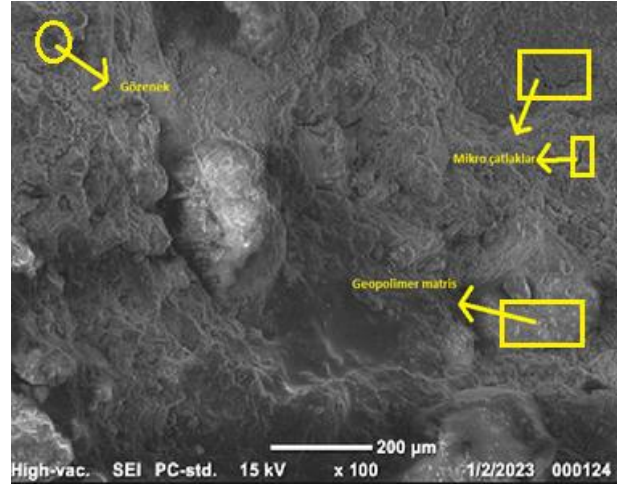


Şekil 13. JEOL Taramalı Elektron Mikroskobu (JEOL Scanning Electron Microscope)

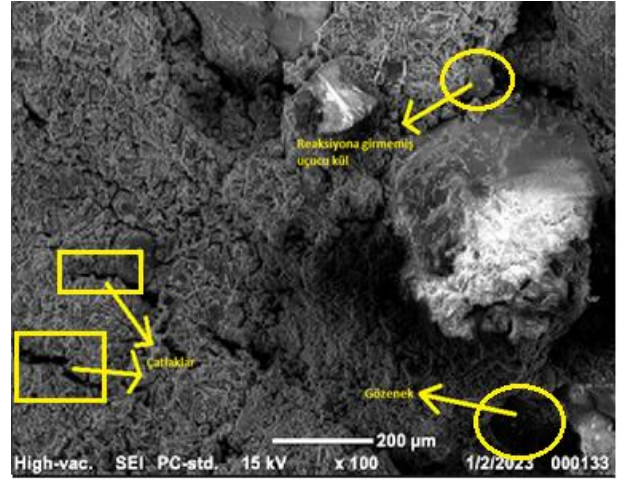
Şekil 14, 15, 16, 17’de yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit geopolimer harçlara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 14 ve Şekil 15’de yüksek fırın cürufuna ait geopolimer harçların SEM görüntülerinde daha az gözenek ve boşluklar oluşmuştur ve geopolimer matris oluşumu uçucu küle oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle yüksek fırın cürufu harçlarda mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 16’da Uçucu kül ait SEM görüntüsü incelendiğinde çatlakların, gözeneklerin ve tepkimeye girmemiş uçucu kül tanelerinin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca jel oluşumunun meydana geldiği ve bu jelin üzerinde çöken kalıntıların olduğu görülmüştür [32].



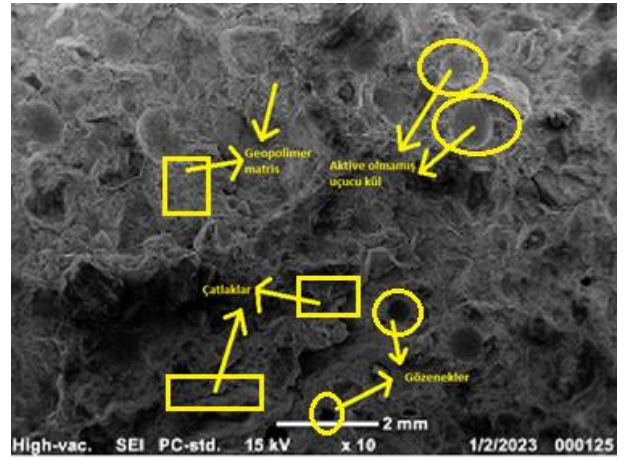
Şekil 14. 4 molar NaOH yüksek fırın cürufu geopolimer harç SEM görüntüsü (SEM image of blast furnace slag based geopolimer mortar with 4 molar NaOH concentration)



Şekil 15. 8 molar NaOH yüksek fırın cürufu geopolimer harç SEM görüntüsü (SEM image of blast furnace slag based geopolimer mortar with 8 molar NaOH concentration)



Şekil 16. 8 molar NaOH uçucu küllü geopolimer harç SEM görüntüsü (SEM image of fly ash based geopolimer mortar with 8 molar NaOH concentration)



