



## HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

*HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING*

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

### Aerojel Yalıtım Keçelerinin Isıl ve Higrotermal Karakterizasyonu

*Thermal and Hygrothermal Characterization of Aerogel Insulation Blankets*

**Yazar(lar) (Author(s)):** Selena ALAN<sup>1,\*</sup>, Gülden GÖKÇEN AKKURT<sup>2</sup>, Sedat AKKURT<sup>3</sup>, Hasan Çığ SEZER<sup>4</sup>, Alper Çam<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ORCID ID: 0000-0002-9639-8126

<sup>2</sup> ORCID ID: 0000-0002-3444-9610

<sup>3</sup> ORCID ID: 0000-0002-2534-5756

<sup>4</sup> ORCID ID: 0000-0002-1192-4319

<sup>5</sup> ORCID ID: 0000-0003-2980-7898

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Alan S., Gökçen Akkurt G., Akkurt S., Sezer H.Ç., Çam A., “Aerojel Yalıtım Keçelerinin Isıl ve Higrotermal Karakterizasyonu”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 6(Özel sayı): 58-69, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>



## Aerojel Yalıtım Keçelerinin Isıl ve Higrotermal Karakterizasyonu

Selena ALAN<sup>1</sup>, \*, Gülden GÖKÇEN AKKURT<sup>2</sup>, Sedat AKKURT<sup>3</sup>, Hasan Çığ SEZER<sup>4</sup>, Alper Çam<sup>5</sup>

<sup>1</sup> İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, 35433, Urla/İzmir/Türkiye

<sup>2</sup> İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 35433, Urla/İzmir/Türkiye

<sup>3</sup> İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 35433, Urla/İzmir/Türkiye

<sup>4-5</sup> İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş., 35330, Balçova/İzmir/Türkiye

### Öz

İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş., İzmir'in Narlıdere ve Balçova bölgesine jeotermal kaynaklarla bölgesel ısıtma sağlayan bir kuruluştur. Bu çalışma, İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş. bünyesinde bulunan ısı merkezlerinde vana, boru ve ısı değiştirgeçleri ile şehir içinde dolaşmakta olan yaklaşık 450 km uzunluğundaki boruların yalıtımlarının yenilenmesi çalışmalarına temel oluşturmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Aerojel yalıtım malzemeleri, fiberlere tutunmuş arojellerden oluşurlar ve oldukça gözenekli bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle, ısı iletimleri kısıtlıdır ve bu özellik sayesinde yalıtım uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada üç farklı aerojel yalıtım keçesi İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş. bünyesinde oluşturulan bir düzeneğe uygulanmış, düzeneğten basınç, yüzey ve ortam sıcaklığı ölçümleri alınmıştır. Aerojel yalıtım malzemelerinden alınan numuneler İYTE-Tümleşik Araştırma Merkezi (TAM) bünyesinde çeşitli ölçüm ve analizlere tabi tutularak karakterize edilmiş ve ısı performans ile ısılatılmama özelliği açısından karşılaştırılmıştır.

### Thermal and Hygrothermal Characterization of Aerogel Insulation Blankets

#### Abstract

İzmir Geothermal Inc. is a geothermal district-heating company that serves Narlıdere and Balçova regions of İzmir via 450 km of piping system that circulates the hot water throughout the district with the help of valves, pipes and heat exchangers. As the distance travelled by the hot water is excessively long, heat losses are common. Izmir Geothermal Inc. is interested in applying/renewing thermal insulation blankets wrapped around the pipes to minimize the heat losses. Porous aerogel insulation blankets that consist of micron-sized aerogel particles attached to glass fibers have been proposed as potentially effective insulation materials. Owing to their porous structure, glass fibers and the presence of aerogel particles, they are known to be efficient thermal insulators. In this study, three different aerogel insulation blankets are comparatively studied to assess their structures and thermal performances. A test setup was assembled by Izmir Geothermal Inc. on site and pressure, surface and ambient temperature measurements were taken. Samples taken from the aerogel insulation materials were characterized by various methods within the İzmir Institute of Technology - Integrated Research Center (IYTE-IRC) and compared based on thermal performance and non-wetting properties.

