

Makalenin Geliş Tarihi : 20.05.2009
Makalenin Kabul Tarihi : 03.06.2009

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLEN TABAN KÜLLÜ HAFİF HARÇ ÜRETİMİ

İlker Bekir TOPÇU¹, Mehmet Uğur TOPRAK²

ÖZET: Çalışmada Termik Santral taban külünün (TK) alkalilerle aktive edilerek hafif harç üretiminde kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öğütülmüş TK sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) alkali çözeltileri kullanılarak 4x4x16 cm boyutlarında çimentosuz harç karışımları üretilmiştir. Numunelere 20 saat 75 °C'de etüvde veya laboratuvarında 20 °C'de havada kür olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. 1, 7 ve 28. günlerde numunelerin birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları belirlenmiştir. En uygun numunenin birim ağırlığı 1,59 kg/dm³ ve basınç dayanımı 18,51 MPa, 80 donma-çözülme çevrimi sonucu dayanım kaybı % 11,5 olarak bulunmuş ve numune 400 °C'ye kadar termal stabilitesini korumuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Alkali aktivasyon, Taban külü, Harç, Dayanım, Dayanıklılık.

PRODUCTION OF ALKALI ACTIVATED LIGHTWEIGHT BOTTOM ASH MORTAR

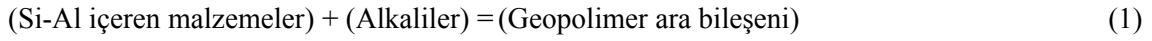
ABSTRACT: In this study it is attempted to use alkali activated thermal power plant bottom ash (BA) in the production of lightweight mortar. Cement-free 4x4x16 cm mortar specimens were produced using grinded BA, alkali mixtures of sodium hydroxide (SH) and sodium silicate (SS). Two different curing types of 20 h curing at 75 °C oven and then air curing at 20 °C air or air curing at 20 °C were carried on the specimens. Unit weight, ultrasound pulse velocity and compressive strengths of the specimens were determined on 1, 7 and 28. days. Average values of the unit weight and compressive strength for the best specimen were 1,59 kg/dm³ and 18,51 MPa respectively. The compressive strength loss of the specimen was only 11,5% after 80 freeze-thaw cycles, and the specimen possessed superior thermal stability up to 400 °C.

KEYWORDS: Alkali activation, Bottom ash, Mortar, Strength, Durability.

^{1,2} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik Kampüsü, 26480 ESKİŞEHİR

I. GİRİŞ

Termik santral taban külü (TK) çimento ve beton standartlarına uygun olmadığı için kullanılamamakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Ayrıca TK'ların taşınması ve depolanması yüksek maliyetler oluşturmaktadır. TK'lar öğütme ile yüksek sıcaklıkta kür uygulanarak, kireç katılarak veya alkaliler kullanılarak aktive edilebilmektedirler. Serbest silis ve alümin içeren malzemelerin sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi alkaliler ile aktivasyonu ile bağlayıcı malzeme üretilebildiği belirtilmektedir. Üretilen bağlayıcı malzeme geopolimer olarak adlandırılmaktadır [1-3]. Geopolimerlerin oluşumunda görülen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir [4].



Görüldüğü gibi geopolimerlerin yapısında su yoktur. Geopolimerlerde karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirlik için kullanılmakta, geopolimerin kür ve kuruması sırasında geopolimer içerisinde süresiz nano boşluklar bırakarak geopolimeri terk etmektedir. Bu durum geopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın dayanımı gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır [5]. Çin'de kullanılan taban külleri genelde F sınıfıdır ve serbest kireç miktarları % 5'in altındadır. Bu taban külleri alkali aktivasyonu ile duvar tuğlası ve harç çimentosu üretiminde 1950'den beri kullanılmaktadırlar [6].

