CivilTech
AFYON KOCATEPE UNIVERSITY, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Evaluation of Unit Weight and Compressive Strength of Geopolymer Mortars Obtained with Press Filter Waste and Fly Ash under Different Conditions

İlker Bekir Topçu[1], *Taylan Sofuoğlu*[2]

[1,2]*ilkerbt@ogu.edu.tr, taylansofuoglu@hotmail.com*

Abstract

In sugar production industry, the lime obtained from the commercially available limestone is quenched, filtered and used in the production of juice. The excess lime added to the juice is removed from the juice in the carbonation boilers with the help of CO_2. The mud part of the remaining muddy juice was precipitated in decanters; filtered with the help of filters. This waste from the filters is called as "Press Filter Waste (PFW)". In the experimental study, mortar samples were obtained by using standard sand, water, sodium silicate (Na_2SiO_3), fly ash and PFW in accordance with the literature review performed as preliminary examination. Fresh and hardened mortar properties were evaluated by applying unit weight and compressive strength tests depending on different sieve, curing conditions and water content variables on these mortar samples. Mortar mixtures were prepared with a sand/binder ratio of 3.0. When the compressive strength of PFA10T2S2E1 type samples which are activated with the help of 220 ml alkaline activator and have 75 gr water content and fly ash content passed through 75 μm sieve are evaluated; it has been determined that the compressive strength of 7-day is 18.53 MPa, 28-day is 19.58 MPa and 56-day is 19.78 MPa. When the hardened unit weight of the samples were evaluated (28th day), it was determined that the PFA10T2S2E1 type samples having the highest hardened unit weight were activated with 220 ml Na_2SiO_3 alkali activator and the fly ash was passed through 75 μm sieve and the water content was 75 gr (1.934 kg/dm^3).

Keywords: waste; press filter waste; geopolymer mortar; unit weight; compressive strength.

[1,2] *Eskişehir Osmangazi University, Civil Engineering Department, Eskişehir, 26480, Turkey*

CivilTech
AFYON KOCATEPE UNIVERSITY, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Pres Filtre Atığı ve Uçucu Kül ile Elde Edilen Geopolimer Harçların Farklı Koşullar Altında Birim Ağırlığı ve Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi

Özet

Şeker üretim endüstrisinde piyasadan temin edilen kireçtaşından elde edilen kireç söndürülerek, süzülür ve üretimde şerbet arıtımında kullanılır. Şerbete ilave edilen fazla kireç ise karbonatlama kazanlarında CO_2 yardımı ile şerbetten uzaklaştırılır. Kalan çamurlu şerbetin çamur kısmı ise dekantörlerde çöktürülerek; filtreler yardımı ile süzülür. Filtrelerden çıkan bu atığa "Pres Filtre Atığı (PFW)" adı verilir. Deneysel çalışmada, ön inceleme olarak yapılan literatür taraması doğrultusunda standart kum, su, sodyum silikat (Na_2SiO_3), uçucu kül ve PFW kullanılarak harç numuneler elde edilmiştir. Bu harç numuneler üzerinde farklı elek, kür koşullarına ve su içeriği değişkenlerine bağlı olarak taze ve sertleşmiş harç özellikleri birim ağırlık ve basınç dayanım testleri uygulanarak, değerlendirilmiştir. Harç numuneler ağırlıkça kum/bağlayıcı oranı 3.0 olacak şekilde hazırlanmıştır. 220 ml alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 75 gr su içeriğine ve 75 μm elekten geçen uçucu kül içeriğine sahip olan PFA10T2S2E1 tipi numunelerin basınç dayanımı değerlendirildiğinde; 7 günlük basınç dayanımının 18.53 MPa, 28 günlük 19.58 MPa ve 56 günlük 19.78 MPa olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin sertleştirilmiş birim ağırlığı değerlendirildiğinde (28. gün), en yüksek sertleştirilmiş birim ağırlığa 220 ml Na_2SiO_3 alkali aktivatörü ile aktive edilen, 75 μm elekten geçen uçucu kül ve 75 gr su içeriğine sahip PFA10T2S2E1 tipi numunelerin sahip olduğu tespit edilmiştir (1.934 kg/dm^3).

Anahtar kelimeler: atık; pres filtre atığı; geopolimer harç; birim ağırlık; basınç dayanımı.

1. Giriş

Günümüzde bilim ve teknolojide yaşanan ilerlemeler yaşamın her alanında ve her sektörde gelişmelere neden olduğu gibi inşaat sektöründe de yeniliklere ve ilerlemelere ışık tutmaktadır (Ateşin, 2014). Zamanla endüstriyel faaliyetlerin artış göstermesi nedeni ile birçok farklı özelliğe sahip katı, sıvı veya gaz olmak üzere üretim atığının ortaya çıktığı görülmektedir. Bu atıkların çevresel etkileri, üretime etkiyen maliyetleri düşünüldüğünde ülke ve dünya ekonomisine ağır bir yük ve sorumluluk getirdiği çok açıktır. Her ne kadar yasal prosedürler çerçevesinde gerekli önlemler alınmaya çalışılsa da üretim süreci kaynaklı bazı olumsuz koşullar çevresel dengeyi bozabilecek niteliktedir. Örnek olarak, çimento üretim sürecinde enerji ihtiyacının fazla olması ile birlikte bu üretim süreci doğadaki önemli miktarda CO_2 emisyonunun da kaynağıdır. Çimento üretim teknolojisine bağlı olarak 1 ton çimento üretiminde 0.73 ton ile 0.99 ton arasında CO_2 emisyonunun açığa çıktığı tespit edilmiştir. (Vejmelkova vd, 2015).

Beton; su, agrega, çimento ve mineral ve/veya kimyasal katkı maddelerinden oluşan bir kompozit malzemedir (Teixeria vd, 2016). Beton bileşeni olan çimentoya su eklendiğinde tepkimeye girerek betonun diğer ana bileşenlerini bir arada tutan bir bağlayıcı ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte yapay puzolanik özelliğe sahip olan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların betonda kullanımı genellikle çimentonun bir kısmının yerine kullanılması şeklinde gerçekleşir. Endüstriyel atık olan ve yapay puzolanik özelliğe sahip olan bu tip malzemelerin değerlendirilmesi ülkemizde 1990'lı yılların sonlarında başlamıştır. Son yıllarda ise gerek atıkların değerlendirilmesi gerek maliyetlerin düşürülmesi hususunda taze ve sertleşmiş beton standartlarına uygun şekilde

puzolanik özelliğe sahip çeşitli malzemelerin alkali aktivatörler yardımı ile jeopolimer üretiminde kullanılması üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve doğal puzolanlar ya portland çimentosu üretiminde klinker aşamasında ya da beton içerisinde portland çimentosu ağırlığının belirli oranlarda kullanılmaktadır. 2003 yılında çimentoda klinker kullanımı %85'lere düşerken bu oran 2010 yılında %77'ye düşmüştür. İleride ise bu oranın %71'e düşeceği tahmin edilmektedir. Amerika'da puzolanik malzemeler klinkerden daha çok hazır betonda kullanılmaktadır. Günümüzde Amerika'da kullanılan hazır betonların %60'ı çimento dışında puzolanik malzeme içermektedir (Juenger Maria vd, 2015).