#### Makale Bilgisi

Başvuru: 29/01/2021

Yayın: 01/11/2021

#### Anahtar Kelimeler

Aerojel  
Yalıtım  
Enerji Verimliliği

#### Keywords

Aerogel  
Insulation  
Energy Efficiency

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İlk aerojel, 1930'larda Samuel Stephens Kistler tarafından üretildi. Kistler, tungsten oksit, demir oksit, kalay oksit, selüloz, selüloz nitrat, jelatin, agar ve kauçuk gibi birçok malzemeden arojeller hazırladı [1]. Aerojel keçelerin ısı yalıtımında kullanılma fikri, dünyada ilk olarak 1997 yılında ortaya atılmıştır. 2004 yılından itibaren ise ticari ve endüstriyel alanlarda kullanılmaya başlanmıştır [2]. Isı yalıtım malzemeleri temel olarak binalarda duvar ve tavanlarda, sanayi ve endüstride soğutma odalarında, ekipman ve boru hatlarında kullanılırlar [3]. Cam yünü, taş yünü, cam köpüğü, XPS ekstrüde polistiren, EPS genleştirilmiş

\*İletişim yazarı, e-mail: selenaalan@iyte.edu.tr

Bu çalışma, 05-06 Kasım 2020 tarihlerinde gerçekleştirilen GAPYENEV Uluslararası Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi'nde sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

polistiren yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerindedir [4-5]. Isı yalıtımı hayatımızın birçok alanında büyük önem kazanmaktadır; yapılarda ve endüstride uygulanan ısı yalıtımı, aynı zamanda enerji verimliliğini arttırmakta yani maliyetleri de ciddi ölçekte etkilemektedir [6]. Isı yalıtımı malzemelerinin yalıtım özelliklerinin artırılması, malzemelerin uygulanabilirliğinin kolaylaştırılması ve enerji tasarrufunu arttırabilmesi adına çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüzde aerojeller; bina, endüstriyel alanlar, uzay ve havacılıkta ısı yalıtımı, akustik yalıtım, katalizör, kimyasal sensör, yakıt hücreleri, spor ekipmanları ve tekstil gibi alanlarda kullanılmaktadır [7-8]. Aerojeller; granül, monolit, levha ve keçe gibi farklı formlarda bulunabilirler. Aerojel granülleri ve monolitler sol-jel yöntemiyle sentezlenirken, aerojel keçe ve levhalar fiber, partikül ve opaklaştırıcıların takviyesi ile üretilir. Granül ve monolit aerojelin kırılğan yapısı nedeniyle, uygulama alanı sınırlıdır. Kırılğanlığı azaltıp, mekanik bütünlüğü iyileştirmek için, aerojeller genellikle destekleyici fiber yapılarla güçlendirilir ve bu nedenle esnek ısı yalıtım keçeleri olarak kullanılabilir [9].

Silika aerojeller, çok gözenekli, yüksek yüzey alanına sahip, düşük yoğunluklu ve ısı iletim katsayıları düşük olan ve bu özelliklerinden dolayı yalıtım uygulamalarında kullanılabilen malzemelerdir [10]. Fiber yapıya yedirilmiş keçe formunda kullanılırlar. Islatılmama özelliği aerojeller için önemli bir diğer özelliktir. Silika aerojel keçeler aerojellerin ıslatılmama özelliğinden dolayı hidrofobiktirler. Islatılmama özellikleri sayesinde küflenmeye karşı koruma sağlarlar [11]. Su ve nem tutmamaları sayesinde bina yalıtımı, boru yalıtımında kullanılabilirler.

Jeotermal kaynaklı bölgesel ısıtma sistemlerinde sıcak akışkanın ısı kaybına engel olmak amacıyla genellikle ısı yalıtım malzemesi olarak taş yünü vb. fiber keçeler kullanılmaktadır. Borularda su kaçakları olduğunda ıslanan bu malzemeler yalıtım özelliğinin azalmasına neden olmaktadır. Aerojel yalıtım malzemelerinin yalıtım özelliklerinin yanısıra ıslatılmama özellikleri nedeniyle jeotermal uygulamalarda kullanılabilceği değerlendirilmektedir.

Bu çalışma, İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş. bünyesinde, İzmir'de Balçova-Narlıdere Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi ısı merkezlerinde bulunan vana, boru ve ısı değiştirgeçleri ile şehir içinde dolaşmakta olan yaklaşık 450 km uzunluğundaki boruların yalıtımlarının yenilenmesi çalışmalarına temel oluşturmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı üreticiler tarafından üretilen üç farklı aerojel yalıtım keçesiyle yürütülen bu çalışma, literatürde kullanılan klasik yalıtım malzemelerinin yerine aerojel içeren yalıtım keçelerinin jeotermal sistemlerde kullanılabilirliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Yazarların bilgisi dahilinde bu çalışma, aerojel yalıtım keçelerinin jeotermal uygulamalarda kullanılabilirliği hakkındaki ilk çalışmadır.