Uçucu küllerin (UK) alkalilerle aktivasyonu ile elde edilen bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonların kuru büzülme değerleri geleneksel betona göre oldukça düşük, donatı ile aderansları ve çevre koşullarına dayanıklılıkları ise oldukça yüksektir. Ayrıca geopolimerlerin önemli avantajları arasında kısa sürede dayanım kazanmaları, dış etkilere dayanıklılıkları, düşük ısı iletkenlikleri ve yüksek hacim stabilitesine sahip olmaları sayılabilir [7, 8]. Alkali aktivasyonu toksik atık ve nükleer kalıntıların, ağır metal iyonlarının stabilizasyonunda da başarıyla kullanılmıştır [9]. Ayrıca uçucu kül gibi silis ve alüminli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu ile üretilen harçlar, çimento harçlarına göre daha hafiftirler ve dayanıklılık özellikleri daha yüksektir [10, 11].

TK'ların alkali aktivasyonu ile bağlayıcı özellikler kazanmaları için 20 °C kür sıcaklığı yeterli olmaktadır. Kür sıcaklıkları 60-100 °C'ye artırıldığında ise birkaç saat içerisinde geopolimerler kalıp alınacak dayanıma ulaşabilmektedir [12, 13]. Bu sıcaklıklar tuğla üretimi için gerekli fırın sıcaklıklarından oldukça düşüktür. Gazbeton üretiminde de otoklav kullanılmakta ve yüksek enerji maliyetleri oluşmaktadır. Bundan dolayı yapı malzemesi üretiminde alkalilerin bağlayıcı olarak kullanılmaları önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayacaktır. Ayrıca çimento yerine alkalilerin bağlayıcı olarak kullanılması ile çimento tüketimi azalacağı için çimento üretiminde açığa çıkan CO₂ miktarı da azalacaktır. Böylece çimento üretiminden oluşan çevre kirliliği de önlenmiş olacaktır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada öğütülmüş termik santral taban külü (Blain: 4000 cm²/g, Özgül ağırlık: 2,21) ve iki farklı alkali çözeltisi kullanılarak oluşturulan karışımlar 4x4x16 cm boyutlarındaki harç kalıplarına dökülmüştür. Numunelere 20 saat 75 °C'de etüvde kür ve sonrasında 20 °C'de havada kür veya 20 °C'de havada kür olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. Numunelerde 1, 7 ve 28. günlerde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları hesaplanmış, sonuçlar yorumlanarak hafif yapı malzemesi üretimi için en uygun karışım belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılan Seyitömer Termik Santrali taban külünün özellikleri Tablo 1'de, malzeme miktarları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Seyitömer Termik Santrali TK'sının Özellikleri

Kimyasal Birleşim (%)	Taban Küllü
Al ₂ O ₃	18,76
Fe ₂ O ₃	9,57
SiO ₂	51,51
CaO	5,08
MgO	0,93
P ₂ O ₅	0,07
K ₂ O	2,56
Na ₂ O	0,52
SO ₃	0,007
Cl	0,005
LOI	10,85

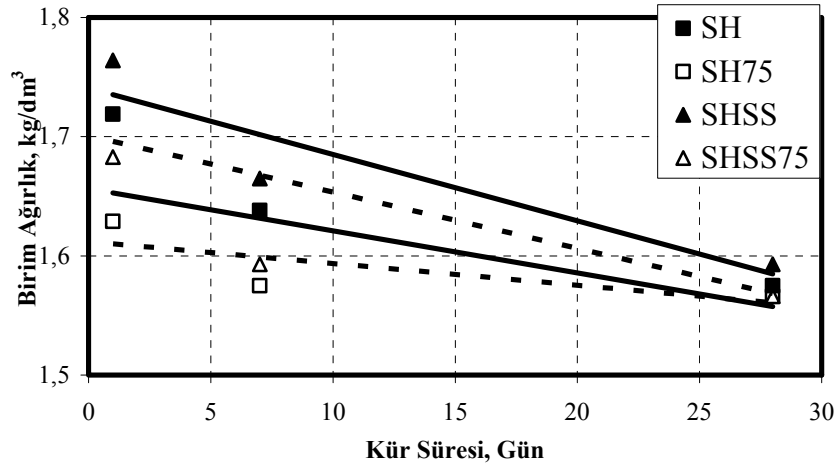
Alkalilerden, sodyum hidroksit (SH) % 98 saflıktadır. Sodyum silikat (SS) ise Şişecam Soda Fabrikası ürünü olup % 8,9 Na₂O, % 28,7 SiO₂ ve % 64,8 H₂O içermektedir. Karışımlarda su miktarı ayarlanırken SHSS kodlu karışımda kullanılan 150 g SS çözeltisi içerisinde bulunan 97,2 g su toplam su miktarından düşülmüştür.