Çimento, yüksek fırın cürufu ve üç tip alkali aktivatör ile yapılan bir çalışmada kontrol harçlarının donma çözünme etkisi altında kaldığı süreçte çevrim sayısı arttıkça çatlak miktarı artmış, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, elastisite modülü ve basınç dayanım değerleri azaldığı görülmüştür. Aktive edilmiş yüksek fırın cürufu içeren harçlarda bu parametrelerin azalma oranı düşmüştür. Birim ağırlıklar ve basınç dayanım deneyleri değerlendirildiğinde, donma çözülme sürecinde en verimli sonuçlar %100 yüksek fırın cürufu içeren sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilen numunelerden elde edilmiştir. Çıkan sonuçlar sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali aktivatörlerin harç yapımında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Topçu ve Canbaz, 2008).

Uçucu kül ve alkali aktivatör içeren geopolimer harçların ısıl kür koşulları ve sürecinde basınç dayanım değerleri üzerine yapılan deneysel çalışmada; çimento kullanmaksızın kum/uçucu kül=3.00, su/uçucu kül=0.29 ve sodyum/uçucu kül=0.10 oranlarında numuneler hazırlanarak, 4 saat, 1, 2, 3 ve 7 gün süresince 75^0C sıcaklıkta kür edilmiştir. Diğer numune grubu ise 4 saat, 1, 2, 3 ve 7 gün süresince 75^0C sıcaklıkta kür edildikten sonra toplamda 28 gün olacak şekilde laboratuvar ortamında (23 ± 2^0C ve bağıl nemi %50±5) havada kür edilmiştir. Geopolimer harcının 75^0C sıcaklıkta 4 saat, 1, 2, 3 ve 7 gün süresince küre tabii tutulup basınç dayanım değerleri ölçülen numuneler, 28 güne kadar bekletilen numuneler ile karşılaştırıldığında, 28 günlük numunelerin basınç dayanım değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Soğumadan sonra toplam 28 güne kadar bekletilen numunelerde geopolimerizasyon reaksiyonunun devam etmediği ve bundan dolayı dayanım artışlarının çok az olduğu ve hatta durduğu sonucuna ulaşılmıştır (Atiş vd., 2015).

Alkali aktivatörler (sodyum silikat ve %98 saflıkta sodyum hidroksit) ile taban külü içeren hafif geopolimerler elde edilmesi üzerine yapılan çalışmada 20 saat 75^0C'de etüvde ve sonrasında 20^0C'de havada kür ile yalnız 20^0C'de havada kür olmak üzere iki tip kürleme uygulanarak numunelerin bazı donma-çözünme, basınç dayanımları gibi bazı mekanik özelikleri incelenmiştir. En iyi numuneler taban külü ile sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren alkali çözeltileri aktivasyonu ile 20^0C oda sıcaklığı kür koşullarında elde edilen geopolimerler olmuştur. Bu geopolimerlerin birim ağırlığı 1.59 gr/cm^3, basınç dayanımı ise 18.51 MPa olarak bulunmuştur. Bu geopolimerlerin 30 ve 80 donma-çözünme çevrimi sonunda kütle kayıplarının sırası ile %3.7, %6.2; basınç dayanım kayıplarının ise sırasıyla %4.3 ve %11.5 olduğu tespit edilmiştir. 400^0C sıcaklığa kadar termal stabilitenin korunduğu, 600^0C'de dayanım kayıplarının çok yüksek olduğu görülmüştür. Çalışmada kullanılan agregaların yerine daha hafif ve daha yüksek sıcaklık direncine sahip agregalar kullanıldığında (zeolit, genleştirilmiş kil vb.) ısı yalıtımı ve yangın direnci yüksek geopolimerler elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır (Topçu ve Toprak, 2009).

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve palmiye yağı yakıtı külü gibi bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerin farklı sıcaklıklarda, kalsiyum içeriklerinde ve farklı aktivatör çözeltiler ile davranışlarını irdeleyen çalışmada; kalsiyum oksit oranının artması, işlenebilirliği ve priz süresini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca sadece aktivatör olarak sodyum hidroksit çözeltisinin kullanımı ile işlenebilirliğin azaldığı, priz süresinin arttığı görülmüştür. Sodyum silikat çözeltisi içeren numunelerde ise 60^0C'de yüksek basınç

dayanım değerleri elde edilmiştir. Yüksek kalsiyum içeren geopolimerlerin laboratuvar ortam sıcaklığında tamir materyali olarak ta kullanılabileceği görülmüştür (Huseien vd., 2016).

Beton ve harçlarda çimento yerine kısmi olarak kullanılan puzolanik materyaller betonun durabilitesine olumlu etki yapığı tespit edilmiştir. Puzolanların kimyasal kompozisyonunda önemli miktarda amorf silika olduğu görülmüştür. Çimento ile reaksiyonunda serbest kireç ile puzolan bünyesindeki silikanın etkileşimi sonucu yeni silikatlar ortaya çıkmış ve böylelikle mekanik ve durabilite özellikleri olumlu yönde gelişme gösterdiği belirlenmiştir. (Arenas-Piedrahita vd, 2016).

Betonu oluşturan bileşenler ayrı ayrı değerlendirildiğinde; çimento faktörünün beton bünyesinde hem ekonomik olarak en fazla maliyete sahip olduğu hem de kendi üretim sürecinde yüksek oranda açığa çıkardığı gazların çevreye vermiş olduğu zararlı etkiler yapılan çalışmalar doğrultusunda tespit edilmiştir. Öte yandan endüstriyel teknolojinin gelişmesine paralel olarak ortaya çıkan çeşitli endüstriyel atıkların da bir hayli fazla olduğu saptanmıştır. Bu bağlamda, bağlayıcılık özelliğine sahip olan çeşitli endüstriyel atıklar belirlenerek beton teknolojisinde kullanılması; bu tip atıkların geri dönüşümü ve maliyet yaklaşımı açısından önemli bir yer tutmaktadır. Bir literatür taraması yapıldığında günümüzde birçok araştırmacı betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine olumlu sonuçlar alabileceği, bağlayıcılık özelliğine sahip belirli endüstriyel atıklar üzerine yoğunlaşarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ancak sanayinin geniş tabanlı olması ve buna bağlı olarak açığa çıkan atık malzemelerin farklı özelliklere sahip olması önceki araştırmalar dışında kullanılabilecek farklı tipte atıkların varlığı üzerine çalışmaları hızlandırmıştır. Bir gıda imalat endüstrisi olan şeker sanayi bünyesinde şeker üretim dönemlerinde açığa çıkan atıkların değerlendirilmesi kapsamında yapılacak olan araştırma projesi, atık yönetimi ve geri dönüşümü açısından büyük bir önem taşımaktadır. Böylelikle bir şeker fabrikası atığı olan, bağlayıcı özelliğe sahip malzemeler ve alkali aktivatörler ile birlikte belirli oranlarda harç karışımlarda çimento yerine kullanıldığı takdirde, çimento üretim sürecinden kaynaklı çevresel zararlı etkileri ve harcın üretim maliyetlerini azaltacak aynı zamanda bu endüstriyel atığın da geri dönüşümü gerçekleştirilmiş olacaktır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Deneysel çalışmada harç üretiminde özelikleri aşağıda verilen harç karma suyu, standart kum, uçucu kül, pres filtre atığı, alkali aktivatör (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Elde edilen harç numuneler farklı kür tiplerine tabi tutulmuş, taze ve sertleşmiş özellikleri çerçevesinde birim ağırlık ve basınç dayanım değerleri incelenmiştir.