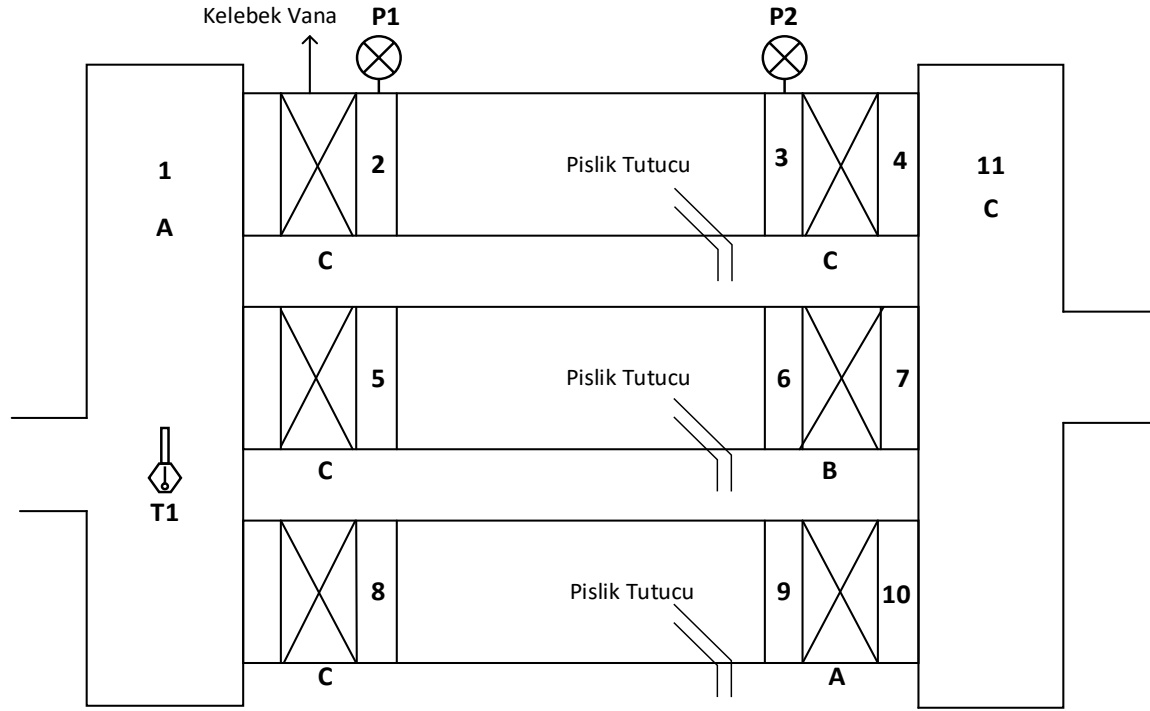
## **2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)**

Üç farklı ticari aerojel yalıtım keçesinin farklarının nereden kaynaklandığını karşılaştırmak ve en iyi ısı ve ıslatılmama performansının belirlenmesi için planlanan çalışma;

- test düzeneğinin oluşturulması ve düzenek üzerinde sıcaklık ölçümlerinin yapılması,
- aerojel numunelerinin toplanması ve numune hazırlama,
- İYTE'de laboratuvar çalışmalarının yapılması ve
- ölçüm ve analizlerin yorumlanması aşamalarından oluşmaktadır.

### **A. Test düzeneğinin oluşturulması**

İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş. tarafından B4A kuyusunda test düzeneği hazırlanmış, düzenek ve ölçüm noktaları Şekil 1'de verilmiştir. Aynı sıcaklık ve basınçta jeotermal akışkan girişi olan, paralel bağlı 3 adet pislik tutucu çıkışındaki paslanmaz çelik vanalar üzerine 3 farklı aerojel numune uygulanmış, 4-5 gün işletme koşullarına maruz bırakılıp kararlı duruma geçmesi beklenmiştir. Düzenek üzerinde 2 noktadan basınç, 11 noktadan yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve hava hızı ölçümleri alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan aerojel keçelerin ikisi yabancı (A ve B) menşeli, biri yerli (C) üründür.



Şekil 1. Ölçüm düzeneği şematik gösterimi.

## B. Aerojel numunelerin toplanması

Test düzeneğinde kullanılan aerojel keçeler monte edildikleri yerlerden sökülerek laboratuvar testleri için İYTE'ye getirilmiştir. Herbir analiz türüne uygun ebatlarda kesilerek kılıfından ayrılmış, numuneler hazırlanmıştır.