Tablo 2. Kullanılan malzeme miktarları (g)

Kod	TK	SH	SS	Su	Kum
SH	450	100	-	225	900
SHSS	450	50	150	225	900

III. DENEY SONUÇLARI

İki ayrı karışımın (SH ve SHSS) iki farklı kür koşulunda (20 ve 75 °C) bekletilmesiyle oluşturulan numunelerin (SH, SH75, SHSS ve SHSS75) 1, 7 ve 28. günlerde birim ağırlıkları, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları hesaplanmış ve bu deney sonuçlarının zamana bağlı değişimi sırasıyla Şekil 1-3 ve Tablo 3-5'te verilmiştir. Ayrıca bu deneyler sonucunda belirlenen en uygun harç numunesinin 28. günde donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklılığı belirlenmiştir.



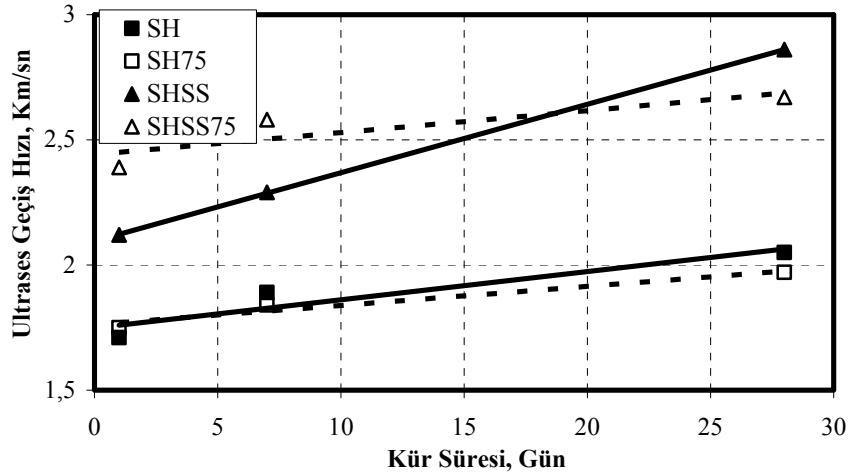
Şekil 1. Birim ağırlığın kür süresi ile değişimi

Şekil 1’de numunelerin birim ağırlıklarının 1,55-1,80 kg/dm³ arasında değiştiği görülmektedir. Deneysel sonuçlarına göre alkali aktivatör olarak SH kullanılan numunelerde birim ağırlıkların SHSS kullanılanlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca bütün numunelerde kurumaya bağlı olarak kür süresi arttıkça numune birim ağırlıkları azalmaktadır. Tablo 3’te birim ağırlık-kür süresi arasında doğrusal bir ilişkisi olmadığı ve korelasyon katsayılarının fırında kür uygulanan numunelerde daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Birim ağırlık-kür süresi doğrusal ilişkisi $y=ax+b$

Katsayılar	SH	SH75	SHSS	SHSS75
a	-0,005	-0,002	-0,006	-0,035
b	1,701	1,612	1,741	1,656
R ²	0,861	0,584	0,847	0,670

Şekil 2’den ultrases geçiş hızı değerlerinin SH numunelerinde 1,71-2,05 km/sn, SHSS numunelerinde 1,76-2,86 km/sn değerleri arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek ultrases geçiş hızı 28 gün 20 °C’de havada bekletilen SHSS numunelerinde elde edilmiştir. Bütün numunelerde ultrases geçiş hızı değerleri zamanla artmaktadır.