2.1.1. Pres Filtre Atığı (PFA)

Uygulamada, Eskişehir Şeker Fabrikası'ndan temin edilen atık malzeme uçucu kül ile karışımda kullanılarak harç numuneler elde edilmiştir. Pres filtre atığının kimyasal analizi Tablo 1.'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Pres filtre toprağının kimyasal analizi (PFA)

Bileşenler	Kütlece Oran (%)
MgO	2.0242
Al_2O_3	1.2064
SiO_2	3.7480
P_2O_5	0.1948
SO_3	0.2142
K_2O	0.0910
CaO	56.3714
TiO_2	0.0783
Cr_2O_3	0.0392
Fe_2O_3	1.0255
BaO	0.2331
Kızdırma Kaybı	34.7740

2.1.2. Uçucu Kül (UK)

Çalışmalarda kullanılmış olan uçucu kül Tunçbilek termik santralinden temin edilmiş olup; deneylere başlamadan önce uçucu külün kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 2. ve Tablo 3.'te görüldüğü üzere tespit edilmiştir.

Tablo 2. Uçucu külün kimyasal analizi (UK) (Tunçbilek)

Bileşenler	Bileşenleri Oranı (%)
SiO_2	52,31
Al_2O_3	16,49
Fe_2O_3	12,38
CaO	5,72
MgO	5,01
SO_3	1,16
K_2O	2,27
Kızdırma Kaybı	1,13
Serbest CaO	0,15
Klorür	0,0106

Tablo 3. Uçucu külün fiziksel analizi (UK) (Tunçbilek)

Fiziksel Özellikler	90 μ (%)	45 μ (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Blaine (cm^2/gr)
	-	35	2,05	3200

2.1.3. Standart Kum

Deneysel çalışmada karışımlar hazırlanırken TSE EN 196-1 standardına uygun olarak Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Örnek standart kumun elek analizi sonucunda belirlenen tane büyüklüğü dağılımı ve standart sınır değerleri Tablo 4.'te verilmiştir.

Tablo 4. Örnek standart kumun granülometresi ve sınır değerleri

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,50	1,00	1,60	2,00
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Sınır(%)	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0

2.1.4. Karma Suyu

Harç karma suyu olarak laboratuvarımızda bulunan Eskişehir bölge suyu kullanılmıştır. Harç üretiminde kullanılan karma suyunun kimyasal analizi Tablo 5'te gösterilmiştir. Karma suyunun yapılan kimyasal analizinde suyun TS 1247'deki karma suyu niteliklerine uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Kullanılan karma suyunun kimyasal analizi

Parametreler	Ölçü Birimi	Değer
pH	-	7.49 (20 °C)
Klorür (Cl^-)	mg/L	6.53
Sülfat (SO_4)	mg/L	91.5
Magnezyum (Mg)	mg/L	41.5
Kalsiyum (Ca)	mg/L	63.8
Çinko (Zn)	mg/L	0.375
Bakır (Cu)	mg/L	0.092
Demir (Fe)	mg/L	0.074
Nitrat (NO_3-N)	mg/L	4.35
Serbest Klor (ClO_2)	mg/L	< 0.05
Toplam Klor (ClO_2)	mg/L	< 0.09

2.1.5. Alkali Aktivatörler (Na_2SiO_3)

Deneysel çalışmada elde edilen karışımlara belirli oranlarda sodyum silikat aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu aktivatör çeşitli kimyasal materyal satışı yapan firmalardan temin edilmiştir.

2.2. Yöntem

Deneysel çalışmalara başlamadan önce standartlar çerçevesinde kontrol harç numuneler elde edilmiştir. Deneysel çalışmada, ön inceleme olarak yapılan literatür taraması doğrultusunda; standart kum, şebeke suyu ile belirlenen oranda sodyum silikat (Na_2SiO_3) alkali aktivatörü, uçucu kül ve pres filtre atığı kullanılarak farklı kür koşulları ile farklı oranda pres filtre atığı ve su içeren numuneler elde edilmiştir. Bu harç numunelere daha sonra taze ve sertleşmiş beton deneyleri kapsamında birim ağırlık ve basınç dayanım deneyleri uygulanarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Harç karışımları ağırlıkça kum/bağlayıcı oranı 3.0 olacak şekilde hazırlanmış olup; elde edilen numuneler, 75 µm elekten geçirilen ve geçirilmeyen uçucu kül ile 75 µm elekten geçirilen pres filtre atığı farklı su/sodyum silikat oranları kullanılarak farklı kür tiplerine tabi tutulmuştur. Elde edilen numuneler harç kalıpları ilk dökümden hemen sonra standart olarak 24 saat hava kürüne tabi tutulmuş daha sonra farklı derecelerde (120^0C, 140^0C) farklı sürelerde (24 saat, 48 saat) kürlere tabi tutulmuşlardır. Bir tip numune 24 saat hava küründen sonra, 48 saat 120^0C küre tabi tutulmuş, diğer bir tip numune 24 saat hava küründen sonra 48 saat 120^0C küre ve 24 saat 140^0C küre tabi tutulurken, başka diğer bir tip numune ise 24 saat hava küründen sonra 72 saat 120^0C etüv ortamında küre tabi tutulmuştur.

Tüm numune grupları farklı kürlere tabi tutulmadan önce 24 saat havada kürlenerek kum/bağlayıcı oranları da sabit tutularak deneylere tabi tutulmuştur. Farklı kür koşulları için sodyum silikat (220 mlt Na_2SiO_3), farklı oranlarda pres filtre atığı, farklı oranlarda uçucu kül için 4x4x16 cm ebatlarında olmak üzere numuneler üretilmiştir. Ön deneylerle belirlenen oranlar sonucunda elde edilen harç karışımlar üzerinde kür koşulları çerçevesinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmış olup; bu deneyler birim ağırlık ve basınç dayanımı deneylerini kapsamaktadır.

Uçucu kül ve pres filtre atığının farklı kür koşulları altında 220 mlt (Na_2SiO_3) alkali aktivatör yardımıyla kullanım oranının değişmesi durumunda harç numunelerinde oluşacak değişimlerin incelenmesi amacıyla karışımlarda su/bağlayıcı değişken ve kum/bağlayıcı miktarı sabit tutulmuştur. Sırasıyla uçucu kül, pres filtre atığı ve için uygulanan oranlar Tablo 6.'da sunulmuştur.

Tablo 6. Numune karışım oranları ve kür tipleri

Numune Kodu	Karışım Oranı (%)	Kür Tipi	Su/ Na_2SiO_3	Kum/ Bağlayıcı	Elek (UK için)
PFA10T1S1E1	%10PFA%90UK	24 saat Hava Kürü 48 saat 120^{0}C Etüv	0.386	3.0	75µm elekten geçmiş
PFA10T1S1E2	%10PFA%90UK	24 saat Hava Kürü 48 saat 120^{0}C Etüv	0.386	3.0	75µm elekten geçmemiş
PFA10T2S1E1	%10PFA%90UK	24 saat Hava Kürü 72 saat 120^{0}C Etüv	0.386	3.0	75µm elekten geçmiş
PFA10T2S2E1	%10PFA%90UK	24 saat Hava Kürü 72 saat 120^{0}C Etüv	0.341	3.0	75µm elekten geçmiş
PFA20T3S1E2	%20PFA%80UK	24 saat Hava Kürü 48 saat 120^{0}C Etüv 24 saat 140^{0}C Etüv	0.386	3.0	75µm elekten geçmemiş

Tabloda da belirtildiği üzere deneysel çalışmada belirlenen oranlarda pres filtre atığı ve uçucu kül 220 mlt sodyum silikat alkali aktivatör yardımıyla; 1350 gr standart kum ve 75 gr ve 85 gr su harç karıştırıcısında karıştırılmıştır. Numune bileşenlerinin ağırlıkları Tablo 7.'de verilmiştir.

