

KÜTAHYA SEYİTÖMER TERMİK SANTRALİ ATIK UÇUCU KÜLÜNDEN ISI YALITIM ÖZELLİKLİ GEOPOLİMER MALZEME ÜRETİMİ

Uğur KUT^{1*}, İskender IŞIK²

¹ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-1167-4997>

²Kütahya Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Kütahya
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9523-2837>

Anahtar Kelimeler	Öz
Uçucu Kül Geopolimer Gözeneklilik Isı Yalıtımı	<i>Yapılarda kullanılmak üzere, boşluk oranı fazla, yoğunluğu düşük ve nem oranının az olması ile ısı yalıtım anlamında performansı yüksek, üretim aşamasında çevre dostu, büyük miktarlarda enerji tüketilmesi gerekmeyen ve pahalı olmayan bir geopolimer malzeme üretilmesi amaçlanmıştır. Dolayısıyla Seyitömer Termik Santrali kömür uçucu külü (UK) olarak isimlendirilen endüstriyel atık baz malzeme, aktive edici olarak potasyum hidroksit (KOH), köpük oluşturuca ajan olarak metalik alüminyum, viskozitesini etkileyecek olan fumed silika (FS) kullanılarak ısı yalıtımlı geopolimer yapı malzemesi üretilmiştir. Isı yalıtımı anlamında D10 kodlu numunemizin ısı iletim katsayısı 0.085 W/m °K'dir. Gözenek hacim değeri 0.45 cm³, gözenek boyut dağılımı (ortalama) 3.80 nm, özgül yüzey alanı 25.80 m²/g, toplam gözeneklilik (Arşimed) %77.00, su buharı geçirgenliği 3.00 µ, TS EN ISO 11925-2 küçük alev testine (SFI) "B sınıfı" olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, Kütahya Seyit Ömer termik santrali atık uçucu küllerinin (UK) yapılarda ısı yalıtımı için geopolimer malzeme üretiminde kullanılması ekonomi ve teknolojik özellikler bakımından mümkün olacağı saptanmıştır.</i>

THE USE OF SEYİTÖMER THERMAL POWER PLANT WASTE FLY ASH IN THE PRODUCTION OF GEOPOLYMER MATERIALS WITH THERMAL INSULATION

Keywords	Abstract		
Fly Ash Geopolymer Porosity Thermal insulation	<i>In order to be used in buildings, it is aimed to produce a geopolymer material with high void rate, low density and low moisture content, high performance in terms of thermal insulation, environmentally friendly, which does not need to consume large amounts of energy and inexpensive. Therefore, heat insulated geopolymer building material was produced by using Industrial waste base material called coal fly ash of Seyitömer Thermal Power Plant (UK) and, potassium hydroxide (KOH) and sodium silicate as activator, metallic aluminum as foam forming agent and fumed silica (FS). The thermal conductivity coefficient of our D10 coded sample in terms of thermal insulation is 0.085 W / m °K. The results of the study were determined as pore volume value 0.45 cm³, pore size distribution (average) 3.80 nm, specific surface area 25.80 m² / g, total porosity (Archimedes) 77.00%, water vapor permeability 3.00 µ, and TS EN ISO 11925-2 small flame test (SFI) " B class ". As a result, it has been determined in terms of economy and technological features the use of waste fly ash (UK) of Kütahya Seyit Ömer thermal power plant in the production of geopolymer materials for thermal insulation in buildings.</i>		
Araştırma Makalesi	Research Article		
Başvuru Tarihi	: 27.07.2020	Submission Date	: 27.07.2020
Kabul Tarihi	: 25.01.2021	Accepted Date	: 25.01.2021

* Sorumlu yazar; e-posta : ugurkut26@gmail.com



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Türkiye'nin enerji konusunda önceliği; enerjinin etkin ve tasarruflu kullanımı olmalıdır. Etkin kullanım sonucunda sağlanacak enerji tasarrufunun, daha hızlı ve daha ucuza elde edilebilen bir enerji kaynağı olduğu bugün bütün dünyada kabul edilen bir gerçektir (Turan, 1999). Genel olarak, günümüzde kullanılan alışlagelmiş yalıtım malzemelerinde, yalıtımı sağlayan malzemedeki gözeneklerin içinde bulunan havadır. Gözenekli inorganik maddeler, düşük maliyeti, sinterlenmeksizin imalatı, asit direnci, iyi ısı özellikleri ve çevre dostu doğası nedeniyle yaygın olarak ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır. İlk Davidovits tarafından öne sürülen bu geopolimer malzemeler, ortam sıcaklığında ya da biraz üzerinde alkali metal hidroksit, silikat ya da fosforik asit çözeltiler tarafından aktive edilen bir alümina silikat ile sentezlenir (Le-ping, Xue-min, Shu-heng, Jun-li, ve Lin, 2010).

Delair ve diğ. (2012), kararlı sodyum (Na⁺) ve potasyum (K⁺) içeren geopolimer karışıma silika tozu ilavesi ile 0,2 (W/m.°K)'den daha düşük bir ısı iletkenliğe sahip ekolojik bir malzeme üretmişlerdir. Liu, Alengaram, Jumaat ve Mo (2014), sürdürülebilir kalkınma için mevcut yerel atık malzemeler kullanılarak yapısal ve ısı yalıtım hafif geopolimer beton geliştirilmesi üzerinde odaklanmışlardır. Prud'homme ve diğ. (2011), gözenek ve yapı ağı açısından değişiklikleri gerçekleştiren potasyum ya da sodyum kullanılarak çeşitli alkalın elementleri ile köpük sentezi gerçekleştirmişlerdir. Zhang ve diğ. (2014), geopolimerizasyon süreci ve ürünlerin mikro yapısında özellikle mikro yapısal bir seviye ölçüldüğünde reaksiyon prosesinin gelişimine, uçucu kül katkısının etkilerinden bazılarını ortaya koymuşlardır. Phoo-ngernkham, Chindaprasirt, Sata, Hanjitsuwan ve Hatanaka (2014), Nano-SiO₂ ve nano-Al₂O₃ içeren yüksek kalsiyumlu uçucu külden yapılan geopolimer hamur özellikleri ve uygulama çalışması yapmışlardır. Nematollahi ve Sanjayan (2014), UK esaslı geopolimer hamurların hem işlenebilirliği hem de kuvveti üzerinde farklı aktivatörler (NaOH çözeltisi ve Na₂SiO₃/NaOH 2,5 oranı ile çok bileşenli aktivatör) ve mevcut SPs (süper akışkanlaştırıcı) etkisi değerlendirmişlerdir. Henon, Alzina, Absi, Smith, ve Rossignol (2012), viskozite ve çok yoğunluklu tepkimenin rollerini anlayarak gözenekliliği kontrol etmeye çalışmışlardır. Bu işlem sırasında kurutma adımları ve örnek ortamın sıcaklığı, gözenek oluşumunu kontrol etmek için en iyi şartların oluşumu analiz edilmiştir.

Yapılan çalışmada, Seyitömer termik santrali kömür uçucu külü olarak isimlendirilen endüstriyel atık, baz malzeme olarak kullanıldı. Bu nedenle, uçucu kül F sınıfına giren bu atık malzemeyi değerlendirerek,

bileşiminde bulunan kalsiyum elementinin varlığı nedeniyle kısa bir kür süresi ile daha mukavim bir geopolimer ısı yalıtımlı yapı malzemesi üretilmesi hedeflendi. KOH (potasyum hidroksit) aktivatör olarak kullanılmıştır. Köpük oluşturucu ajan olarak da metalik alüminyum kullanıldı. Coquard ve diğ. (2013) tarafından, nanoyapılı silikaların iyi yalıtım özelliklerinin çok küçük gözenek boyutundan kaynaklandığı ve normal ortam koşullarında bile kristalin kuvarsa kıyasla oldukça hızlı hidroksile olduğu Ramyar (2013), ayrıca bazik şartlar altında, matrisine dahil edilen FS'nın içeriğindeki serbest silisyum, su ile oksitlenmesi sonucunda hidrojen gazı oluşumu yoluyla gözeneklilikte ve matrisin kimyasında değişikliklere neden olduğu (Nazari ve Khalaj, 2012; Prud'homme ve diğ., 2010; Wei, Liu, Zhang, Yu, ve Du, 2011) bildirilmesi üzerine değişkenlerden biri olarak Fumed silika kullanıldı. Diğer değişken olarak kür süresi belirlendi.

Elde edilen numunelerin, X-ışınları floresans (XRF) spektroskopisi, ısı iletim ölçüm cihazı kullanılarak ısı iletim değerleri, Brunauer-Emmet-Teller (BET), Fourier Transform Infrared (FT-IR), çevre taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizleri yapıldı. Helyum piknometresi ile gerçek hacim ve gerçek yoğunluk değerleri belirlendi. Termal iletkenlik ölçümü ile ısı iletkenlik değeri belirlendi. Arşimed prensibinden yola çıkarak yoğunluk kiti ile gözenek hacmi bulunarak gözenek ve katı yoğunluk değerleri görünen gözenek ve görünen katı yoğunlukları hesaplandı.