## C. Laboratuvar çalışmaları

Numune hazırlıkları tamamlanan aerojel keçelerin analiz ve karakterizasyonu için İYTE-Tümleşik Araştırma Merkezi (TAM) bünyesinde;

- Yoğunluk ölçümleri,
- TGA (Thermogravimetric Analysis – Termogravimetrik Analiz),
- Optik mikroskop görüntüleri,
- SEM (Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron Mikroskobu),
- Temas açısı ölçümleri,
- EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy – Enerji yayınlı X ışınımı),
- Isı iletim katsayısı ölçümleri,
- XRD (X-Ray Diffraction – X-ışını difraktometresi),
- FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy - Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi) gözlemleri,
- Isı kapasitesi (özellik ısı) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

### C.1. Yoğunluk ölçümleri

Yoğunluk ölçümleri için 10x10x10 mm ebatlarında keçe numuneler kesilmiş ve 3 farklı sıcaklık için sabit hacimde kütle değişimleri belirlenmiş ve Denklem (1)'e göre yoğunluk hesaplanmıştır.

$$\rho = m/V \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

İlk hesaplamada numuneler ortam sıcaklığında (30°C) tartılmış, ikinci hesaplamada ise etüvde 110°C'ye ısıtılarak 24 saat kurutulmuş ve tartılmıştır. Üçüncü hesaplama ise termogravimetrik analizlerde (TGA), 765°C'ye kadar yapılan ısıtma işlemi sonrasında yapılmıştır.

### **C.2. Termogravimetrik analiz (TGA)**

Numuneler, analiz için hassas teraziye asılıyken anlık ağırlık ölçümleri alınarak 25°C'den 765°C'ye kadar 10°C/dk ısıtma hızında ısıtılmıştır. Bu analizde amaç ısıtmaya bağlı bozunma tepkimelerini belirlemektir. Isıtma işlemi dakikada 50 ml azotla gerçekleştirilmiştir.

### **C.3. Optik mikroskop görüntüleri**

Her üç aerojel keçe numunesi, Nikon marka stereo zoom optik mikroskopta görüntülenmiştir.

### **C.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) gözlemleri**

Her üç aerojel keçe numunesi, Quanta Feg 250 marka ve model SEM'de inceleme öncesinde sputter coater (püskürtmeli kaplayıcı) cihazında ince bir altın tabakasıyla kaplanmıştır. Daha sonra, secondary electron (SE) modunda gözlemlenen numunelerin değişik büyütmelelerdeki görüntüleri elde edilmiştir. Aerojel fiber çapları ve aerojel tutunumları gözlemlenmiştir.

### **C.5. Temas açısı ölçümleri**

Aerojel numunelerin ıslatılmama (non-wetting) özelliklerini belirlemek için temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Her üç numune ve numune kılıfı, Attension marka ve Theta model temas açısı ölçüm cihazında yaklaşık 3µL saf su kullanılarak ölçüme tabi tutulmuştur. Bir malzemenin ıslatılmama özelliği göstermesi için temas açısının 90°'den büyük olması beklenmektedir [12]. Temas açısı ne kadar büyükse ıslatılmama özelliği de o kadar iyidir.

### **C.6. Enerji yayımlı X ışınımı (EDX) gözlemleri**

Numunenin SEM cihazında yüksek hızda elektron demeti ile taranması sırasında oluşan x-ışınları incelenen bölgenin elementel kimyasal kompozisyonu hakkında fikir verir. EDX dedektörü, numunenin kimyasal kompozisyonunu belirlemede kullanılır. (EDX Oxford Inc.-Aztec). Analizler her numune için teker teker aerojel partikülü ve fiber (elyaf) için yapılmıştır.

### **C.7. Isı iletim katsayısı analizleri**

Isı iletim katsayısı ölçümleri için KEM-QTM 500 marka ve model cihaz kullanılmıştır. Isı iletim katsayısı,  $\lambda$  (W/mK) ile gösterilmektedir.

### **C.8. X-ışını difraktometresi (XRD) gözlemleri**

XRD, kristal/amorf yapıda olduğu düşünülen bir maddenin faz tanımlaması için kullanılır. Her üç aerojel keçe numunesi için analizler yapılmıştır.

### **C.9. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR) gözlemleri**

FTIR, organik veya inorganik bileşiklerin karakterize edilmesinde kullanılır. Analiz gözlemleri, malzemeyi oluşturan atomlar arasındaki bağların titreşimiyle oluşan frekanslara karşılık gelen absorpsiyon pikleri ile sağlanır. Her malzemenin kendine has pik noktaları vardır.