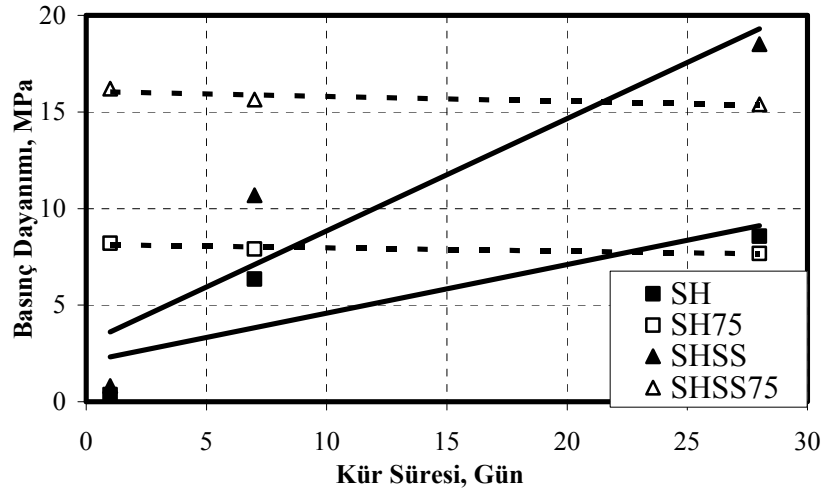
Şekil 2. Ultrases geçiş hızının kür süresi ile değişimi

Tablo 4'te görülebileceği gibi 20 °C'de havada bekletilen numunelerde ultrases geçiş hızlarının kür süresi uzadıkça arttığı, 75 °C'de etüvde bekletilen numunelerde ise kür süresi arttıkça ultrases geçiş hızlarının azaldığı görülmektedir.

Tablo 4. Ultrases geçiş hızı-kür süresi doğrusal ilişkisi $y=ax+b$

Katsayılar	SH20	SH75	SHSS	SHSS75
a	0,011	-0,007	0,037	-0,006
b	1,748	1,939	1,857	2,530
R ²	0,886	0,838	0,919	0,598

Numunelerin farklı kür sürelerinde basınç dayanımı değerleri Şekil 3'te, basınç dayanımı-kür süresi doğrusal ilişkileri Tablo 5'te yer almaktadır. En yüksek basınç dayanımı değerleri öğütülmüş TK'nın SHSS alkali çözeltilisi ile aktivasyonu sonucunda elde edilmiştir. Buradan taban küllerinin alkali aktivasyonunda SS çözeltilisi kullanmanın numunelerin basınç dayanımı artırmada oldukça yararlı olduğu anlaşılmaktadır. Kür süresi uzadıkça fırında 75 °C'de kür uygulanmış numunelerin basınç dayanımları azalırken, havada kür uygulanan numunelerin basınç dayanımları artmıştır. Buradan yüksek sıcaklıklarda kürün numunelerin erken dayanımını artırdığı ancak ileri yaş dayanımlarını olumsuz etkilediği anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Basınç dayanımının kür süresi ile değişimi