Sonuç olarak, yapılarda kullanılmak üzere, boşluk oranı fazla, yoğunluğu düşük ve nem oranının az olması ile ısı yalıtım anlamında performansı yüksek, üretim aşamasında çevre dostu, büyük miktarlarda enerji tüketilmesi gerekmeyen ve pahalı olmayan bir geopolimer malzeme üretilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.1 Malzemeler

Deneyisel çalışmada, KOH (Sigma-Aldrich, Safılık % ≥86), fumed silika tozu (Sigma-Aldrich, Safılık % 99.8), sodyum meta silikat (Sigma-Aldrich % 49.5 – 52.5 Na₂O), metalik alüminyum tozu (Aldrich Chemistry, Safılık % ≥93), Kütahya'da faaliyet gösteren Seyitömer Termik Santrali'nden alınan ve Tablo 1'de kimyasal bileşimi görülen UK, alüminyum oksit (Tekkim, Safılık % ≥98) kullanılmıştır.

Tablo 1

Kütahya Seyitömer Termik Santrali UK'ün XRF ile Yapılan Kimyasal Analiz Sonucu.

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	TiO ₂	SO ₃
% Ağırlık	50,79	17,42	13,60	6,65	4,97	0,52	1,69	0,34	0,70	2,77

2.2 Geopolimer Sentezi

Denemesi yapılan numunelerin deney prosedürü aşağıda Tablo 2'de görülmektedir. Su/Katı ağırlık oranı 0,50 olarak alınmıştır. Karışımın hazırlanmasında

Kütahya şebeke suyu kullanılmıştır. Na₂SiO₃/KOH molar oranı 2,5; 1,25 ve 0,6 olarak kullanılmıştır. Si/Al molar oranları ise 0,65; 0,85 ve 1,05 olarak çalışılmıştır. Bu şartlar altında yeni reçeteler oluşturulmuştur.

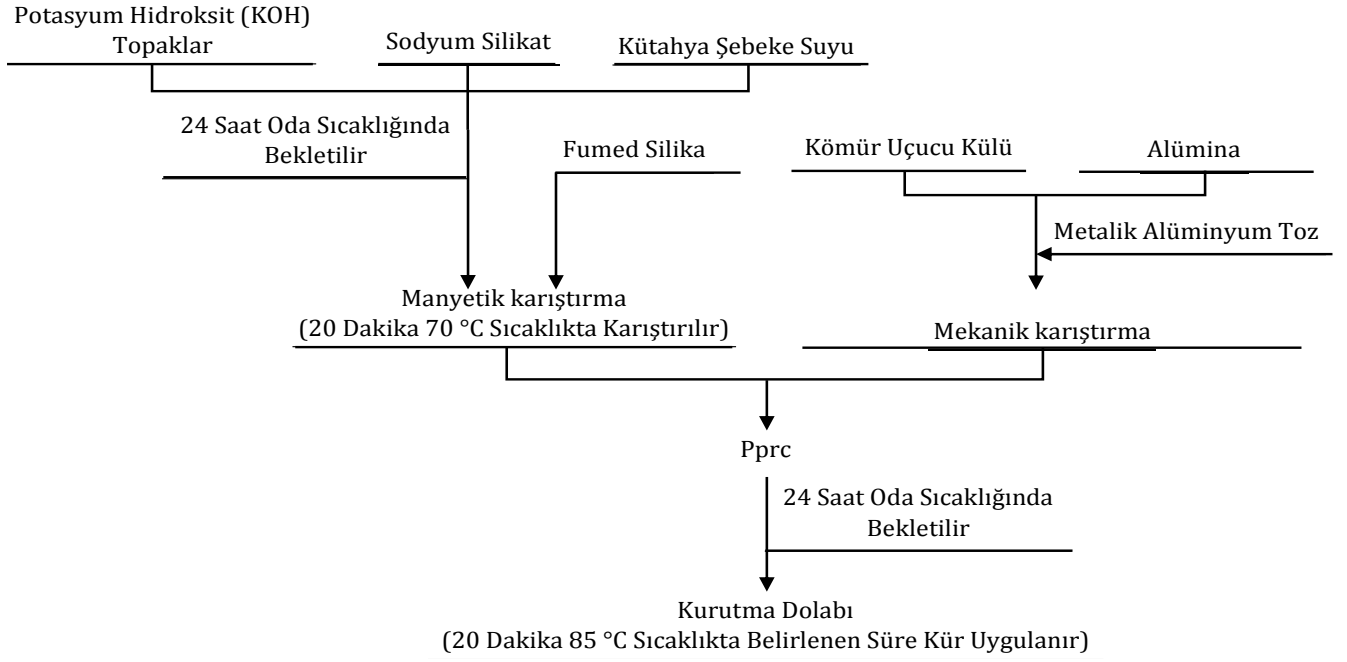
Tablo 2

Deney Prosedürü

Su/Katı (Ağırlık)	0,50									
Na ₂ SiO ₃ /KOH (Molar)	2,5			1,25				0,6		
Si/Al (Molar)	0,65	0,85	1,05	0,65	0,85	1,05	0,65	0,85	1,05	
	% (Ağırlık)									
Potasyum hidroksit	4,45	4,21	3,99	4,58	4,32	4,10	4,65	4,38	4,15	
Sodyum metasilikat	11,13	10,52	9,98	5,72	5,41	5,12	2,90	2,74	2,59	
Fumed silika	7,49	12,50	17,00	10,52	15,50	19,96	12,11	17,07	21,50	
Uçucu kül	63,45	60,01	56,93	65,30	61,66	58,41	66,26	62,52	59,18	
Alüminyum Oksit	13,48	12,75	12,10	13,88	13,10	12,41	14,08	13,29	12,58	
Metalik alüminyum toz	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
NUMUNE KOD NO	10	11	12	13	14	15	16	17	18	

Numuneler Şekil 1'de görülen proses kullanılarak üretilmiştir. Tartımı yapılan potasyum hidroksit (KOH) topraklar, toz haldeki sodyum silikat (Na₂SiO₃) ve Kütahya şebeke suyu karıştırılıp, oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Bekletme işlemi tamamlanan çözelti

manyetik karıştırıcıda içerisine fumed silika (FS) ilave edilerek karıştırmaya devam edilmiştir (20 dakika, 70 °C Sıcaklıkta). Daha sonra, tartısı tamamlanan UK, Alüminyum oksit ve metalik alüminyum toz mekanik karıştırıcıda 5 dakika karıştırılmıştır.

Şekil 1. Na₂SiO₃/KOH Aktiviteli Numune Karışımlarının Hazırlanma Safhaları

Son olarak bu iki karışım mekanik karıştırıcıda bir arada birkaç dakika daha karıştırıldıktan sonra, 32 mm çapında ve 40 mm yüksekliğinde Polipropilen Random Co-polimer (Pprc) borulara dökülmüştür. Geopolimerin gözenekliliği, karışımın sertleştirme için bir etüve yerleştirilmeden önce bulamaç formunda bırakılma süresinden etkilendiği için (Nyale, Babajide, Birch, Böke, ve Petrik, 2013) şekillendirilmiş olan numuneler kodlanarak 24 saat oda sıcaklığında bekletildi. Daha sonra etüv içinde 85 °C sıcaklıkta 42 saat zaman diliminde kür işlemine tabi tutuldu.

Kür işleminden sonra, Şekil 2’de görülen numunelerin yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumu gözle muayene edilmiş ve en iyi işlenebilirliğin 10 numaralı numunede olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 2. Hazırlanmış Olan Numuneler

Daha sonra 10 numaralı numunenin Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçümleri yapılmış ve piyasa şartlarında üretilmiş olan ısı yalıtım ürünleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Köpürmenin yeterli olmadığına karar verilen 10 numaralı numunenin metalik alüminyum toz

ağırlık miktarı, su/katı ve Na₂SiO₃/KOH oranını değiştirilmeden sadece Si/Al oranını değiştirilerek Tablo 3’de görüldüğü gibi bileşimi revize edilmiştir. Bileşimi revize edilen numune D10 olarak kodlanmış ve Şekil 1’de görülen proses uygulanarak tekrar üretilmiştir.

Tablo 3

D10 Kodlu Numunenin Deney Prosedürü	
Kod No	D10
Su/Katı (Ağırlık)	0,50
Na ₂ SiO ₃ /KOH (molar)	2,50
Si/Al (molar)	0,50
	% (Ağırlık)
Potasyum hidroksit	3,97
Sodyum metasilikat	9,92
Fumed silika	7,64
Uçucu kül	64,72
Alüminyum oksit	13,75
Metalik alüminyum toz	+0,50
Su	50 g

Daha sonra, XRD, BET, FT-IR, SEM ve EDX, helyum piknometre, Arşimet yoğunluk ölçümleri, termal iletkenlik, TS EN ISO 12572/09.12.2016 standardına göre su buharı geçirgenliği, TS EN ISO 11925-2 küçük alev (SFI) testleri yapılmıştır.