### **C.10. Isı kapasitesi (özellik ısı) ölçümleri**

Isı kapasitesi ( $C_p$ ) ölçümleri, Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile ölçülmüştür. Ölçümler her numune için -10°C den başlayıp dakikada 10°C artırılarak 300°C'de tamamlanmıştır. İşletme sıcaklığına

bağlı olarak  $C_p$  değerleri hesaplanabilir. Yoğunluk hesaplamasında kullanılan sıcaklıklardan olan ve ortalama jeotermal çalışma sıcaklığını temsil eden  $110^{\circ}\text{C}$  için ısı kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Isıl iletkenlik ile ısı kapasitesi ters orantılıdır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Aerojel yalıtım malzemesi seçimi için en önemli parametreler ısı iletim katsayısı ile temas açısı olsa da bu parametreleri etkileyebilecek olan, malzemelerin mikro-yapısının belirlenmesi ve yorumlanmasının önemli olduğu düşünülerek mikro-yapı ile ilgili Bölüm 2’de listelenen pek çok analiz yapılmış ve bu analizler yorumlanmıştır. İzmir Jeotermal A.Ş. bünyesindeki test düzeneği ölçüm verileri Şekil 1’deki numaralandırmaya göre Tablo 1’de listelenmiştir.

*Tablo 1. Test düzeneği ölçüm verileri.*

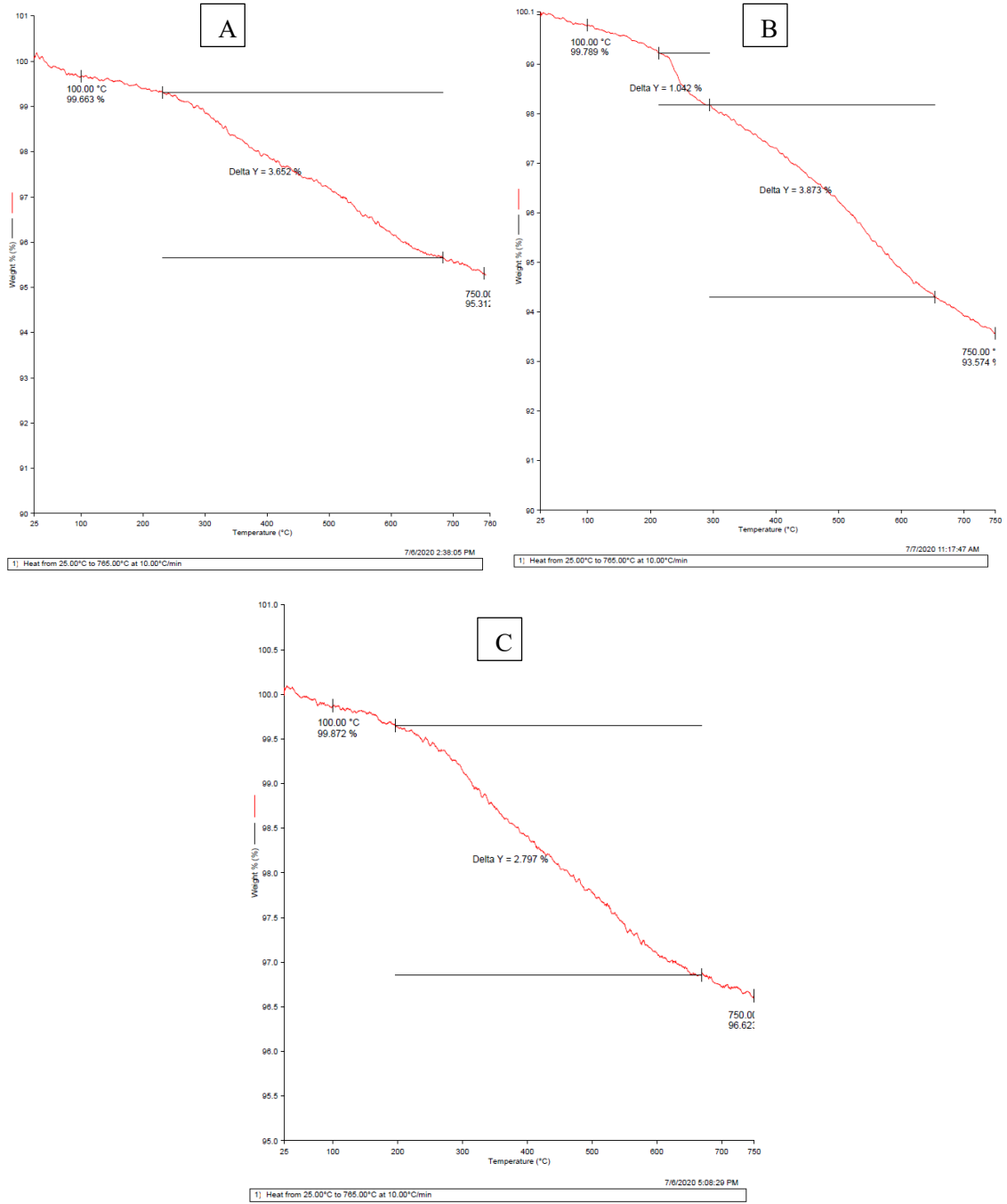
Ölçüm noktası	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	Aerojel keçe tipi
T1	102,0	Jeotermal akışkan sıcaklığı
1	42,8	A
2	42,8	C
3	47,7	C
4	44,2	C
5	54,5	C
6	53,3	B
7	48,3	B
8	48,0	C
9	50,3	A
10	47,6	A
11	44,7	C
$T_0$	36,2	Ortam sıcaklığı
Ölçüm noktası	Basınç (bar)	Aerojel keçe tipi
P1	2,1	C
P2	2,2	C