Şekil 17. 8 molar NaOH hibrit geopolimer harç SEM görüntüsü (SEM image of hybrid geopolimer mortar with 8 molar NaOH concentration)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve hibrit karışimli geopolimer harçların mekanik özellikleri ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

- Düşük molariteye sahip olan yüksek fırın cürufu ve hibrit geopolimer harç numunelerin daha yüksek basınç ve eğilmede çekme dayanımlara ulaştığı gözlemlenmiştir.
- Isıl kür uygulamasının ve kür sıcaklığının artmasıyla numunelerin basınç dayanımlarının arttığı, ancak genel olarak eğilmede çekme dayanımlarında azalmaların tespit edildiği görülmüştür. Geopolimerlerin ısıl kür sırasında basınç dayanımının artması, polimerizasyon reaksiyonlarının ilerlemesi ve dolayısıyla daha sert bir yapı oluşmasından kaynaklanır. Ancak aynı süreçte, ısıl kürün yüksek sıcaklığı nedeniyle, harç içinde oluşabilecek mikro çatlaklar veya diğer yapısal kusurlar artar. Bu da eğilme ve çekme dayanımını azaltabilir. Yani, sıcaklık arttıkça, harçtaki polimerizasyon reaksiyonları daha hızlı ilerlerken, yapısal kusurlar da artar ve bu da eğilme ve çekme dayanımını düşürür [33].
- Bütün deney serilerinde yüksek fırın cürufu geopolimer harçların uçucu küllü geopolimer harçlara göre daha yüksek basınç ve eğilmede çekme dayanımlarına ulaşılmıştır. Yüksek fırın cürufu ve hibrit geopolimer harçlar ve betonlar taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılması uygun olacağı değerlendirilmektedir.
- Uçucu kül içerikli geopolimer harçlar düşük dayanımlar sağlamasına karşın hibrit geopolimer harçlar mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuçlar sergilediği görülmüştür. Bu kapsamda atık olarak elde edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu külün hibrit kullanımı uygun olacağı değerlendirilmektedir.
- Yüksek fırın cürufu ve hibrit karışimli geopolimer harçlar SEM analizlerinde uçucu küllü geopolimer harçlara göre geopolimer matrislerin yoğun bir şekilde olduğu gözlemlenmiştir ve gözeneklerin daha az olduğu görülmüştür.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mustafa KOP: Literatür taramasını, deneylerin yapımını, sonuçların analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Literature review, conducting experiments, analyzing results, and paper composition.

Salih YAZICIOĞLU: Literatür taramasını, sonuçların analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Literature review, analyzing results, and paper composition.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N.B. Singh, B. Middendorf Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview Construct. Build. Mater. 237 (2020), Article 117455.
- [2] I. Balcır, T. Korim, A. Dobrdi, Correlation of strength to apparent porosity of geopolymers Understanding through variations of setting time, Constr. Build. Mater. 93 (2015) 983–988.
- [3] C. Un, J. Sanjayan, R. San Nicolas, J. van Deventer, Predictions of long-term deflection of geopolymer concrete beams, Constr. Build. Mater. 94 (2015) 10–19.
- [4] P.K. Sarker, R. Haque, K.V. Ramgolam, Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete, Mater. Des. 44 (2013) 580–586.
- [5] F. Okoye, J. Durgaprasad, N. Singh, Mechanical properties of alkali activated fly ash/Kaolin based

- geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 685–691.
- [6] B. Joseph, G. Mathew, Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete, *Sci. Iran.* 19 (5) (2012) 1188–1194.
- [7] L.K. Turner, F.G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, *Constr. Build. Mater.* 43 (2013) 125–130.
- [8] C. Gunasekara, D.W. Law, S. Setunge, J.G. Sanjayan, Zeta potential, gel formation and compressive strength of low calcium fly ash geopolymers, *Constr. Build. Mater.* 95 (2015) 592–599.
- [9] P. Nuaklong, K. Janprasit, P. Jongvivatsakul Enhancement of strengths of high-calcium fly ash geopolymer containing borax with rice husk ash J. *Build. Eng.* (2021), Article 102762.
- [10] Lam, T. V., & Vu, K. D. Influence of NaOH-concentration and blast-furnace-slag on the properties of geopolymer mortars. *Magazine of Civil Engineering*, 115(7), (2022) 146–158.
- [11] Huseien G.F., Mirza J., Ismail M., Hussin M.W. Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash *Construction and Building Materials*, (2016) 125 , pp. 1229-1240.
- [12] Tole I, Rajczakowska M, Humad A, Kothari A, Cwirzen A. Geopolymer Based on Mechanically Activated Air-cooled Blast Furnace Slag. *Materials* (Basel, Switzerland), (2020) 13(5).
- [13] Inti, S., Sharma, M. & Tandon, V. Influence of Curing on the Properties of Geopolymer Mortar Made with Low Molarity Sodium Hydroxide. *Transp. in Dev. Econ.* (2017) 3, 11.
- [14] Mohd Salahuddin, M.B.; Norkhairunnisa, M.; Mustapha, F. A review on thermophysical evaluation of alkali-activated geopolymers. *Ceram. Int.* 41, (2015) 4273–4281.
- [15] J.L.Provis, Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? *Mater Struct*, 47(1-2)(2014) 11-25.
- [16] Bakri, A.M.; Kamarudin, H.; Binhussain, M.; Nizar, I.K.; Rafiza, A.R.; Zarina, Y. Comparison of Geopolymer Fly Ash and Ordinary Portland Cement to the Strength of Concrete. *Adv. Sci. Lett.*, 19, (2013) 3592–3595.
- [17] Duxson, P.; Fernández-Jiménez, A.; Provis, J.L.; Lukey, G.C.; Palomo, A.; Van Deventer, J.S.J. Geopolymer technology: The current state of the art. *J. Mater. Sci.*, 42, (2007) 2917–2933.
- [18] Andini, S.; Cioffi, R.; Colangelo, F.; Grieco, T.; Montagnaro, F.; Santoro, L. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. *Waste Manag.*, 28, (2008) 416–423.
- [19] Palomo, A., Alonso, S., Fernández-Jiménez, A., Sobrados, I., Sanz, J., Alkaline activation of fly ashes: a NMR study of the reaction products, *Journal of American Ceramics Society*, 87 (2004) 1141-1145.
- [20] Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindapasirt P., *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, (2016) 852p.
- [21] Coppola, L.; Bellezze, T.; Belli, A.; Bignozzi, M.C.; Bolzoni, F.; Brenna, A.; Cabrini, M.; Candamano, S.; Cappai, M.; Caputo, D.; et al. Binders alternative to Portland cement and waste management for sustainable construction—Part 1. *J. Appl. Biomater. Funct. Mater* 16, (2018) 186–202.
- [22] Chindapasirt, P. Challenge of Adopting Relatively Low Strength and Self-cured geopolymer for Road Construction Application: A Review and Primary Laboratory Study. *Int. J. Pavement. Eng.* (2019) 1–15.
- [23] Yazıcı, N; Karagöl, F; Examination of Mechanical and Durability Properties of Fly Ash Based and Slag Added Geopolymer Concretes. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), (2022) 1592 – 1606.
- [24] Nasr, D., Pakshir, A. H., & Ghayour, H, (2018). The Influence of Curing Conditions and Alkaline Activator Concentration on Elevated Temperature Behavior of Alkali Activated Slag (AAS) Mortars. *Construction and Building Materials* 190, (2018) 108–119.
- [25] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. Ve Yeğinobalı, A., Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, 2003.

[26] TS EN 196-7, "Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 7: Çimentodan Numune Alma ve Numune Hazırlama Yöntemleri", TSE, 2010.

[27] TS EN 196-1, 2016. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, TSE-Turkey.

[28] Yaprak, H., & Kaplan, G., Farklı Kür Koşullarının Taban Külü Katkılı Geopolimerlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Tübvav Bilim Dergisi*, 9(3), (2016) 41-51.

[29] Ionescu BA, Chira M, Vermesan H, et al. Influence of Fe₂O₃, MgO and Molarity of NaOH Solution on the Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. *MATERIALS*. (2022) 15(19):6965.

[30] Yaprak H, Alnkaa A, Memis, et al. Effects of different curing conditions on the properties of geopolymeric mortar. *MOJ Civil Eng.* 5(1), (2019) 45-50.

[31] Yilmazoglu, A, Yildirim, ST, Behçet, ÖF, Yıldız, S. Performance evaluation of fly ash and ground granulated blast furnace slag-based geopolymer concrete: A comparative study. *Structural Concrete*. (2022) 23: 3898– 3915.

[32] Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator, *Cement and Concrete Research*, 35, (2016) 1984-1992.

[33] Mo, B. H., Zhu, H., Cui, X. M., He, Y., & Gong, S. Y. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied clay science*, 99, (2014) 144-148.