Tablo 7. Numune bileşenleri ağırlıkları

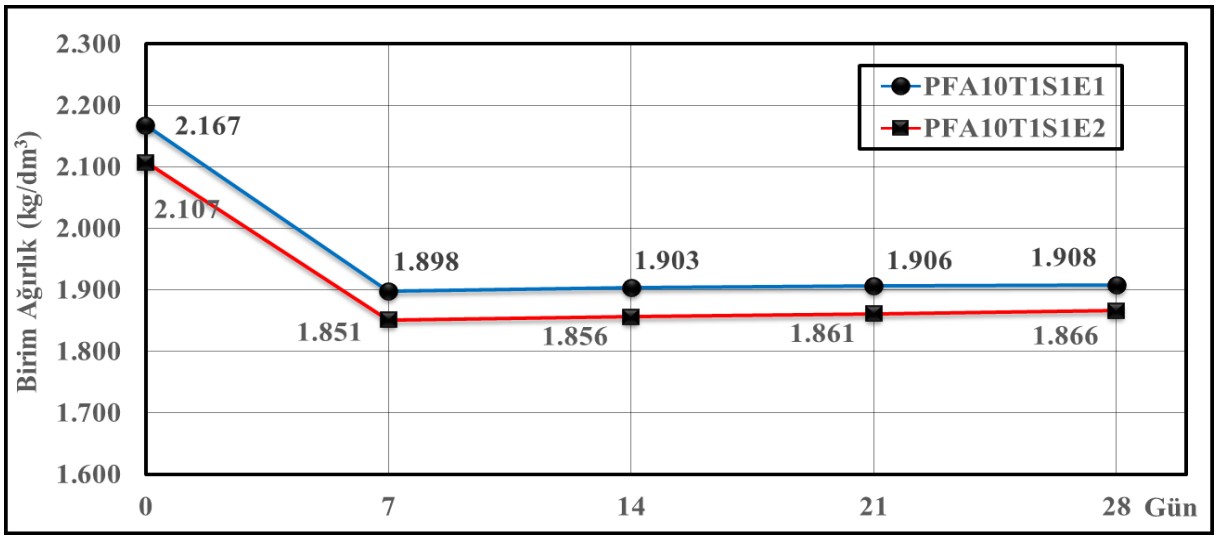
Bileşen	PFA10T1S1E1	PFA10T1S1E2	PFA10T2S1E1	PFA10T2S2E1	PFA20T3S1E2
UK (gr)	405	405	405	405	360
PFA (gr)	45	45	45	45	90
Kum (gr)	1350	1350	1350	1350	1350
Su (gr)	85	85	85	75	85
Kum/Bağlayıcı	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Su/Na_2SiO_3	0.386	0.386	0.386	0.341	0.386

3. Sonuçlar ve Tartışma

Üretilen harç numunelerinin sertleşmiş haldeki özeliklerini belirlemek amacıyla taze ve sertleşmiş birim ağırlık ile basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık deneyi 40x40x160mm ebatlarındaki

prizmatik numuneler üzerinde yapılmıştır. Birim ağırlığı TS EN 12390-7 (2010)'a göre belirlemek amacı ile tüm numuneler kür edildikten sonra 30 kg kapasiteli 2 gr duyarlıklı terazide tartılmıştır. Ardından tüm numunelerin en, boy ve yükseklikleri kumpas kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. Boyutları belirlenen numunelerin hacimleri hesaplanmıştır. Ağırlığın, hacme oranı ile tüm numunelerin birim ağırlıkları (kg/dm^3) belirlenmiştir.

3.1. Taze ve Sertleşmiş Birim Ağırlıkların Değerlendirilmesi

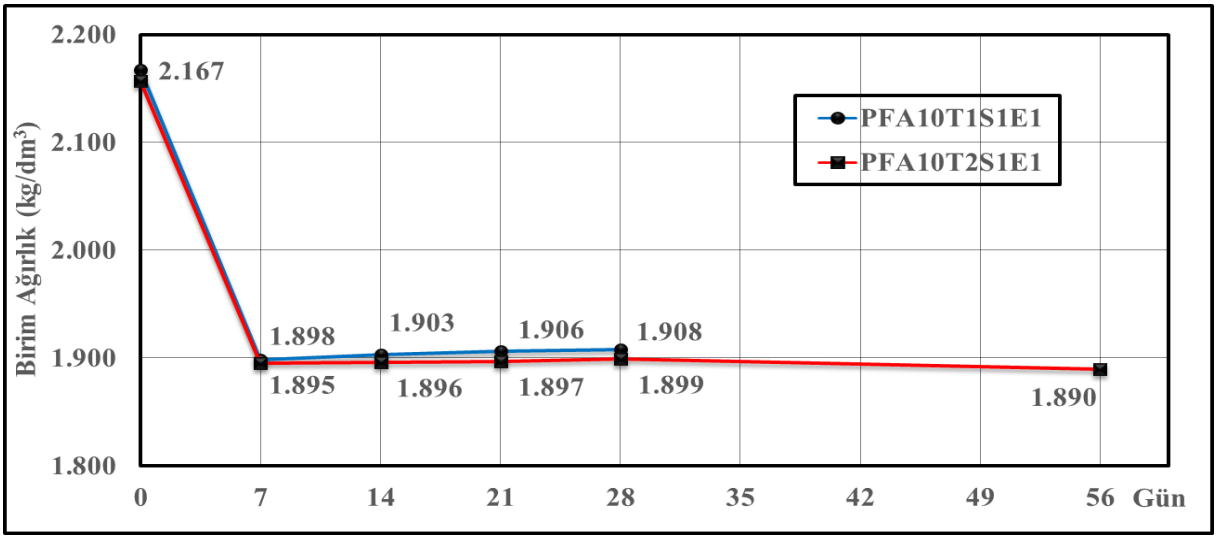


Şekil 1. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerine göre değişimi

Tablo 8. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/Na_2SiO_3	0. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	2.167	1.908
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	2.107	1.866

PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerinin taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerlendirildiğinde Şekil 1.'de görüldüğü üzere 0. günde (ıslak birim ağırlık) birim ağırlıkların farklı olduğu, 7. günde (taze birim ağırlık) 75 µm elekten geçirilen uçucu kül içeren numunelerin birim ağırlıklarının, 75 µm elekten geçirilmeyen uçucu kül içeren numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerin, 24 saat süreyle hava ve 48 saat süreyle 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulması ile numunelerin bünyesindeki nemi hızla kaybettiği görülmüş toplamda 24 saat hava ve 48 saat sıcaklık kürüne tabi tutulmuş numunelerde ağırlık kaybının sırasıyla PFA10T1S1E1 tip numunelerde 68.86 gr, PFA10T1S1E2 tip numunelerde 65.54 gr olduğu tespit edilmiştir. 28. günde (sertleşmiş birim ağırlık) ise yapılan birim ağırlık değerlendirmesinde 24 saat süreyle hava ve 48 saat süreyle 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulması ile PFA10T1S1E1 ortamdaki nemi alarak ağırlıkça 7. güne göre 28. gün 2.56 gr değerinde bir artış, PFA10T1S1E2 ise ortamdaki nemi alarak ağırlıkça 7. güne göre 28. gün 3.84 gr değerinde bir artış olduğu saptanmıştır. PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerinin 28. gün sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirildiğinde 75 µm elekten geçirilen uçucu kül içeren numune (PFA10T1S1E1) ağırlıklarının PFA10T1S1E2 tip numunelere göre 10.752 gr daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