#### 3.1. Yoğunluk ölçümleri

Yapılan ölçümler sonucunda sıcaklığa bağlı olarak aerojel keçelerde bulunan bazı bileşenlerin uçtuğu ve kütle kaybı yaşandığı gözlemlenmiştir. Firma katalog verilerinin ölçülen değerlerden çok yüksek olduğu görülmektedir. Yoğunluğu en yüksek keçe C keçesidir. C keçesini sırayla B ve A keçeleri takip etmektedir. B keçesi diğer keçelere göre 5 mm daha kalındır. Bu durum maliyet ve kullanım açısından dezavantaj olabilir.

#### 3.2. Termogravimetrik analiz (TGA)

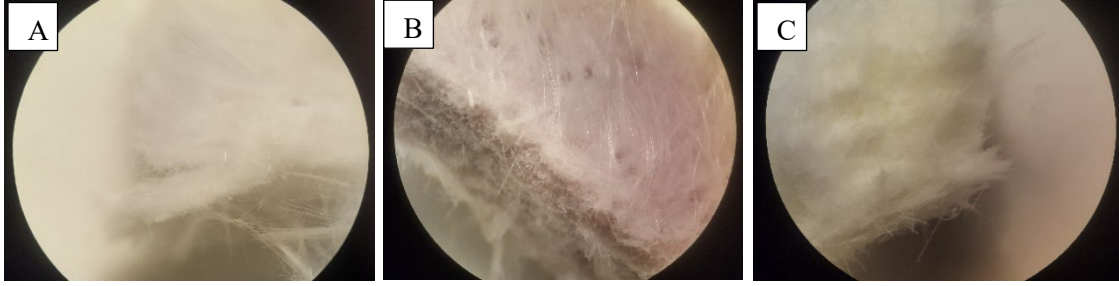
TGA analizleri sonucunda aerojel keçelerin  $765^{\circ}\text{C}$ ’de yakılmasıyla oluşan kütle kaybı A keçesi için yaklaşık %5, B keçesi için yaklaşık %6, C keçesi için ise yaklaşık %4’dür. TGA analiz grafikleri Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Aerojel keçelerinin TGA grafikleri.

### 3.3. Optik mikroskop görüntüleri

Optik mikroskopla yaklaşık 40x büyütmede gözlemlenen numune görüntülerinde her üç numunenin de fiber elyafımsı şekle sahip olduğu gözlenmiştir. Numunelerin Stereo zoom optik mikroskop görüntüleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

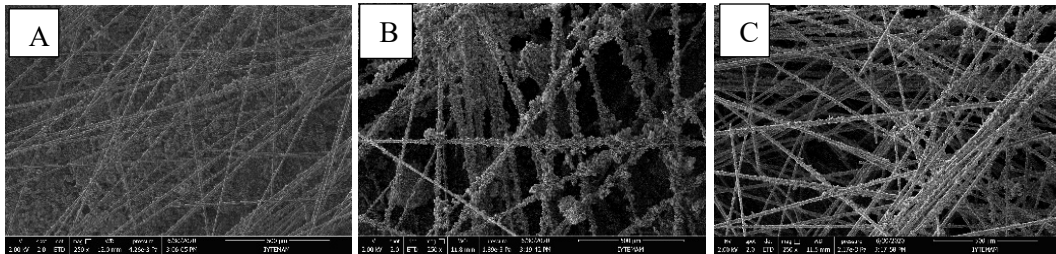


Şekil 3. Aerojellerin Stereo Zoom Optik mikroskop görüntüleri.