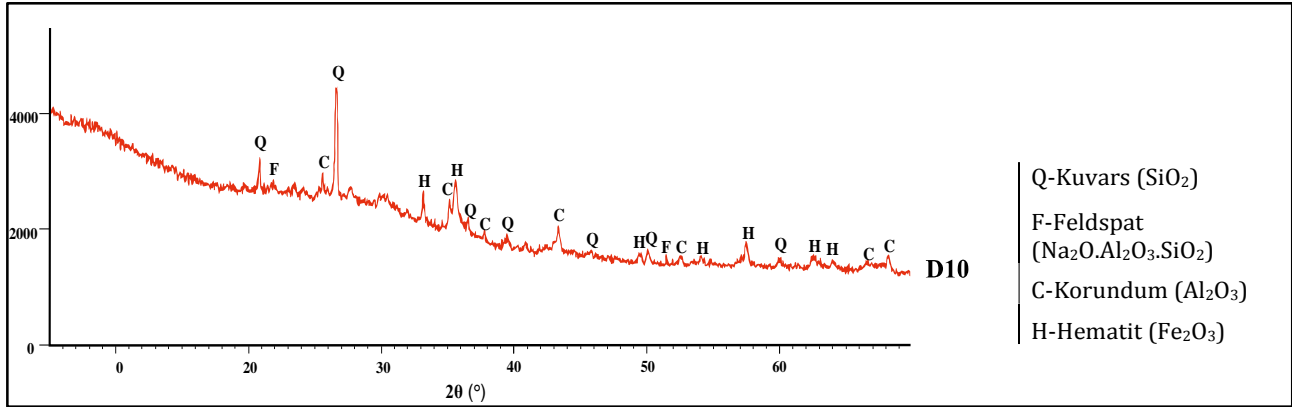
3. Bulgular

3.1 D10 Kodlu Numunenin XRD Analizi

Hazırlanan D10 numunesinin XRD deseni Şekil 3'de verilmiştir. XRD deseninde $\sim 20 - 70$ ($2\theta^\circ$) aralığında yoğunlaşan kırınım pikleri gözlenmektedir. Bu aralıkta elde edilen fazlar polimerizasyon işlemi sırasında bölgesel bağlanma ortamında değişiklikler olduğunu göstermektedir (Prud'homme, Michaud, Joussein,

Clacens, ve Rossignol, 2011).

Yüksek amorf geopolimerik ürün içeriklerinin, yüksek geopolimerizasyon reaksiyonunu ve oluşumunu vurgulaması için XRD deseni genellikle geniş ve yaygın bir pik gösterirken D10 numunesinin deseni keskin kırınım piklerinden oluşmaktadır.

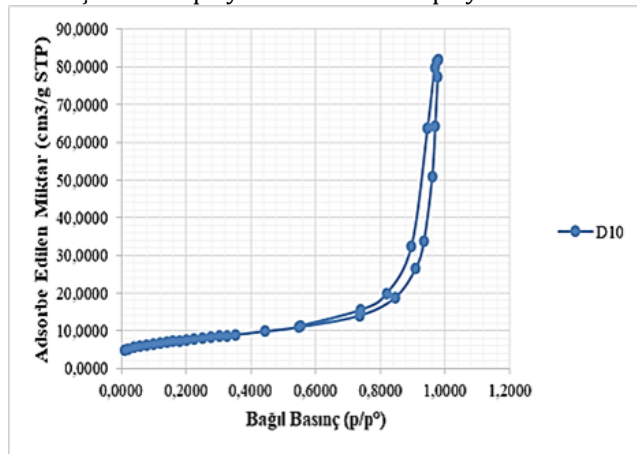


Şekil 3. D10 Numunesinin XRD Grafiği (DPÜ İltm'de yapılmıştır).

XRD desenleri, kuvars (SiO_2), korundum (Al_2O_3), hematit (Fe_2O_3) ve feldspat ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) kristal fazlarına sahip. Genel anlamda XRD deseninin, kuvars hematit ve korundum değişmeyen majör fazlar iken diğer fazlar minör olarak görülmektedir.

3.2 D10 Kodlu Numunenin N_2 Adsorpsiyon/Desorpsiyon İzotermleri

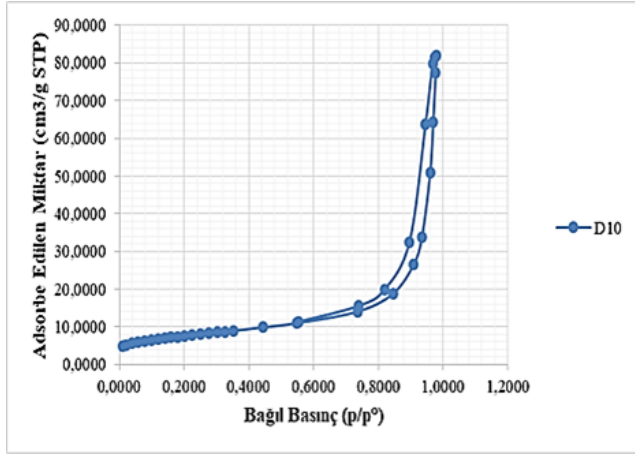
Hazırlanan numunelerin 77 K sıvı azot sıcaklığında elde edilmiş adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermleri



Şekil 4'de verilmiştir. Verilen şekil, adsorpsiyon kapasitesinin (cm^3/g) bağıl denge basıncına karşı ($x=p/p^\circ$) çizilmiş grafiğidir.

Adsorpsiyon ve desorpsiyon mekanizmalarındaki farklılık, 0,46-0,98 bağıl basınç değer aralığında net olarak gözlenen bir dallanma söz konusudur. Histerisis olarak tanımlanan bu oluşum, yapıda mezogözeneklerin varlığını belirler. IUPAC sınıflamasına göre H1 histerisis döngüsüne benzemektedir. H1 histerisis, belirgin silindirik benzeri gözenek kanallarından veya yaklaşık olarak tektip kürelerin yoğunlaşan aglomerallarından oluşan gözenekli malzemelerle ilişkilendirilir (Seymour, Joan, Martin ve Matthias, 2004).

D10 kodlu numune $850\ 000\ \text{cm}^3/\text{g}$ adsorpsiyon miktarı göstermiştir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrisi $p/p^\circ = 0,44$ bağıl basınçta birleşiyor. 0,44 bağıl basınç (p/p°) değerinden sonra histerisis döngüsü malzemenin gözenekli olmasından kaynaklanmaktadır (Kim, Yoon, ve Bae, 2016)



Şekil 4. D10 Kodlu Numunenin N₂ Adsorpsiyon ve Desorpsiyon İzotermi

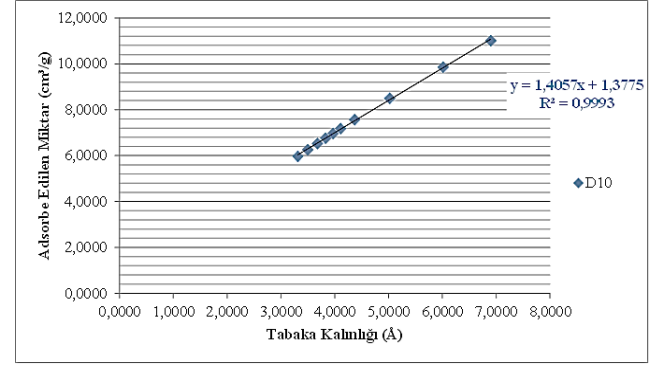
3.3 D10 Kodlu Numunenin Gözenek Hacim Değerleri

Elde edilen adsorpsiyon izoterminden yararlanılarak, yapıdaki tüm gözeneklerin dolduğu $p/p^{\circ} = 0,98$ bağıl basınç değerinde adsorplanan azot gazı hacmi (gözenekler içerisinde yoğunlaşma meydana geldiği için eşdeğer sıvı azot hacmi) verilerinden toplam gözenek hacmi değeri (V_p $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) belirlenmiştir.

$p/p^{\circ} = 0,98$ bağıl basınç değerlerinde gözeneklerden desorplanan gaz hacmi değerinden mikro gözenekleri de içine alan mezogözenek hacmi değeri belirlenmiştir. Mikro gözeneklilik bölgesinin tayini için adsorpsiyon izotermelerinde $0,05 < P/P^{\circ} < 0,7$ bağıl basınç aralığındaki (mikro gözeneklerin dolduğu ve mezogözeneklerin dolmaya başladığı bölge) değerlerle t-plot grafikleri oluşturulmuştur.

t-plot yöntemi, mikro ve mezogözeneklerin birlikte bulunduğu katıların mikro gözenek hacmini belirlemek için kullanılan yöntemlerden birisidir. t-plot, V_{ads} karşı t'nin (sıvı tabaka kalınlığına karşı adsorplanan sıvı azot hacim) grafiği olarak düşünülür (Storck, Bretinger, ve Maier, 1998). Genellikle Harkins-Jura (HJ) denklemi, t-plot'da hesaplanan kalınlık değerleri 0,35 nm (yani t_{mono}) ve 0,5 nm (yaklaşık 0,1 – 0,2 bağıl basınç aralığına

karşılık gelir) içinde, küçük miktarlarda mikro gözenekli katılar için sıklıkla kullanılır. D10 numunesinin t-plot grafiği Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Toplam ve Mikro-Gözenek Hacminin Hesaplanmasında Kullanılan D10 Kodlu Numunenin T-Plot Grafiği

Toplam gözeneklilik hacmi değerleri $P/P^{\circ} = 0,98$ bağıl basınç değerinde adsorpsiyon verisinden, toplam mikro ve mezogözenek hacmi değerleri $P/P^{\circ} = 0,96$ bağıl basınç değerinde desorplanan hacim değerinden, çizilen t-plot grafiklerinden mikrogözenek hacim (V_{mikro}) değerleri HJ denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Toplam mezogözenek (V_{mezo}) hacmi ($V_{\text{toplam}} - V_{\text{mikro}}$) işleminden, % mikro-gözenek ($(V_{\text{mikro}}/V_{\text{toplam}}) \times 100$) ve % mezogözenek ($(V_{\text{mezo}}/V_{\text{toplam}}) \times 100$) hacim değerleri hesaplanmıştır.