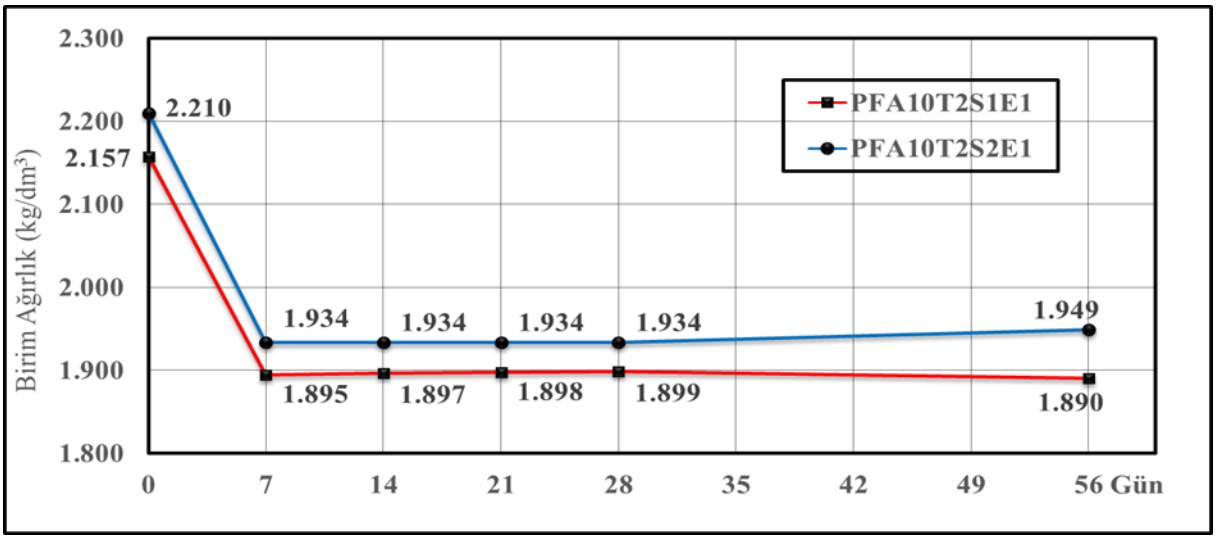


Şekil 2. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerine göre değişimi

Table 9. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/Na_2SiO_3	0. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	2.167	1.908
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	2.157	1.899

PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerinin taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerlendirildiğinde Şekil 2.'de görüldüğü üzere 0. günde (ıslak birim ağırlık) birim ağırlıkların farklı olduğu, 7. günde (taze birim ağırlık) 24 saat hava kürü ve 48 saat 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelerin birim ağırlıklarının, 24 saat hava kürü ve 72 saat 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. PFA10T1S1E1 tip numunelerin 24 saat hava ve 48 saat 120^{0}C sıcaklıkta küre tabi tutulması ve PFA10T2S1E1 tip numunelerinde 24 saat hava ve 72 saat 120^{0}C sıcaklıkta küre tabi tutulması ile numunelerin 7 gün sürecinde bünyesindeki nemi hızla kaybettiği görülmüştür. 28. gün sonunda PFA10T1S1E1 tip numunelerin ağırlık kaybının 66.30 gr olduğu, PFA10T2S1E1 tip numunelerin ağırlık kaybının ise 68.60 gr olduğu tespit edilmiştir. 24 saat hava ve 72 saat 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulan PFA10T2S1E1 numunelerin, 24 saat ve 48 saat 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulan PFA10T1S1E1 numunelere göre 28. günde yaklaşık 2.30 gr kadar daha fazla nem kaybettiği saptanmıştır.

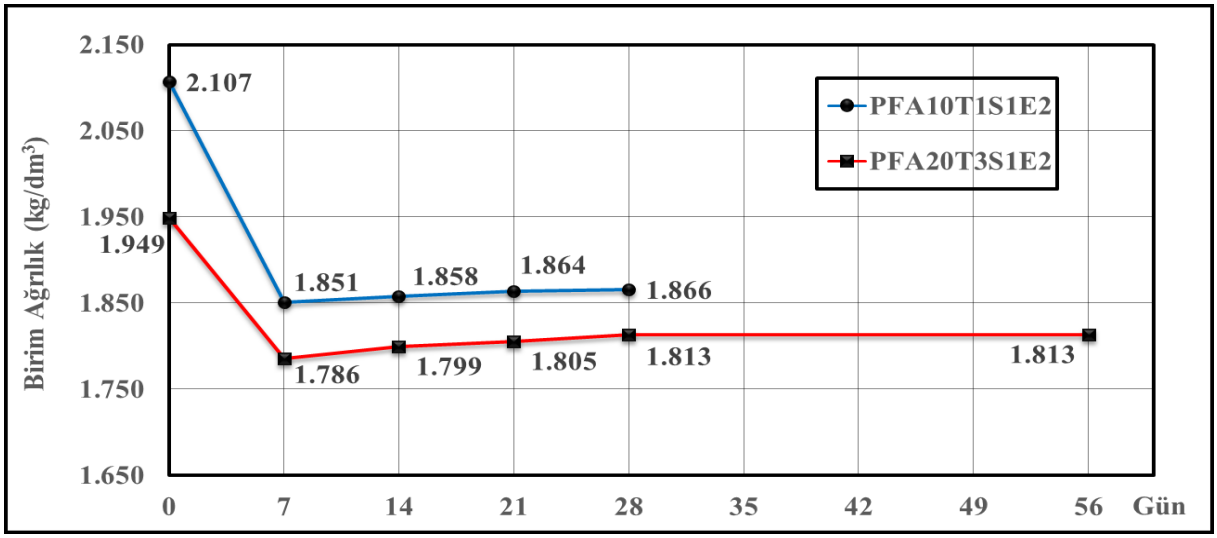


Şekil 3. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerine göre değişimi

Table 10. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/Na_2SiO_3	0. Gün	56. Gün
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	2.157	1.890
PFA10T2S2E1	220 mlt	0.341	2.210	1.949

Şekil 3.'te 220 mlt Na2SiO3 alkali aktivatörü ile aktive edilen ve farklı miktarda su içeriğine sahip PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerinin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirilmiş olup; görüldüğü üzere 0. günde (ıslak birim ağırlık) birim ağırlıkların farklı olduğu, 7. günde (taze birim ağırlık) ise PFA10T2S2E1 tip numunelerin PFA10T2S1E1 tip numunelere göre nem kaybının fazla olduğu görülmüştür. Numuneler aynı tip kür koşullarına tabi tutulmuş (24 saat hava kürü ve 72 saat 1200C sıcaklık kürü), elde edilen veriler ışığında 7. günde PFA10T2S2E1 tip numunelerin PFA10T2S1E1 tip numunelere göre 3.6 gr daha fazla nem kaybettiği, 28. günde 4.35 gr daha fazla nem kaybettiği ve 56. günde ise PFA10T2S1E1 tip numunelerin PFA10T2S2E1 tip numunelere göre 1.54 gr daha fazla ne kaybettiği saptanmıştır. Bu numunelerin içeriği olan uçucu kül 75 μm elekten geçirilmiştir. PFA10T2S1E1 tip numunelerinde 0. günden 56. güne kadar olan toplam nem kaybı 66.86 gr, PFA10T2S2E1 tip numunelerinde ise toplam nem kaybının 68.35 gr olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E2 ve PFA20T3S1E2 numunelerine göre değişimi