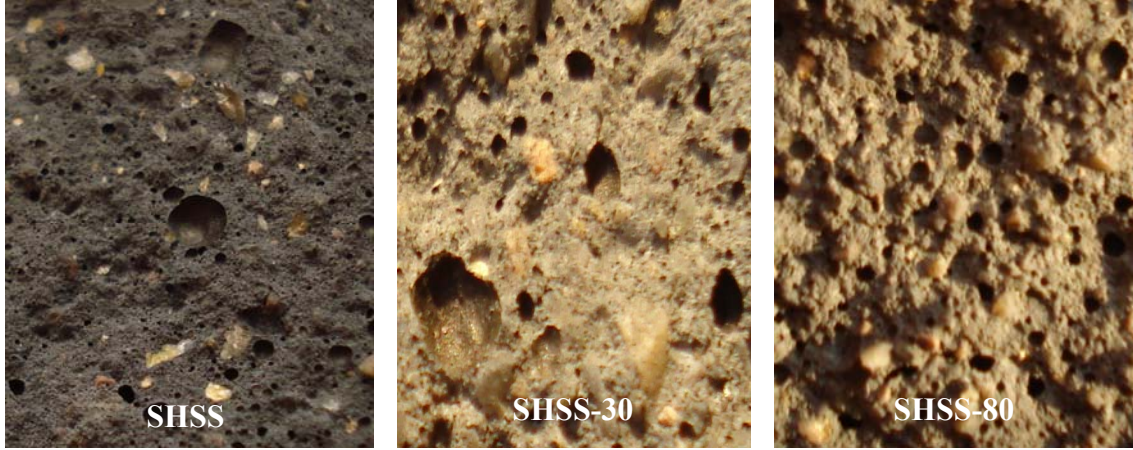
Bütün numunelerde korelasyon katsayıları 0,698 ile 0,843 aralığındadır. TK'nın alkali aktivasyonu ile üretilen harç numunelerinde basınç dayanımı ve kür süresi arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı düşüktür. Bunun nedeni geopolimerlerin ilk gün dayanım kazanma hızının oldukça yüksek olması, ilerleyen günlerde ise yavaşlayarak durmasıdır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda kür uygulanan geopolimerlerde daha belirgindir.

Tablo 5. Bas. Dayanımı-kür süresi doğrusal ilişkisi $y=ax+b$

Katsayılar	SH	SH75	SHSS	SHSS75
a	0,262	-0,017	0,604	-0,026
b	1,825	8,137	2,488	16,058
R ²	0,698	0,843	0,849	0,754

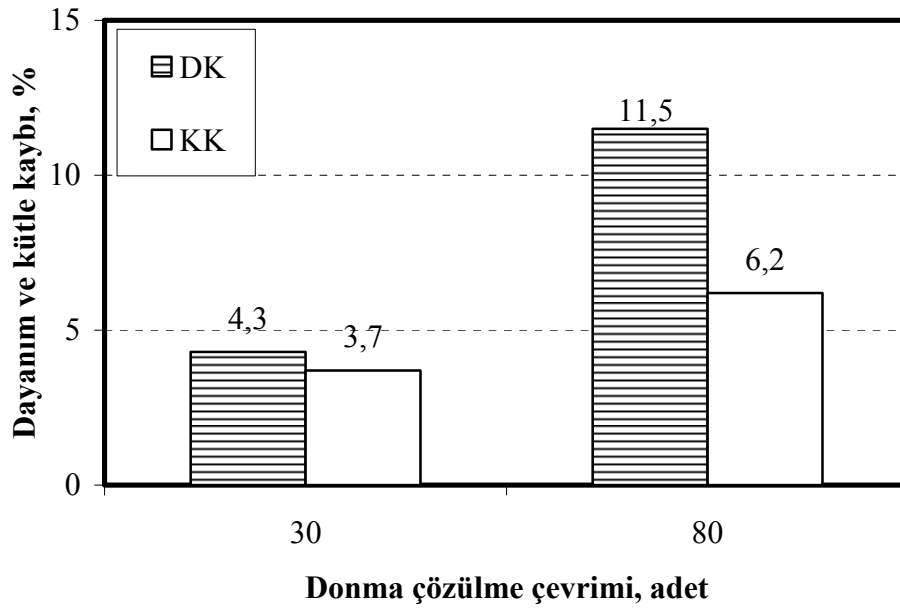
Jonker, uçucu kül, metakaolin, alüminyum tozu sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak elde ettiği geopolimerlerin 1200 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dirençli olduğunu, ısı iletkenlik katsayılarının oldukça düşük ($W/mK=0,2$), aynı zamanda hafif (580 kg/m^3) ve yüksek dayanımlı (13,84 MPa) olduklarını belirtmiştir [14]. Araştırmacılar uçucu küllü geopolimer hamurunun 200-300 °C sıcaklık aralığında % 1 ve 700-800 °C aralığında % 0,6 olmak üzere 800 °C'ye kadar % 1,6 büzülme gösterirken aynı koşullarda karışımlarda kullanılan bazalt agregaların 800 °C'de toplam % 1,5-2,5 genleşme gösterdiğini belirlemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda tutulan geopolimerlerin dayanımlarının arttığı, agrega kullanılan geopolimerlerde ise agregaların yüksek sıcaklıklarda hacimlerinin artması nedeniyle numunelerin basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Bu çalışma yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklı geopolimer üretiminde agrega seçiminin önemini vurgulamaktadır [15].