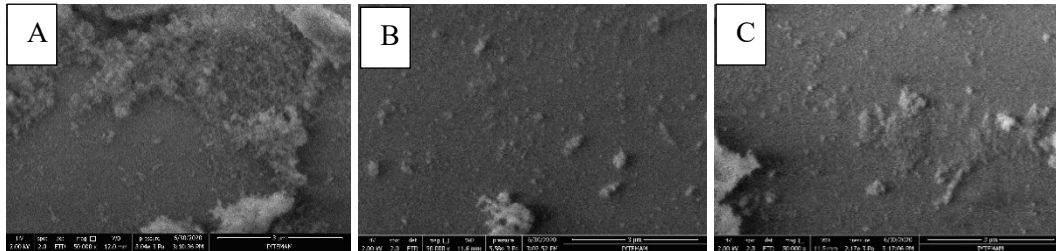
### 3.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) gözlemleri

SEM görüntüleri sonucunda, her üç numunede de aerojellerin eş eksenli partikül formunda olduğu ve bazı silikat fiberlerine (cam elyaf) tutunduğu gözlemlenmiştir. Aerojel partiküllerinin düşük boyutları sebebiyle kolay havalandığı (airborne) düşünüldüğünde, her bir yalıtım keçesi imalatı sırasında fiber yapı üzerine emdirilmek suretiyle imal edildikleri düşünülmektedir.

Ancak, numune hazırlama işlemi sırasında aerojel partiküllerinin üzerine tutundukları cam elyafların üzerinden dökülebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. SEM görüntülerinden yola çıkılarak aerojel partiküllerinin fiberlere en güçlü tutunum sağladığı keçenin C numunesine, en zayıf tutunumun ise A numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. C numunesinde, aerojel partiküllerinin boyutlarının diğer iki aerojel keçeğe göre daha büyük boyutta olduğu da gözlemlenmiştir. Bu da ısı yalıtım performansının sürekliliği açısından faydalı bir özelliktir. C numunesindeki tutunumun yüksek olmasından dolayı, B keçesine göre daha düşük yüzey sıcaklığı ölçülmesi muhtemeldir. Ayrıca bu özelliğinden dolayı C keçesinin zamana bağlı olarak performans kaybının da daha düşük olacağı düşünülmektedir. Şekil 4'te sırayla her üç aerojel keçenin 250x büyütmedeki SEM görüntüleri, Şekil 5'te ise 50000x büyütmedeki SEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4. Aerojel keçelerin 250x büyütmedeki SEM görüntüleri.



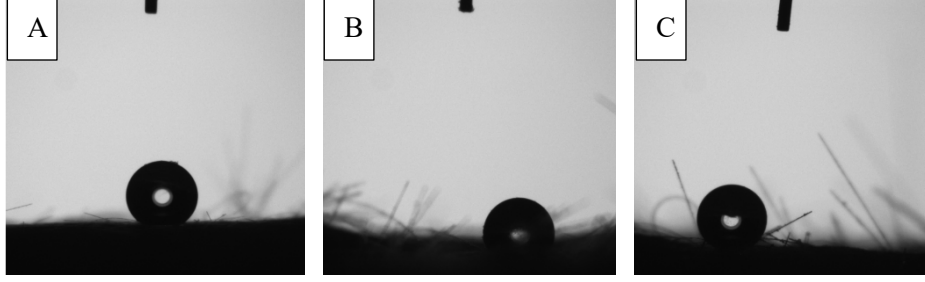
Şekil 5. Aerojel keçelerin 50000x büyütmedeki SEM görüntüleri.

### 3.5. Temas açısı ölçümleri

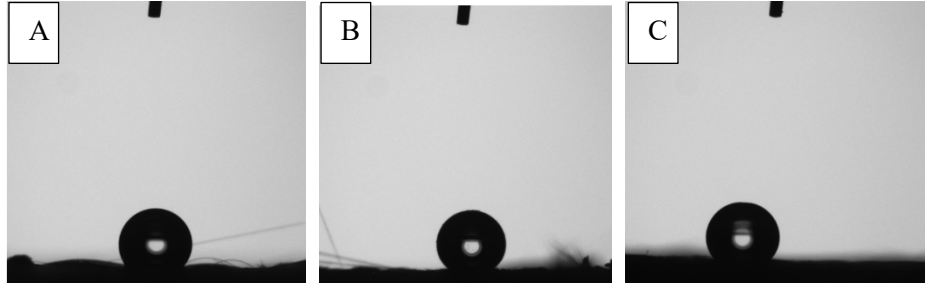
Aerojel üretici firmalar, üç ürünün de ıslatılmama özelliği sergilediğini beyan etmiştir. Temas açısı ölçümleri sonucunda, A aerojel keçesinin diğer keçelere göre en iyi ıslatılmama özelliğine sahip olduğu, A'yı C ve B'nin izlediği görülmektedir. Şekil 6'da sırayla her üç aerojel keçenin temas açısı ölçüm görüntüleri sıralanmıştır. Kılıf olarak tüm aerojel keçeler için aynı kumaşın kullanıldığı belirtilmiş olsa da renk farklılıkları görüldüğü için ayrı ayrı ölçüm yapılmıştır. Kılıf malzemesi, aerojel keçeyi dış ortamdan koruduğu için temas açısı ölçümü keçeğe göre daha önemli görülmüştür. Kılıf ölçümlerine bakıldığında