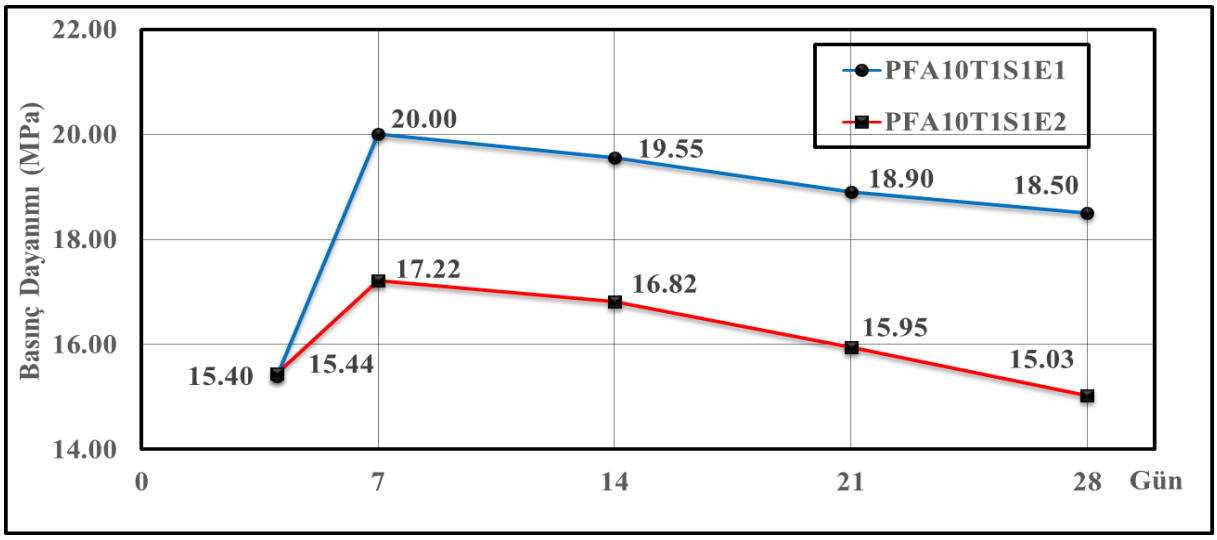
Table 11. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E2 ve PFA20T3S1E2 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/Na_2SiO_3	0. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	2.107	1.866
PFA20T3S1E2	220 mlt	0.386	1.949	1.813

Şekil 4'te 220 mlt Na_2SiO_3 alkali aktivatörü ile aktive edilen farklı oranda PFA içeriğine sahip numuneler farklı iki tip kür koşuluna tabi tutulmuştur (PFA10T1S1E2: 24 saat hava kürü-48 saat 120^0C sıcaklık, PFA20T3S1E2: 24 saat hava kürü-48 saat 120^0C sıcaklık-24 saat 140^0C sıcaklık). Bu numunelerin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirilmiş olup, görüldüğü üzere 0. günde (ıslak birim ağırlık) birim ağırlıkların farklı olduğu, 7. günde ise PFA20T3S1E2 tip numunelerin PFA10T1S1E2 tip numunelere göre nem kaybının daha az olduğu belirlenmiştir. Farklı tip kür koşullarına tabi tutulmuş ve farklı oranda PFA içeren numunelerde 0. gün ve 7. gün aralığında PFA10T1S1E2 tip numunelerde nem

kaybının 65.53 gr, PFA20T3S1E2 tip numunelerde ise bu ağırlığın 41.38 gr olduğu tespit edilmiştir. 7. günde PFA10T1S1E2 tip numune PFA20T3S1E2 tip numuneye göre yaklaşık 23 gr daha fazla nem kaybetmiştir. 28. gün ağırlık kayıpları değerlendirildiğinde ise yine PFA10T1S1E2 tip numuneler PFA20T3S1E2 tip numunelere göre yaklaşık 26 gr daha fazla nem kaybı olduğu saptanmıştır. 56. günde ise PFA20T3S1E2 tip numunelerin 28. güne göre nem kaybı olmadığı tespit edilmiş olup; 7. güne göre ise 7 gr kadar bir ağırlık artışı görülmüştür.

3.2. Basınç Dayanımların Değerlendirilmesi



Şekil 5. Basınç Dayanımının PFA10T1S1E1ve PFA10T1S1E2 numunelerine göre değişimi

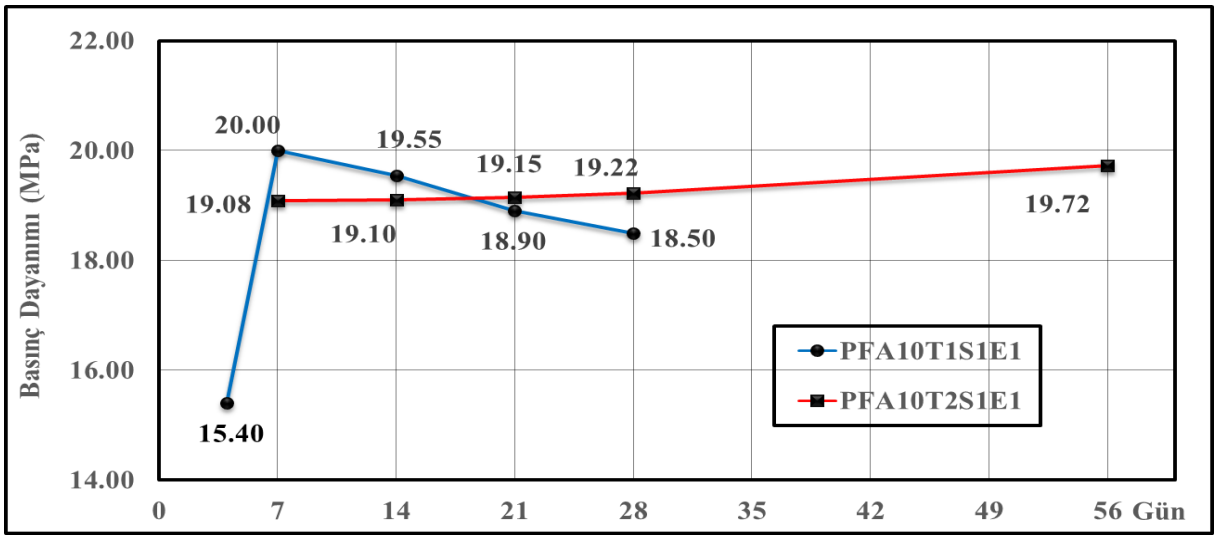
Tablo 12. Basınç Dayanımının PFA10T1S1E1ve PFA10T1S1E2 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/Na_2SiO_3	7. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	20.00	18.50
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	17.22	15.03

Şekil 5.'te görüldüğü üzere 4. günde basınç dayanımlarının birbirine oldukça yakın olduğu, 7. günde ise 75 µm elekten geçirilen uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımlarının, 75 µm elekten geçirilmeyen uçucu kül içeren numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerin, 24 saat süreyle hava ve 48 saat süreyle 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulması ile 7. günde PFA10T1S1E1 tip numunede basınç dayanımlarında görülür bir artış sağlanmış 24 saat hava ve 48 saat sıcaklık kürüne tabi tutulmuş numunelerde dayanımda artışın PFA10T1S1E1 tip numunelerde 3.1 MPa, dayanımda azalmanın ise PFA10T1S1E2 tip numunelerde 0.40 MPa gr olduğu tespit edilmiştir. 28. günde (sertleşmiş birim ağırlık) ise yapılan birim ağırlık değerlendirmesinde 24 saat süreyle hava ve 48 saat süreyle 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulması ile PFA10T1S1E1 dayanımda azalmanın 7. güne göre 28. gün 21.50 MPa olduğu, PFA10T1S1E2 ise dayanımca 7. güne göre 28. gün 2.19 MPa değerinde bir azalma olduğu saptanmıştır. PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerinin 28. gün dayanım değerleri değerlendirildiğinde 75 µm elekten geçirilen uçucu kül içeren numune (PFA10T1S1E1) dayanımlarının PFA10T1S1E2 tip numunelere göre 3.47 MPa daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