Deneyler sonucunda en uygun numune SHSS olarak belirlenmiştir. Oda sıcaklığında 28 gün bekletilmiş SHSS numuneleri üzerinde donma-çözülme deneyleri TS EN 12091 standardı dikkate alınarak yapılmıştır. Numunelerin 30 ve 80 donma-çözülme çevrimi sonrasında kütle ve basınç dayanımı kayıpları belirlenmiştir. SHSS numunesinin yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklılık özelliklerini belirlemek amacıyla 400 ve 600 °C sıcaklıkta 3 saat tutulan ve sonra oda sıcaklığına soğutulan numunelerin kütle ve basınç dayanımı kayıpları bulunmuştur. SHSS ve SHSS'nin 30 ve 80 donma-çözülme çevrimi sonrası yüzey fotoğrafları (SHSS, SHSS-30 ve SHSS-80) Şekil 4'te verilmektedir.



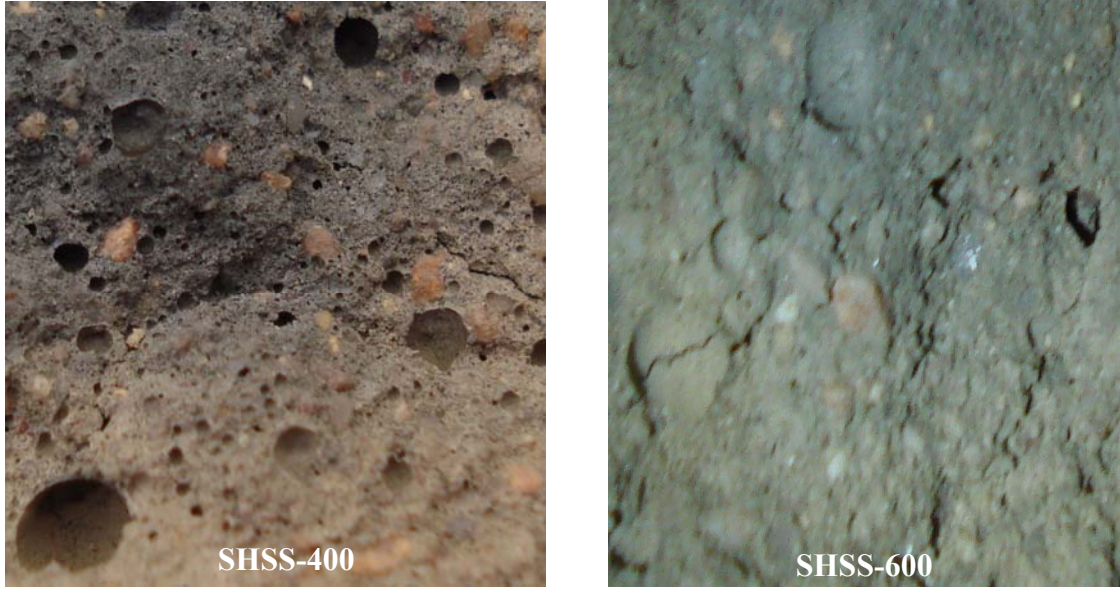
Şekil 4. SHSS, SHSS-30 ve SHSS-80 numuneleri

Şekil 5 incelendiğinde SHSS-30 ve SHSS-80 numunelerinin, SHSS numunesine göre sırasıyla % 3,7, 6,2 kütle kaybı ve % 4,3, % 11,5 dayanım kaybı gösterdiği anlaşılmıştır.