Mikro, mezo ve toplam gözenek hacim değerleri çok düşüktür. Yüzde olarak değerlendirildiğinde ise mezogözenek yüzdesi % 99'in üzerinde olduğu görülmektedir. D10 numunesinin farklı metotlarda hesaplanan gözenek hacim değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

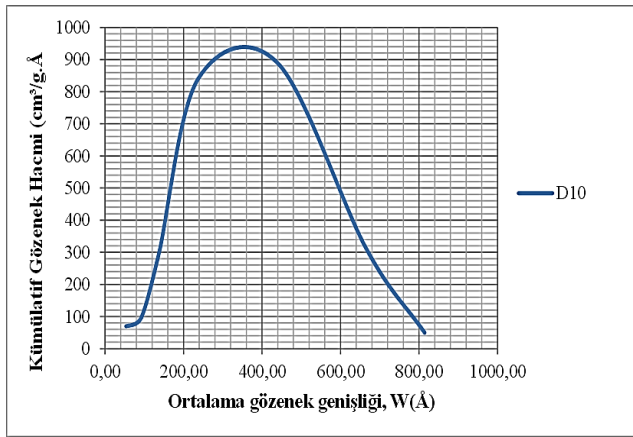
Tablo 4

D10 Kodlu Numunenin Gözenek Hacim Değerleri

NUMUNE	V_{toplam} (cm^3/g)	$V_{\text{mikro}} + V_{\text{mezo}}$ gözenek (cm^3/g)	V_{mikro} gözenek (cm^3/g) t-plot	V_{mezo} gözenek (cm^3/g)	% mikro gözenek hacmi	% mezo gözenek hacmi
D10	0,45	0,44	$16,5 \cdot 10^{-4}$	0,45	0,37	99,63

3.4 D10 Kodlu Numunenin Gözenek Boyut Dağılımı

Gözenek çapının yaklaşık 6 nm'den büyük olduğu değerler, $0 < P/P^0 < 0,46$ bağıl basınç bölgesinde mezogözenek bölgesi olarak tanımlamakta ve $BH_{\text{desorpsiyon}}$ metodu ile gözenek boyut dağılımı oluşturulmuştur. D10 kodlu numuneye ait 6 nm'den 82 nm'a kadar değişen ortalama gözenek boyutu ve gözenek hacminin türevine göre gözenek çapının (dV/dW 'ye karşı W) bir grafiği **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. D10 Kodlu Numunenin Gözenek Boyut Dağılımları

D10 numunesine ait pik yayvan şekilde görüntü vermektedir. Ortalama mezogözenek çap değeri yaklaşık olarak 3,8 nm'dir.

2 nm altındaki gözenek çaplarının etkisi ortalama gözenek çap genişliğine etki etmeyeceği için incelenmemiştir. Yüksek oranda mezo gözenekli yapı olduğu, gözenek boyut dağılımı grafiği ile doğrulanmıştır.

3.5 D10 Kodlu Numunenin Yüzey Alanı Değerleri

Gözenek sistemleri genellikle birbirine bağlı ağlardan oluşur. N_2 adsorpsiyonu ile ölçülen bir geopolimerin yüzey alanı esas olarak mezogözenek yüzeyi yani geopolimerleri oluşturan nano boyutlu partiküllerin dış yüzeyini temsil eder ve bu partiküllerin iç hacminin önemli bir kısmı çözülmüş katyonlar tarafından bağlanır.

Geopolimerin yapısında bulunan kül tortuları, başlangıç, gelişme ve olgunlaşma işlemi sırasında, zamanla fiziksel ve kimyasal özellikleri değişen gözenekli malzemelerdir (Wall, Bhattacharya, Baxter, Richards ve Harb, 1995).

Tablo 5'de görüldüğü gibi özgül yüzey alanları, başlangıç UK ile ($0,36 \text{ m}^2/\text{g}$) karşılaştırıldığında numunelerde bu değerden çok uzak ve bütün numunelerin belirgin olarak literatürde bildirilen değerlere kıyasla ($20\text{-}140 \text{ m}^2/\text{g}$) en düşük değerlerin biraz üstünde olduğu görülmektedir

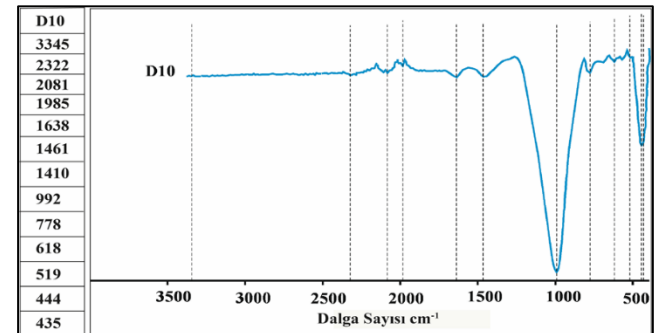
Tablo 5

D10 Kodlu Numunenin Değişik Metotlarla Belirlenmiş Yüzey Alanı Değerleri

NUMUNE	Çok Nokta BET Yüzey Alanı (m^2/g) $0,05 < P/P^0 < 0,35$	Tek Nokta BET Yüzey Alanı (m^2/g) $P/P^0 = 0,30$	Toplam Özgül Yüzey Alanı (m^2/g) (t-metot)	Dış Yüzey Alanı (m^2/g) (t-metot)	Mikro Gözenek Yüzey Alanı (m^2/g) (t-metot)	$BH_{\text{adsorpsiyon}}$ Yüzey Alanı (m^2/g)
D10	25,80	25,84	25,80	23,01	2,79	22,68

3.6 D10 Kodlu Numunenin FT-IR Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

Şekil 7'de D10 numunesinin $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ aralığında, yapısındaki fonksiyonel grupların adsorbans değerleri belirlenmiş ve yapılar anlatılmıştır.



Şekil 7. D10 Numunesine Ait Fonksiyonel Grup Tablosu ve FT-IR Grafiği

3500 ve 2300 cm^{-1} arasındaki bantlar, yapısal OH bağlarının gerilme titreşimlerine atfedilir (Ogundiran ve Kumar, 2016). Bu yüzden yaklaşık 3345 ve 2328 cm^{-1} 'deki bantlar, yüzeyde adsorbe edilen veya geniş oyuklara sıkışan zayıf bağlı su moleküllerinden H-O-H gruplarının gerilme ve deformasyon titreşimini temsil eder (Abdullah ve diğ., 2012).

2100-2360 cm^{-1} aralığında görülen güçlü bantlar Si-H (silane), 1900-2000 cm^{-1} aralığında görülen bantlar C=C asimetric gerilimi temsil ediyor.

Bütün FT-IR spektrumlarında 1600 cm^{-1} ve 1650 cm^{-1} bölgesi içinde görünen geniş bantlar yüzeyde absorbe edilen veya polimer kafeslerin büyük boşluklarında sıkışmış olan bağlı su moleküllerinin (O-H) gerilmelere ve (H-O-H) eğilmelere atfedilir (Barbosa, MacKenzie, ve Thaumaturgo, 2000; Lemougna, Chinje Melo, Delplancke, ve Rahier, 2013; Lopez, 2014; Nath ve Kumar, 2013; Panias, Giannopoulou, ve Perraki, 2007; Prud'homme, ve diğ., 2011; Prud'homme ve diğ., 2010; Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009).

Geopolimer oluşumuna atfedilen 1420 cm^{-1} 'de O-H eğilme bandı (Andini ve diğ., 2008) 1410 cm^{-1} ve yaklaşık 1462 cm^{-1} 'deki bantlar atmosferdeki CO₂ ile alkali metal hidroksit tepkimesiyle karbonat oluşumu ile ilgilidir (Andini ve diğ., 2008; Nath ve Kumar, 2013).

Yine geomalzeme için algılanmış olan 992 cm^{-1} ana bant bulunan Si-O-M bağlardan (M = Si, Al, K, Na) kaynaklanan asimetric gerilme titreşimleridir (Nath ve Kumar, 2013; Prud'homme, ve diğ., 2011; Prud'homme ve diğ., 2010). FT-IR spektrumunda ~986 cm^{-1} bandı, kuvvetli alkali aktiveli çözeltide UK amorf fazın dağılması ile ilişkili yeni bir ürünün (amorf alüminosilikat jel fazı) oluştuğunu gösteren geopolimerlere atfedilir (Borges, Nunes, Panzera, Schileo, ve Feteira, 2016; Panias ve diğ., 2007; Prud'homme, ve diğ., 2011; Škvára, Jilek, ve Kopecký, 2005).

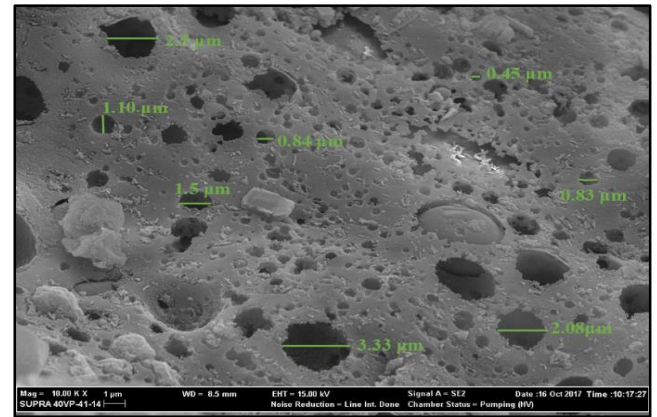
778 cm^{-1} 'de bir bandın varlığı, XRD desenlerinde gösterildiği gibi kuvarstan kaynaklanmaktadır (Essaidi, Samet, Baklouti, ve Rossignol, 2014). Yarı kristalli alümina silikat malzemelerin amorf oluşumuna atfedilen Si-O-Si ve Al-O-Si simetric gerilim titreşimlerini gösteren ~760-560 cm^{-1} aralığındaki bantlar, UK'ün yeniden yapılanmasını göstermektedir (Panias ve diğ., 2007).