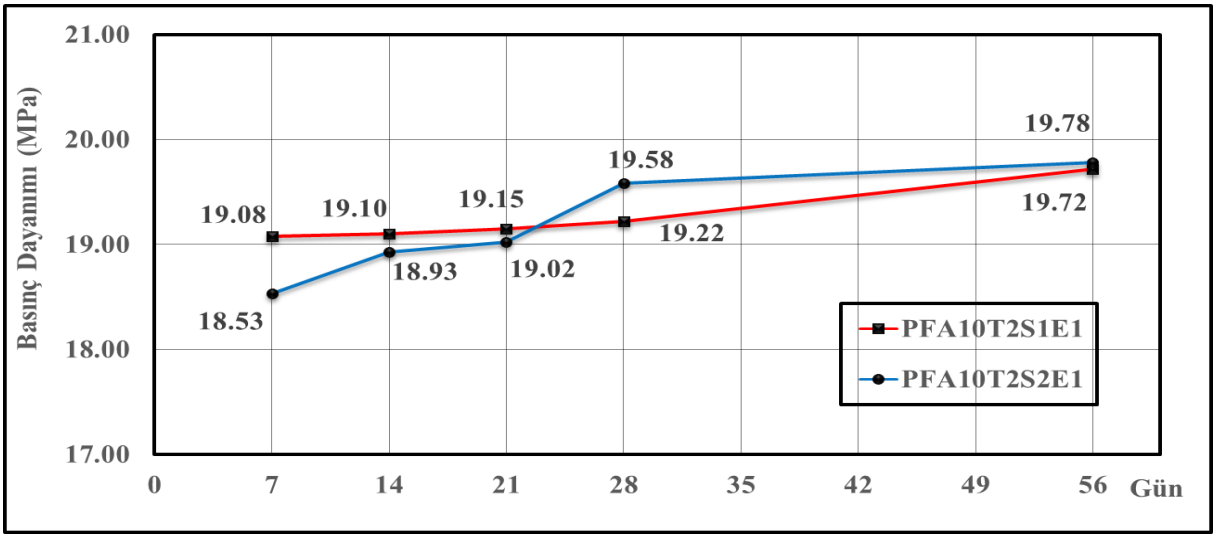
Tablo 13. Basınç Dayanımın PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/Na_2SiO_3	7. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	20.00	18.50
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	19.08	19.22



Şekil 6. Basınç Dayanımın PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerine göre değişimi

PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerinin basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde Şekil 6.'da görüldüğü üzere 7. günde 24 saat hava kürü ve 48 saat 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelerin basınç dayanımlarının, 24 saat hava kürü ve 72 saat 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. PFA10T1S1E1 tip numunelerin 24 saat hava ve 48 saat 120^{0}C sıcaklıkta küre tabi tutulması ve PFA10T2S1E1 tip numunelerinde 24 saat hava ve 72 saat 120^{0}C sıcaklıkta küre tabi tutulması ile numunelerin 7 gün sürecinde kazandıkları dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. 28. gün sonunda PFA10T1S1E1 tip numunelerin dayanım kaybının 1.50 MPa olduğu, PFA10T2S1E1 tip numunelerin dayanım kazanımının ise 0.14 MPa olduğu tespit edilmiştir. 24 saat hava ve 72 saat 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulan PFA10T2S1E1 numunelerinin, 24 saat ve 48 saat 120^{0}C sıcaklık kürüne tabi tutulan PFA10T1S1E1 numunelerine göre 28. günde yaklaşık 0.72 MPa kadar daha fazla dayanıma sahip olduğu saptanmıştır. 56. gün sonunda 24 saat hava ve 72 saat 1200C sıcaklık kürüne tabi tutulan PFA10T2S1E1 tip numunelerin 7. güne göre 0.64 MPa, 28. güne göre ise 0.50 MPa dayanım kazanımı olduğu tespit edilmiştir.

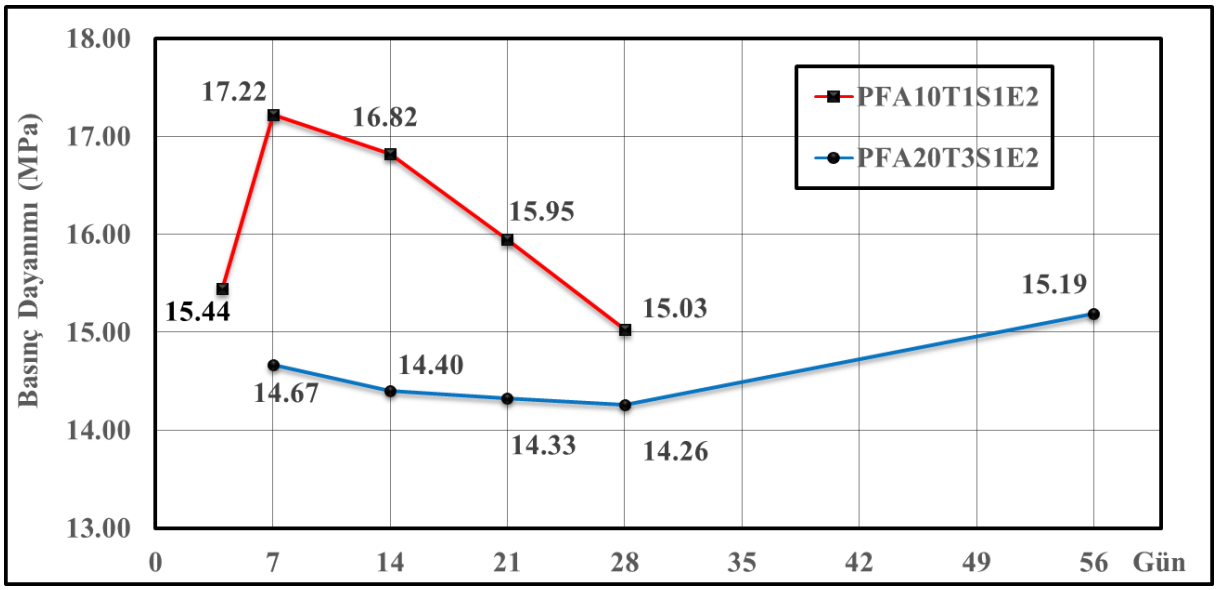


Şekil 7. Basınç Dayanımın PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerine göre değişimi

Tablo 14. Basınç Dayanımın PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/Na_2SiO_3	7. Gün	56. Gün
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	19.08	19.72
PFA10T2S2E1	220 mlt	0.341	18.53	19.78