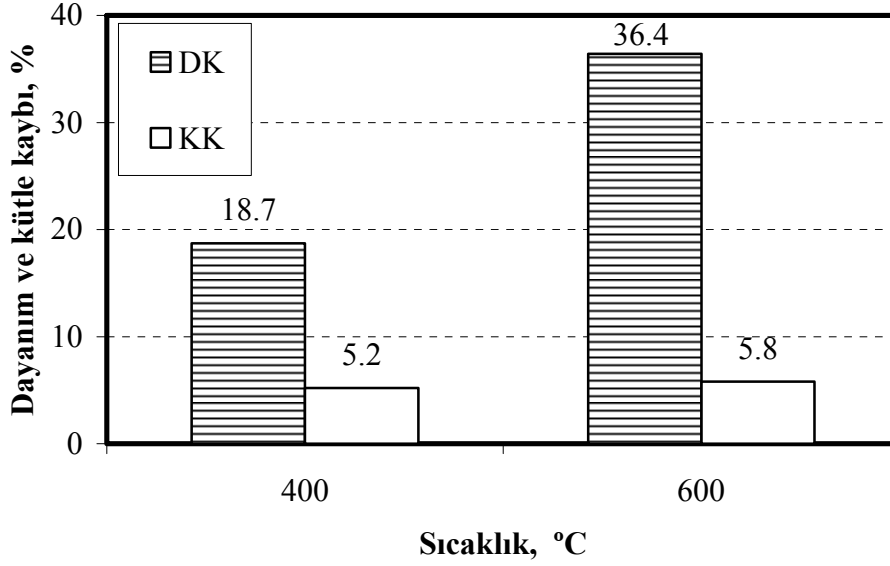
Şekil 5. Dayanım ve kütle kaybı-donma-çözülme ilişkisi

Şekil 6 incelendiğinde her iki sıcaklıkta da çatlakların yüksek sıcaklık etkisinde kalan bölümlerde ve daha belirgin olarak agregalar etrafında yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda agregaların geopolimer hamuruna göre daha fazla genişlediği ve etrafındaki gerilmeleri artırdığı şeklinde yorumlanabilir. Yüzey fotoğraflarından 400 °C’de geopolimer hamurunda çok küçük çatlaklar görülürken 600 °C’de geopolimer hamuru üzerinde oluşan çatlakların genişlik ve derinliğinin arttığı görülmektedir.



Şekil 6. 400 ve 600°C’de tutulan SHSS

Yüksek sıcaklık etkisi ile yapısı bozulan SHSS geopolimer numunesi 400 °C sıcaklıkta pembeleşme 600 °C sıcaklıkta ise grileşme göstermiştir. Şekil 7’den 400 ve 600 °C sıcaklıklarda 3 saat tutulan 28 günlük SHSS numunelerinin kütle kaybı % 5,2 ve 5,8, basınç dayanım kaybı % 18,7 ve 36,4 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar SHSS’nin 400 °C sıcaklığa kadar termal stabilitesini koruduğu göstermektedir. Ancak 600 °C’de geopolimer numunelerinin dayanım kaybının oldukça yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Dayanım ve kütle kaybı-sıcaklık ilişkisi

IV. SONUÇLAR

Çalışmada taşınması ve depolanması oldukça maliyetli olan ve önemli çevre kirliliğine neden olan taban külünün (TK) hızla ekonomiye kazandırılması ve çevre kirliliğinin önlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla TK'nın alkaliler ile aktivasyonu sağlanarak standartlarda beton, tuğla ve gazbeton gibi çeşitli yapı malzemeleri için öngörülen basınç dayanımların üzerinde dayanımlar elde edilebilmiştir. En iyi numune TK'nın sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali çözeltileri ile aktivasyonu ve oda sıcaklığında (20 °C) kür ile elde edilmiştir. Üretilen en iyi harç numunenin (SHSS) birim ağırlığı 1,59 gr/cm³, basınç dayanımı 18,51 MPa ve su emmesi % 6,58 bulunmuştur.