Yaklaşık 430-460 cm^{-1} bandlar güçlü Si-O-Si asimetric eğilme titreşimleri ve O-Si-O moduna atfedilir (Catauro, Papale, Lamanna, ve Bollino, 2015; Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009).

3.7 D10 Kodlu Numunenin SEM ve EDX Değerlendirmesi

SEM ile numuneleri görüntüleme çalışmalarında numuneye dikey yönde tarama yapılmıştır.

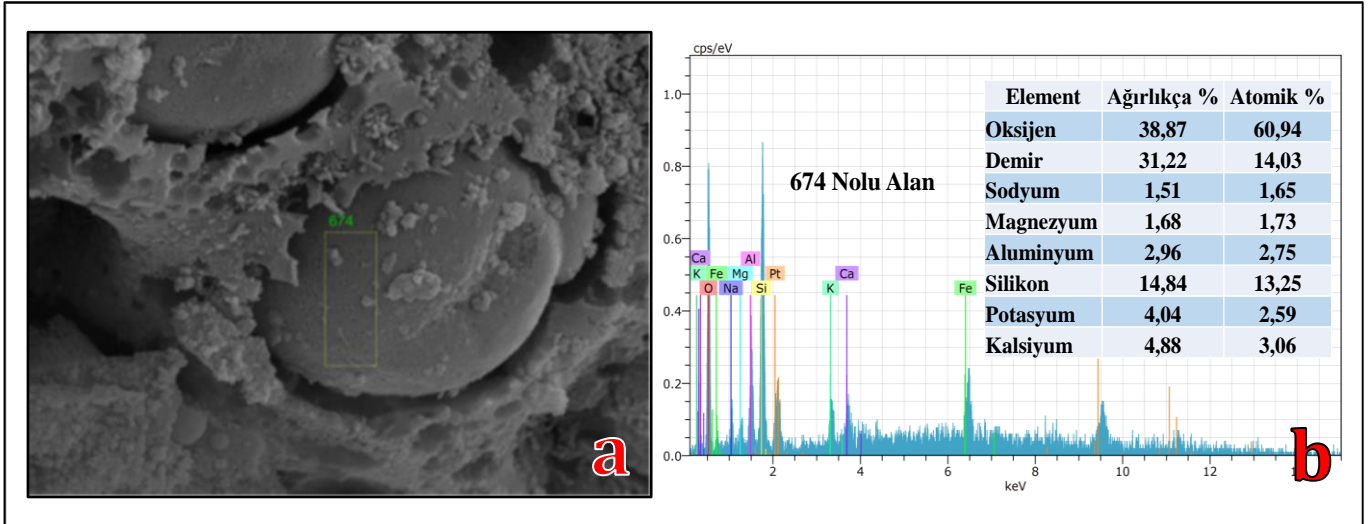
Şekil 8'de D10 kodlu numunenin yoğun ve hacimli jel benzeri görüntüsü melez bir karışım olarak değil saf geopolimer bağlayıcılar olarak karakterize edilebilir. SEM görüntüsüne dayanarak D10 numunesinin mikro yapısı boşluklar, gözenekler, uçucu kül küreleri içerdiği görülmektedir.



Şekil 8. Gözeneklerin Boyut Değerlerini Gösteren D10 Kodlu Numuneye Ait 10.00 K X Büyütmede SEM Görüntüsü

Şekil 9a'daki D10 kodlu numunenin SEM görüntüsünde 674 Nolu seçili alan, geopolimer bağlayıcılar arasında aktif olmayan dolgu maddeleri olarak bulunan bazı uçucu kül partiküllerini göstermektedir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** Şekil 9b'deki EDX spektrum analizi ile desteklenmektedir. Birçok reaksiyona girmemiş uçucu kül küreleri nedeniyle, uygun Si/Al oranı elde edilememiş gibi görünür. Ayrıca yüksek konsantrasyonda veya bol miktarda alkali çözeltinin ki reaksiyona girmemiş UK partiküllerinin yüzeyinde reaksiyona girmeyen bazı alkaliler (spektrumda K- elementi) bunu doğruluyor.

UK partiküllerini çevreleyerek çözünmesine neden olduğu ve geopolimerizasyona katkı sağladığı yüzey üzerinde yeni oluşan partiküllerden anlaşılmalıdır.

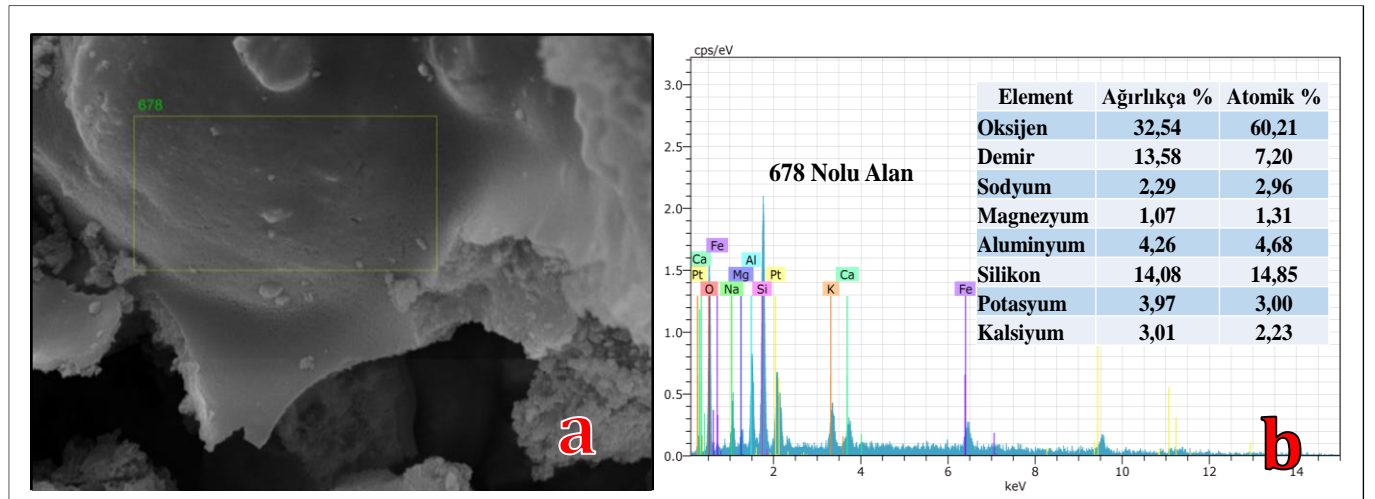


Şekil 9. D10 Kodlu Numunesine Ait a: SEM Görüntüsünde 674 Nolu Seçili Alan b: EDX Grafiği ve Elementel Analizi

Şekil 10a ve Şekil 10b'de görüldüğü gibi geopolimer bağlayıcıları oluşturan ana elementlere (Na, K, Al, O, Si) ek olarak, Ca, Mg ve Fe elementleri de mevcuttur. Geopolimer bağlayıcı alanın Al'dan daha fazla Si ve Fe içerdiği, UK partiküllerinin geopolimerizasyonda etkili olduğu görülmektedir.

D10 numunesinden seçilen tüm parçaların kırılmış yüzeylerinde görülen küresel boşlukların nedeni, jel

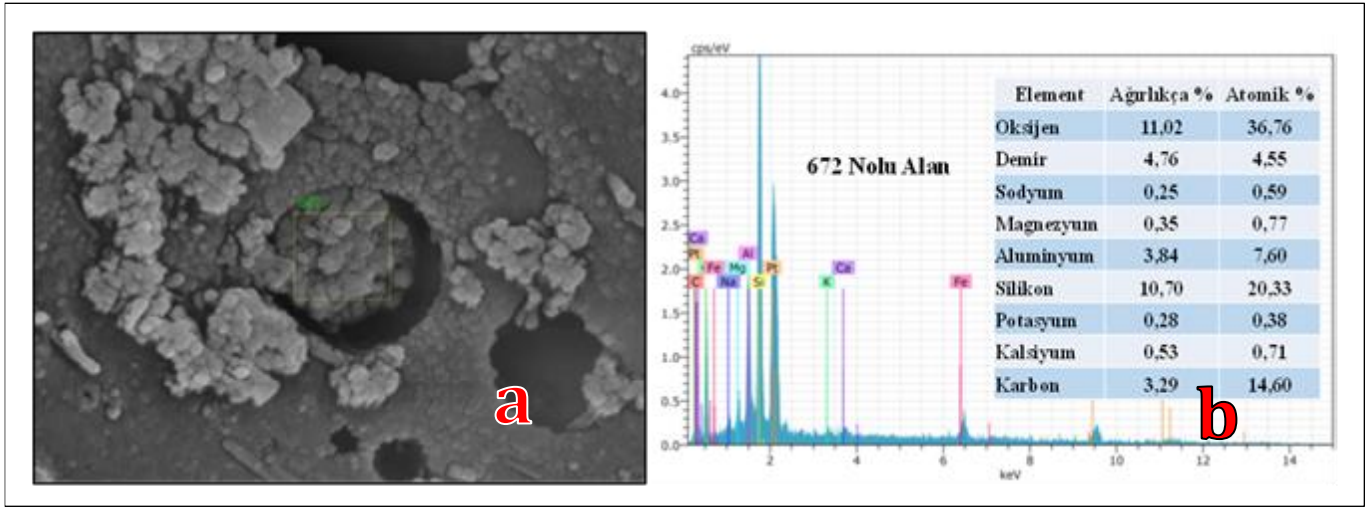
benzeri geopolimer bağlayıcılar ve agrega gibi reaksiyona girmemiş UK partikülleri arasında oluşan H₂ gazının bünyeyi terk etmesidir. UK partiküllerinin etrafındaki boşluklar su kaybından sonra oluşmaktadır. Bununla birlikte, UK partiküllerinin reaksiyona giren kısmı geopolimer bağlayıcılar ile sürekli yapışık halde olduğu görülmektedir