Şekil 7.'de 220 mlt Na_2SiO_3 alkali aktivatörü ile aktive edilen ve farklı miktarda su içeriğine sahip PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerinin basınç dayanım değerleri değerlendirilmiş olup; görüldüğü üzere 7. günde basınç dayanım değerlerinin farklı olduğu ve yine 7. günde PFA10T2S2E1 tip numunelerin PFA10T2S1E1 tip numunelere göre daha az miktarda dayanım kazandığı görülmüştür. Numuneler aynı tip kür koşullarına tabi tutulmuş (24 saat hava kürü ve 72 saat 120^0C sıcaklık kürü), elde edilen veriler ışığında 7. günde PFA10T2S2E1 tip numunelerin PFA10T2S1E1 tip numunelere göre 0.55 MPa daha az dayanıma sahip olduğu, 28. günde 0.36 MPa daha fazla dayanıma sahip olduğu ve 56. günde ise PFA10T2S1E1 tip numunelerin PFA10T2S2E1 tip numunelere göre 0.06 MPa daha az dayanıma sahip olduğu saptanmıştır. Bu numunelerin içeriği olan su farklı miktarlarda numune karışımlarında kullanılmıştır. PFA10T2S1E1 tip numunelerinde 7. günden 56. güne kadar olan toplam dayanım artışı 0.64 MPa, PFA10T2S2E1 tip numunelerinde ise toplam dayanım artışının 1.25 MPa olduğu hesaplanmıştır. Her iki tip numunede de dayanım artışının fazla olduğu süreç 7. gün ile 56. gün arasında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Basınç Dayanımın PFA10T1S1E2 ve PFA20T3S1E2 numunelerine göre değişimi

Tablo 15. Basınç Dayanımın PFA10T1S1E2 ve PFA20T3S1E2 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/Na_2SiO_3	7. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	17.22	15.03
PFA20T3S1E2	220 mlt	0.341	14.67	14.26

Şekil 8'te 220 mlt Na_2SiO_3 alkali aktivatörü ile aktive edilen farklı oranda PFA içeriğine sahip numuneler farklı iki tip kür koşuluna tabi tutulmuştur (PFA10T1S1E2: 24 saat hava kürü-48 saat 120^0C sıcaklık, PFA20T3S1E2: 24 saat hava kürü-48 saat 120^0C sıcaklık-24 saat 140^0C sıcaklık). Bu numunelerin basınç dayanım değerleri değerlendirilmiş olup, görüldüğü üzere 7. günde basınç dayanım değerlerinin farklı olduğu, 28. günde ise PFA20T3S1E2 tip numunelerin PFA10T1S1E2 tip numunelere göre daha az basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Farklı tip kür koşullarına tabi tutulmuş ve farklı oranda PFA içeren numunelerde 7. gün ve 28. gün aralığında PFA10T1S1E2 tip numunelerde dayanım kaybının

2.19 MPa, PFA20T3S1E2 tip numunelerde ise bu dayanım 0.41 MPa olduğu tespit edilmiştir. 7. günde PFA10T1S1E2 tip numuneler PFA20T3S1E2 tip numunelere göre yaklaşık 2.55 MPa daha fazla dayanım kazanmıştır. 28. gün basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde ise PFA10T1S1E2 tip numunelerin PFA20T3S1E2 tip numunelere göre yaklaşık 0.77 MPa daha fazla dayanım kazandığı saptanmıştır. 56. günde ise PFA20T3S1E2 tip numunelerin 28. güne göre dayanım kazandığı tespit edilmiş olup; 7. güne göre ise 0.52 MPa kadar bir dayanım artışı görülmüştür.

4. Sonuç

Basınç dayanım değerleri ele alındığında; 28 günlük en yüksek basınç dayanım değerine 220 mlt Na_2SiO_3 alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen PFA10T2S2E1 tip numunelerde görülmüş, 56 günlük en yüksek dayanım değeri yine PFA10T2S2E1 tip numunelerde saptanmıştır.

Basınç dayanım değerlerinin numunelerin farklı sıcaklıklar altında kürleme yapıldığı dikkate alınacak olursa; 28. gün sonunda 24 saat hava-72 saat 120^0C kür tipine tabii tutulan ve içerdiği uçucu kül 75 μm elekten geçirilmiş numunelerin diğer tip numunelere göre basınç dayanım değerlerinin genel olarak daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin bünyesindeki su miktarının az bir miktar azaltılması ile dayanımın arttığı, kür tiplerinde sıcaklı artışı ile dayanımın arttığı, numune bünyesindeki PFA oranının artması ile de dayanımın azaldığı tespit edilmiştir.

220 mlt alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 75 gr su içeriğine sahip olan, 75 μm elekten geçirilmiş uçucu kül içeriği olan PFA10T2S2E1 tip numunelerin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirildiğinde; 7 günlük birim ağırlık değerinin 1.934 kg/dm^3, 28 günlük birim ağırlık değerinin ise yine 1.934 kg/dm^3 olduğu tespit edilmiştir.

220 mlt alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 85 gr su içeriğine sahip olan, 75 μm elekten geçirilmemiş uçucu kül içeriği olan PFA20T3S2E1 tip numunelerin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirildiğinde; 7 günlük birim ağırlık değerinin 1.786 kg/dm^3, 28 günlük birim ağırlık değerinin ise 1.813 kg/dm^3 olduğu tespit edilmiştir.

220 mlt alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 75 gr su içeriğine sahip olan, 75 μm elekten geçirilmiş uçucu kül içeriği olan PFA10T2S2E1 tip numunelerin basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde; 7 günlük basınç dayanım değerinin 18.53 MPa, 28 günlük basınç dayanım değerinin ise 19.58 MPa, 56 günlük basınç dayanım değerinin 19.78 MPa olduğu tespit edilmiştir.

220 mlt alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 85 gr su içeriğine sahip olan, 75 μm elekten geçirilmemiş uçucu kül içeriği olan PFA20T3S2E1 tip numunelerin basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde; 7 günlük basınç dayanım değerinin 14.67 MPa, 28 günlük basınç dayanım değerinin 14.26 MPa, 56 günlük basınç dayanım değerinin ise 15.19 MPa olduğu tespit edilmiştir.

Su ve PFA içeriği diğer numunelere kıyasla az olan, tabi tutulduğukürleme tipinde daha fazla ve daha uzun süre sıcaklıkta kalan ve bünyesinde 75 μm elekten geçirilmiş uçucu kül bulunduran numunelerin basınç dayanım değerleri genel anlamda diğer tip numunelere nazaran yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

7. gün sonunda en yüksek basınç dayanım değerine PFA10T1S1E1 tip numuneler, 28. gün sonunda en yüksek basınç dayanım değerine PFA10T2S2E1 tip numuneler ve 56. gün sonunda ise en yüksek basınç dayanım değerine yine PFA10T2S2E1 tip numunelerin sahip olduğu saptanmıştır.

Numunelerde alkali aktivatör olarak kullanılan 220 mlt sodyum silikat (Na2SiO3)varlığı basınç dayanım değerlerine olumlu yönde etki ettiği tespit edilmiştir.

Aynı kür tipine tabi tutulmuş, aynı PFA içeriğine sahip ve içeriğinde75µm elekten geçirilmiş uçucu kül içeren tip numunelerde, karışım suyunda kullanılan su miktarının az olduğu tip numunelerde basınç dayanım değerinin 7. günde, 28. günde ve 56. günde dahil olmak üzere daha fazla olduğu saptanmıştır.

Numunelerde PFA oranın artması ile hem birim ağırlık değerlerinde hem de basın dayanım değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir**.**

İleri ki aşamalarda yüksek oranda CaO içeren bu endüstriyel atık (pres filtre atığı) üzerine yapılacak çalışmalar da farklı bağlayıcı özellikli malzemeler ile özellikle farklı aktivatör molariteleri ve farklı sıcaklık kürlerinde deneysel gözlemler yapılarak; mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiği takdirde daha etkin sonuçlara ulaşılması muhtemeldir.

Kaynaklar