SHSS numunesinin 30 ve 80 donma-çözülme çevrimi sonunda kütle kaybı % 3,7, 6,2 ve dayanım kaybı % 4,3, % 11,5 olarak bulunmuştur. SHSS üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneylerinde numunenin 400 °C sıcaklığa kadar termal stabilitesini koruduğu, 600 °C sıcaklıkta ise dayanım kaybının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Literatüre göre geopolimerler yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklı malzemelerdir. Ancak çalışmamızda kullanılan agregalar genişerek geopolimerin yüksek sıcaklık direncini düşürmüştür. Çeşitli hafif agregalar (zeolit,

genleştirilmiş kil, genleştirilmiş perlit ve pomza) ve TK'nın alkali aktivasyonu ile üretilen geopolimer bağlayıcı karıştırılarak ısı yalıtımı ve yangın direnci yüksek geopolimer yapı malzemeleri üretilmesi önerilebilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] C. Jaturapitakkul and R. Cheerarot, "Development of bottom ash as pozzolanic material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 48-53, 2003.
- [2] P. Chindaprasirta, C. Jaturapitakkul, W. Chaleec and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers", *Waste Management*, Vol. 29, pp. 539-543, 2009.
- [3] Fernandez-Jimenez and A. Palomo, "Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 1984-1992, 2005.
- [4] J. Davidovits, "30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs" *Geopolymer 2002 Conference*, October 2002, Melbourne, Australia, Proceedings, pp. 28-29.
- [5] B.V. Rangan, "Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", Research Report, No. 4, Engineering Faculty, Curtin University of Tech., Perth, Australia, 44 s. 2008.
- [6] Z. Li, Z. Ding and Y. Zhang, "Development of Sustainable Cementitious Materials" *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 2004, Beijing, China, pp. 55-76.
- [7] J.G.S. Jaarsveld, J.S.J. Deventer, "Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash based geopolymers" *Indian Engineering of Chemistry Research*, Vol. 38, No.10 , pp. 3932-3941,1999.
- [8] X. Zhaohui and X. Yunping, "Hardening mechanisms of an alkaline activated class F fly ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1245-1249, 2001.
- [9] R. Cioffi, L. Maffucci and L. Santoro, "Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue", *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 40, pp. 27-38, 2003.

- [10] İ.B. Topçu ve M. Canbaz, “Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçlarda donma-çözülme” *ESOGÜ Müh-Mim Fak. Dergisi*, Cilt 21, No. 2, ss. 1-16, 2008.
- [11] İ.B. Topçu ve U. Toprak, “Alkalilerle Aktive Edilen Uçucu Külle Hafif Tuğla Üretimi”, *4. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, 12-14 Kasım 2008, İstanbul, Türkiye, ss. 38-45.
- [12] T. Bakharev, “Geopolymeric materials prepared using class F fly ash and elevated temperature curing”, *Cem. and Conc. Research*, Vol. 36, pp.1134-1147, 2006.
- [13] K. Komnitas and D. Zaharaki, “Geopolymerization: a review and prospects for the minerals industry”, *Mineral Engineering*, Vol. 20, pp. 1261-1277, 2007.
- [14] A. Jonker, “Insulating Refractory Materials From Inorganic Waste Resources”, Doctor Technologiae, Department of Chemistry, Faculty of Science, Tshwane University of Technology, Tshwane, South Africa, 103 p., 2006.
- [15] D.L.Y. Kong and J. G. Sanjayan, “Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 10, pp. 986-991, 2008.