Şekil 10. D10 Kodlu Numunesine Ait a: SEM Görüntüsünde 678 Nolu Seçili Alan b: EDX Grafiği ve Elementel Analizi

Şekil 11a'daki 672 nolu seçilmiş alan karmaşık ve bulutlu şekillere sahip geopolimer bağlayıcıları göstermektedir. Bu karmaşık şekilli malzemeler, saf

geopolimerlerde görülen aynı elementlerle karakterize edilmektedir. Şekil 11b'deki Si ve O miktarlarının fazlalığı oluşumların reaksiyona girmemiş FS partikülleri olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. D10 Kodlu Numunesinde Ait a: SEM Görüntüsünde 672 nolu Seçili Alan b:EDX Grafiği ve Elementel Analizi

3.8 D10 Kodlu Numunenin Arşimet Prensibi ile Yoğunluk Ölçümleri ve Değerlendirmesi

Tablo 6'daki veriler kullanılarak ile yığınsal (bulk) yoğunluk (ρ_{bulk}), katı yoğunluğu, kuru birim ağırlık, ile su emme, görünür (açık) gözeneklilik, toplam gözenek değerleri hesaplanmıştır. Toplam gözenek değerinden açık gözenek değerinin çıkartılması ile de kapalı gözenek değerleri bulunmuştur.

Tablo 6

D10 Kodlu Numunenin Arşimet Prensibi ile Ağırlık ve Yoğunluk Ölçüm Değerleri

	D10
WK (g)	8,94
WA (g)	0,78
WD (g)	16,44
$\rho_{\text{sıvı}}$ (g/cm ³)	1,0
ρ_{teorik} (g/cm ³)	2,5

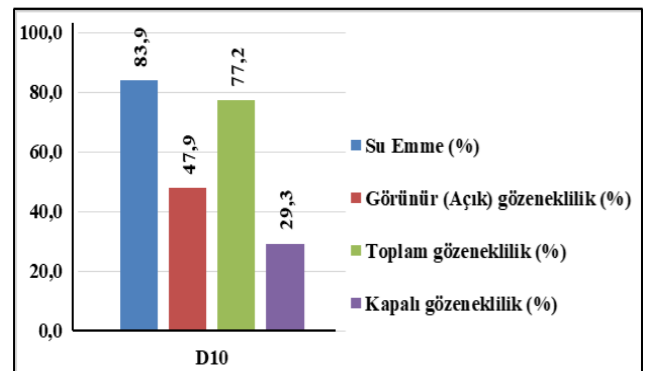
“WK” kuru numunenin havadaki ağırlığı (g), “WA” su ya da sıvı emdirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (g), “WD” su ya da sıvı emdirilmiş (doymuş) numunenin havadaki ağırlığı (g) Arşimet prensibinden yola çıkarak terazi ve yoğunluk kiti ile bulunmuştur. Helyum piknometre ile “ ρ_{teorik} ” gerçek (teorik) yoğunluk (g/cm³) bulunmuştur. “ $\rho_{\text{sıvı}}$ ” kullanılan sıvının (genellikle su) yoğunluğu ifade etmektedir. Sonuçları Tablo 7’de görülmektedir.

Tablo 7

D10 Numunesinin Yoğunluk, Gözeneklilik, Su Emme, Kuru Birim Ağırlık Değerleri

	D10
Bulk Yoğunluk (g/cm ³)	0,6
Görünür Katı Yoğunluk (g/cm ³)	1,1
Kuru Birim Ağırlık (kg/m ³)	571
Su Emme (%)	83,9
Görünür (Açık) gözeneklilik (%)	47,9
Toplam gözeneklilik (%)	77,2
Kapalı gözeneklilik (%)	29,3

D10 kodlu numunenin toplam gözenekliliği % 77,2, kapalı gözenekliliği 29,3, su emme değeri % 83,9 olarak bulunmuştur (Şekil 12).



Şekil 12. D10 Kodlu Numunenin %'de Gözeneklilikleri

3.9 D10 Kodlu Numunenin Isı İletkenlik Analizi

Değiştirilmiş Geçici Düzlem Kaynağı (MTPS) tekniğini kullanan TCI- Thermal Conductivity Analyzer model termal iletkenlik katsayısı ölçüm analizi cihazı yapılan analizde ısı iletkenliği değeri 0,085 (W/m.°K) olarak ölçülmüştür.

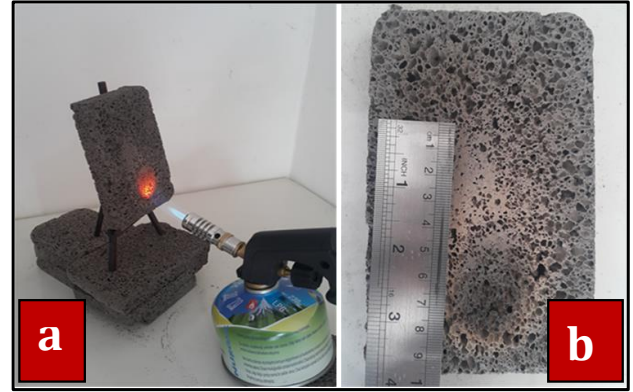
3.10 D10 Kodlu Numunenin Su Buharı Analizi

TSE Yapı Malzemeleri Gebze Laboratuvarında gerçekleştirilen, TS EN ISO 12572 (2016), kuru kap deneyi (Koşul A), 2*92*20 ebatlarındaki deney numunelerimizin ortalama buhar geçirgenliği sonucu 3.00 μ 'dür.

3.11 D10 Kodlu Numunenin Küçük Alev Testi (SFI)

TS EN ISO 11925-2 (2011), Küçük Alev Testi (SFI) : Yapı malzemelerinin yangına tepkisine göre yanmazlık sınıflamasını belirlemektir. TS EN ISO 11925-2 standardına uygun olarak yaptığımız küçük alev testinde (Şekil 13a), test numunemiz 30 sn süre ile açık alev maruz bırakılarak yanan kısmının yüksekliği

yaklaşık 9 cm ölçülmüştür (Şekil 13b). Ürün üzerinde alev yürümemiştir ve alev kaynağı yüzeyden uzaklaştırıldığında alevin kesildiği görülmüştür. Alev kaynağı uzaklaştırıldıktan sonra malzeme yanmaya devam etmemiştir. Duman oluşumu ve yanma damlamaları/tanecikleri görülmemiştir.



Şekil 13. (a) TS EN ISO 11925-2 Küçük Alev Testi, (b) Alman Standardı DIN 4102 Testi

Tablo 8'de görülen yangına tepki sınıflandırmasına göre "B sınıfı" olarak değerlendirilmiştir

Tablo 8

Yapı Malzemelerinin Yangına Tepki Sınıflarının Belirlenebilmesi İçin Özet Tablo (Teknik Bilgiler, 26.05.2018)

Test Metotları	Yangına Tepki Sınıfı			
	E	D,C,B	A2	A1
EN ISO 1182 (Yanmazlık Testi)			Yanmazlık Testi	Yanmazlık Testi
			veya	ve
EN ISO 1716 (Kalorifik Potansiyel Testi-PCS)			PCS	PCS
TS EN ISO 13823 (Tek Alev Başlıklı Test-SBI)		SBI	SBI	
TSE EN ISO 11925-2 (Küçük Alev Testi)	Tutuşabilirlik 15 sn	Tutuşabilirlik 30 sn		

Ancak, B, C ve D sınıflarına ait malzemeleri belirlemek için sadece bu test yeterli değildir, ilave olarak SBI testi yapmak gerekmektedir.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, Seyitömer Termik Santrali kömür uçucu külü olarak isimlendirilen endüstriyel atık baz malzeme, alüminyum oksit, aktive edici olarak potasyum hidroksit ve sodyum meta silikat, metalik alüminyum

toz, fumed silika toz, kullanılarak ısı yalıtımlı geopolimer yapı malzemesi üretilmiştir.

D10 kodlu numunenin ortalama mezogözenek çap değeri yaklaşık olarak 3,8 nm'dir. 2 nm altındaki gözenek çaplarının etkisi ortalama gözenek çap genişliğine etki etmeyeceği için incelenmemiştir. literatürde çalışılan geopolimer ürünlerin gözenek çapları 2-54 nm aralığındadır (Kamseu ve diğ., 2012; Landi ve diğ., 2013)

Literatürde 7,1-8,3 nm boyut aralığındaki gözeneklerin

esasen gözenek hacmine katkıda bulunduğu yer almaktadır. Mezo gözenekler önemli ölçüde azalır ve hem S_{BET} (yüzey alanı) hem de V_p (gözenek hacmi) azalması sonucu geopolimer matrisi temel olarak daha küçük gözeneklerle karakterize edilir (maksimum 3,6 nm'lik bir değer).

BET yöntemi ile ölçülen verilerin hesaplanması sonucu toplam gözenek (mezo+mikro) hacmi $0,45 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Andini ve diğ. (2008), ürettikleri uçucu kül bazlı ürünler için, gözenek hacmini $0,008-0,022 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$, Landi ve diğ. (2013) gözenek hacmini $0,078-0,477 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ olarak elde etmişlerdir.

Gözenek hacminin önemli bir kısmı, uçucu kül parçacık yüzeylerinin çözülürken geride bıraktığı boşluklardır. Bu boşlukların genel olarak çapı 1000 nm 'den büyüktür. Bununla birlikte, BJH yöntemi ile ölçülebilen maksimum gözenek boyutu yaklaşık $50-100 \text{ nm}$ 'dir. gözenek hacminin büyük kısmının, gaz emilimi (BJH yöntemi) kullanılarak ölçülemeyecek kadar büyük gözenek çaplarına sahip olduğunu düşünürsek (Lloyd, Provis, Smeaton, ve van Deventer, 2009) toplam gözenekliliği bulmak için Arşimet prensibine göre yaptığımız ölçüm ve hesaplama sonucunda % 77,2 bulduk. Kamseu ve diğ. (2012), % 70'e kadar gözenek hacmine sahip ürünler geliştirmeyi başarmışlardır. Landi ve diğ. (2013) ise toplam gözenekliliği % 61- 72 elde etmişlerdir.

Ürettiğimiz geopolimer numunede toplam özgül yüzey alanı $25,80 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ bulunmuştur. Andini ve diğ. (2008), özgül yüzey alanını $4,87-10,34 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ve Landi ve diğ. (2013), $16-98 \text{ m}^2/\text{g}$ aralığında elde etmişlerdir. Genel olarak literatürde bildirilen geopolimer malzemelerin özgül yüzey alanı değerlerine ($20-140 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) kıyasla D10 kodlu numunenin özgül yüzey alanı değeri alt sınırın biraz üzerinde bulunmuştur.

Arşimet prensibi ile yaptığımız yoğunluk ölçümlerimiz ve hesaplarımız ile bulk yoğunluğunu $0,6 \text{ g}/\text{cm}^3$ bulduk. Landi ve diğ. (2013) hazırladıkları numunelerinde bulk yoğunluğu $0,85-0,63 \text{ g}/\text{cm}^3$ aralığında elde etmişler ve bunu, su oranının yükselmesi neticesinde daha büyük gözeneklerin oluştuğu, dolayısıyla gözenek hacminin artmasına sebep olduğu şeklinde değerlendirmişlerdir. En yüksek su miktarında ise özgül yüzey alanında azalma ve daha küçük gözeneklere yol açtığını ifade etmişlerdir. Bu ifadeyi destekler tarzda Lloyd, Provis, ve van Deventer (2010), su içeriğindeki bir azalma, düşük gözeneklilik hacmi ve dolayısıyla gözenek sisteminin daralacağını belirtmişlerdir. Kütle transferi büyük ölçüde gözenek boyutuna bağlı olduğundan, bu çok önemlidir: gözenek ne kadar büyükse, kütle aktarım hızı o kadar yüksek olur (Lloyd ve diğ., 2009).

(Topçu ve Toprak, 2009), alkalilerle aktive edilmiş Seyitömer Termik Santrali taban külü ile ürettikleri malzemenin birim ağırlığı $1,59 \text{ gr}/\text{cm}^3$ ve su emme değeri % 6,58'dir. (Topçu ve Kara, 2009), Seyitömer Termik Santrali'nden sağlanan uçucu kül, taban külü,

Azot fabrikasından alınan cüruf ve polistren strafor dolgusu kullanılarak ürettikleri duvar bloklarının birim hacim ağırlıkları $354-562 \text{ kg}/\text{m}^3$ aralığındadır. D10 kodlu numunenin birim ağırlık $0,571 \text{ gr}/\text{cm}^3$ ve su emme değeri % 83,9 olarak bulunmuştur. Birim ağırlığın düşük olması oldukça gözenekli bir malzeme elde edildiğini göstermektedir. bunu su emme değerindeki yüksek yüzde de teyit etmektedir. Bu da bize çalışmamızda kullandığımız FS ve metalik alüminyum tozun, gözenek oluşumunda etkili olduğunu göstermektedir.

D10 kodlu numunenin ısı iletkenliği değeri $0,085 \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$ 'dir. Kamseu ve diğ. (2012), İyileştirdikleri nihai malzeme ile $0,15 \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$ termal iletkenliğe sahip yalıtım malzemesi elde etmişlerdir. (Delair ve diğ., 2012), (Na^+), (K^+) ve silika tozu içeren geopolimer malzemede $0,2 \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$ 'den daha düşük bir ısı iletkenliğine ulaşmışlardır. (Topçu ve Kara, 2009), ısı iletkenlik değerlerini hesaplama yöntemi ile $0,085-0,097 \text{ (W/mK)}$ bulmuşlardır. Düşük yoğunluklu numunenin yüksek gözenek miktarı nedeniyle içeride yüksek hava içeriğine sahip olduğunu ve böylece numuneden ısı transfer oranını düşürdüğünü göstermiştir (Liu ve diğ., 2014).

TS EN ISO 11925-2 küçük alev testine (SFI) yöntemi ile yapılan testte numunemiz "B sınıfı" olarak değerlendirilmiştir.

D10 kodlu numunenin su buharı geçirgenliği direnci $3,00 \mu'$ 'dür. Isı yalıtım malzemelerinin yoğunlaşmaya neden olan veya yoğunlaşmayı önleyici niteliği su buharı geçirgenliği direncidir. Normal şartlarda su buharı geçirimsiz malzemeler değişik iklim şartlarına maruz normal dış duvarlarda kullanılmamalıdır. Su buharı geçirgenliği sonucu oluşan yoğunlaşma, yapı malzemesinin yapısını bozacağı gibi malzemenin toplam ısı transferi katsayısını yükseltir, ısı kayıplarını da artırır (Uzun, 2016).

Tüm verilerin yansımaları olarak laboratuvar şartlarında üretmiş olduğumuz malzemenin piyasa şartlarında üretilmiş olan diğer ısı yalıtım malzemelerin fiziksel özellikleri ile karşılaştırdığımızda ölçümler ve hesaplamalar sonucunda elde ettiğimiz değerlerin uygun olduğu görülmektedir (Tablo 9). Tabloda9'da görülen parasal değerler 10.09.2017 tarihindeki birim fiyatlarıdır.

Tablo 9

Isı Yalıtım Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin ve Fiyat Karşılaştırması (Balkotrade, 20.02.2018; Blokbims, 10.09.2017; gazbeton, 10.09.2017; Pakboard, 20.02.2018; xpsturkiye, 20.02.2018)

	D10	Gazbeton		DoluBlok	Blok Bims	XPS	EPS
		G4	G3	Bims	Plaka		
Ebatlar (cm)	6*50*20	60*25*10		15*39*18,5	6*50*20	3*50*100	5*50*100
Birim Hacim Kütlesi (kg/m ²)	571	600	700	500	1230	1090	-
Isı İletkenliği (W/mk)	0,085	0,16	0,20	0,14	0,45	0,45	0,030-0,035
Su Buharı Geçirgenliği (μ)	3	5-10		10	12	20-250	50-70
Fiyat (₺)	2,92	4,3		1,04	0,72	8,41	8,64

Sonuç olarak, Kütahya Seyit Ömer termik santrali atık uçucu küllerinin (UK) yapılarda ısı yalıtımı için geopolimer malzeme üretiminde kullanılması ekonomi ve teknolojik özellikler bakımından mümkün olacağı saptanmıştır. Elde edilen polimerik ısı yalıtım malzemesine gerek yapılan karakterizasyon çalışmaları ve gerekse ekonomik analiz sonuçları, bu malzemenin ticari olarak satılan benzerlerinden üstünlüklerini ortaya koymaktadır. Böylece temiz çevreye, düşük karbon salınımına, yerli kaynak esaslı ve ekonomik üretime, ayrıca cari açığa katkıda bulunacak olması bakımından inşaat sektörü için ticari değerinde tercih edilebilecek nitelikli bir polimerik ısı yalıtım malzemesi laboratuvar şartlarında üretilmiştir denilebilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Uğur KUT, Literatür araştırması, deney prosedürü, deney uygulamaları, karakterizasyonu; İskender IŞIK, çalışmanın yürütülmesi, organizasyonu, proje yazımı ve değerlendirme katkı sağlamışlardır.

Teşekkür

Bu çalışma Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2015-44 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Abdullah, M. M. A. B., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K. N., Yahya, Z., & Abdul Razak, R. (2012). Fly ash-based geopolimer lightweight concrete using foaming

agent. *International journal of molecular sciences*, 13(6), 7186-7198. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.679.20>

Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F., & Santoro, L. (2008). Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolimer-based products. *Waste Management*, 28(2), 416-423. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.001>

Balkotrade. (20.02.2018). Strafor. Erişim adresi <https://balkotrade.com/strofor-30kgm3-5cm.html>

Barbosa, V. F. F., MacKenzie, K. J. D., & Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2(4), 309-317. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6)

Blokbims. (10.09.2017). Bloksbim katalog. Erişim adresi <http://www.blokbims.com.tr/>

Borges, P. H., Nunes, V. A., Panzera, T. H., Schileo, G., & Feteira, A. (2016). The influence of rice husk ash addition on the properties of metakaolin-based geopolymers. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 10(1). doi:<https://doi.org/10.2174/1874836801610010406>

Catauro, M., Papale, F., Lamanna, G., & Bollino, F. (2015). Geopolimer/peg hybrid materials synthesis and investigation of the polymer influence on microstructure and mechanical behavior. *Materials Research*, 18, 698-705. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.342814>

Coquard, R., Baillis, D., Grigorova, V., Enguehard, F., Quenard, D., & Levitz, P. (2013). Modelling of the conductive heat transfer through nano-structured porous silica materials. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 363, 103-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.11.053>

- Delair, S., Prud'homme, É., Peyratout, C., Smith, A., Michaud, P., Eloy, L., . . . Rossignol, S. (2012). Durability of inorganic foam in solution: The role of alkali elements in the geopolymer network. *Corrosion Science*, 59(0), 213-221. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.002>
- Essaidi, N., Samet, B., Baklouti, S., & Rossignol, S. (2014). Feasibility of producing geopolymers from two different tunisian clays before and after calcination at various temperatures. *Applied Clay Science*, 88-89, 221-227. doi : <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.006>
- gazbeton, A. (10.09.2017). Yatay duvar panelleri. Erişim adresi <http://www.akg-gazbeton.com/duvar-paneli,231>
- Henon, J., Alzina, A., Absi, J., Smith, D. S., & Rossignol, S. (2012). Porosity control of cold consolidated geomaterial foam: Temperature effect. *Ceramics International*, 38(1), 77-84. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.06.040>
- Kamseu, E., Nait-Ali, B., Bignozzi, M. C., Leonelli, C., Rossignol, S., & Smith, D. S. (2012). Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(8), 1593-1603. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.12.030>
- Kim, K. C., Yoon, T. U., & Bae, Y. S. (2016). Applicability of using CO₂ adsorption isotherms to determine bet surface areas of microporous materials. *Microporous and Mesoporous Materials*, 224, 294-301. doi:<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.01.003>
- Landi, E., Medri, V., Papa, E., Dedecek, J., Klein, P., Benito, P., & Vaccari, A. (2013). Alkali-bonded ceramics with hierarchical tailored porosity. *Applied Clay Science*, 73(0), 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.027>
- Le-ping, L., Xue-min, C., Shu-heng, Q., Jun-li, Y., & Lin, Z. (2010). Preparation of phosphoric acid-based porous geopolymers. *Applied Clay Science*, 50(4), 600-603. doi : <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.004>
- Lemougna, P. N., Chinje Melo, U. F., Delplancke, M.-P., & Rahier, H. (2013). Influence of the activating solution composition on the stability and thermo-mechanical properties of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash. *Construction and Building Materials*, 48, 278-286. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.089>
- Liu, M. Y. J., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Mo, K. H. (2014). Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete. *Energy and Buildings*, 72, 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.029>
- Lloyd, R. R., Provis, J. L., Smeaton, K. J., & van Deventer, J. S. J. (2009). Spatial distribution of pores in fly ash-based inorganic polymer gels visualised by wood's metal intrusion. *Microporous and Mesoporous Materials*, 126(1-2), 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.05.016>
- Lloyd, R. R., Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2010). Pore solution composition and alkali diffusion in inorganic polymer cement. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1386-1392. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.04.008>
- Lopez, F. J. (2014). *Study of geopolymer adsorbents prepared from metakaolin and rice husk silica for targeting to heavy metal capture*. (Doktora tezi). Nagaoka University of Technology, Retrieved from https://nagaokaut.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=74&item_no=1&attribute_id=20&file_no=3
- Nath, S. K., & Kumar, S. (2013). Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 38, 924-930. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.070>
- Nazari, A., & Khalaj, G. (2012). Prediction total specific pore volume of geopolymers produced from waste ashes by fuzzy logic. *Materials Research*, 15, 242-252. doi:<https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000010>
- Nematollahi, B., & Sanjayan, J. (2014). Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Materials & Design*, 57, 667-672. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.064>
- Nyale, S. M., Babajide, O. O., Birch, G. D., Böke, N., & Petrik, L. F. (2013). Synthesis and characterization of coal fly ash-based foamed geopolymer. *Procedia Environmental Sciences*, 18(0), 722-730. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.098>
- Ogundiran, M. B., & Kumar, S. (2016). Synthesis of fly ash-calcined clay geopolymers: Reactivity, mechanical strength, structural and microstructural characteristics. *Construction and Building Materials*, 125, 450-457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.076>
- Pakboard. (20.02.2018). Eps ve xps karşılaştırma. Erişim adresi http://www.pakboard.com.tr/index.asp?action=pakboard_eps_xps_karsilastirma
- Panias, D., Giannopoulou, I. P., & Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*,

- 301(1-3), 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.12.064>
- Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S., & Hatanaka, S. (2014). The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Materials & Design*, 55(0), 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.049>
- Prud'homme, E., Michaud, P., Joussein, E., Clacens, J. M., Arii-Clacens, S., Sobrados, I., . . . Rossignol, S. (2011). Structural characterization of geomaterial foams — thermal behavior. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(21), 3637-3647. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.06.033>
- Prud'homme, E., Michaud, P., Joussein, E., Clacens, J. M., & Rossignol, S. (2011). Role of alkaline cations and water content on geomaterial foams: Monitoring during formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(4), 1270-1278. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.12.030>
- Prud'homme, E., Michaud, P., Joussein, E., Peyratout, C., Smith, A., Arrii-Clacens, S., . . . Rossignol, S. (2010). Silica fume as porogent agent in geo-materials at low temperature. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(7), 1641-1648. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.014>
- Ramyar, K. (2013). Betonda alkali-silis reaksiyonu: Bir derleme. *Hazır Beton*(120), 70-82. Erişim adresi www.thbb.org
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009). Influence of naoh solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.022>
- Seymour L., Joan E. S., Martin A. T., & Matthias, M. (2004). *Characterization of porous solids and powders: Surface area, pore size and density* (1 ed. Vol. 16): Springer Netherlands.
- Škvára, F., Jílek, T., & Kopecký, L. (2005). Geopolymer materials based on fly ash. *Ceram.-Silik*, 49(3), 195-204. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/281996940_Geopolymer
- Storck, S., Bretinger, H., & Maier, W. F. (1998). Characterization of micro- and mesoporous solids by physisorption methods and pore-size analysis. *Applied Catalysis A: General*, 174(1), 137-146. doi:[https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(98\)00164-1](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(98)00164-1)
- Teknik Bilgiler. (26.05.2018). Yangın testleri ve sınıflandırma. Erişim adresi <http://www.marmaraaluminyum.com.tr/urunler/assan/7/Yangin-Testleri-ve-Siniflandirma.pdf>
- Topçu, İ., ve Kara, I. (2009). Azot fabrikası cürufu ve termik santral küllerinden hafif duvar bloğu üretilmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 1-13. Erişim adresi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/30158/325440>
- Topçu, İ., ve Toprak, M. U. (2009). Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 153-164. Erişim adresi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/30158/325452>
- TS EN ISO 11925-2. (2011). Yangın dayanımı deneyleri - aleve doğrudan maruz kaldığında tutuşabilirlik - bölüm 2: Tek alev kaynağıyla deney. In. Ankara/Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN ISO 12572. (2016). Binalarda kullanılan malzemelerin ve mamullerin ısı ve rutubet ilişkisine ait performansı - su buharı iletim özelliklerinin tayini - kap yöntemi In. Ankara/Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- Turan, O. (1999). *Enerji tasarrufu ve yalıtımı*. Paper presented at the Yapıda Yalıtım Konferansı, İstanbul.
- Uzun, İ. (2016). Yalıtım malzemeleri ve yoğuşma. *EPS haber*, 22, 26-29. Erişim adresi <https://www.epsder.org.tr/uploads/magazines/eps-haber-sayi-22/EpsHaberSayi22.pdf>
- Wall, T. F., Bhattacharya, S. P., Baxter, L. L., Richards, G., & Harb, J. N. (1995). The character of ash deposits and the thermal performance of furnaces. *Fuel Processing Technology*, 44(1), 143-153. doi:[https://doi.org/10.1016/0378-3820\(94\)00112-7](https://doi.org/10.1016/0378-3820(94)00112-7)
- Wei, G., Liu, Y., Zhang, X., Yu, F., & Du, X. (2011). Thermal conductivities study on silica aerogel and its composite insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(11), 2355-2366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.026>
- xpsturkiye. (20.02.2018). Xps teknik özellikleri. Erişim adresi <http://www.xpsturkiye.org/sayfa.asp?ID=136>
- Zhang, Z., Wang, H., Zhu, Y., Reid, A., Provis, J. L., & Bullen, F. (2014). Using fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis. *Applied Clay Science*, 88-89, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.025>