ise, temas açısı yüksekten düşüğe B, C ve A şeklindedir. Şekil 7’de sırayla her üç aerojel keçenin kılıflı temas açısı ölçüm görüntüleri sıralanmıştır.



*Şekil 6. Aerojel keçelerin temas açısı görüntüleri.*



*Şekil 7. Aerojel keçelerin kılıflı temas açısı görüntüleri.*

### 3.6. Enerji yayımlı X ışınımı (EDX) gözlemleri

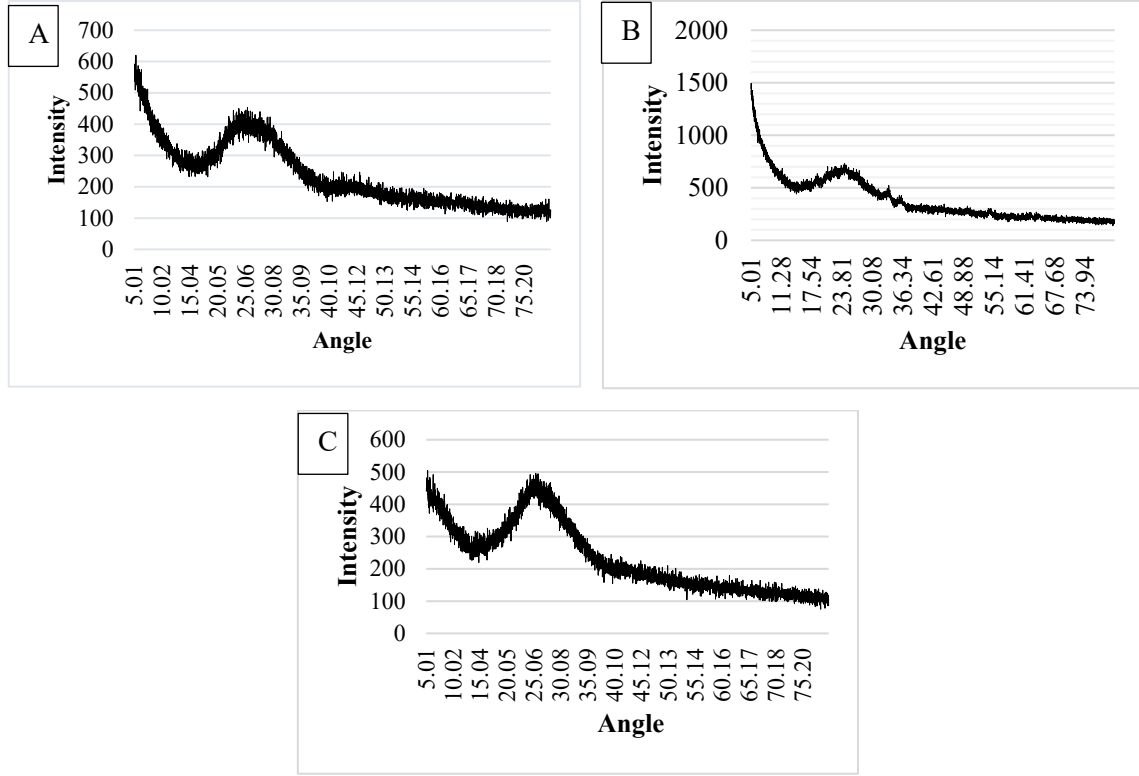
Üç aerojel keçesi birbiriyle kıyaslandığında, her keçede ortak olarak karbon, oksijen, alüminyum, silisyum ve kalsiyum elementleri bulunurken; C aerojel keçesinde diğerlerinden farklı olarak bir miktar magnezyum tespit edilmiştir. Bunun muhtemel sebebinin, aerojel sentezinde kullanılan kimyasallar olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca A keçesinde karbon miktarının yüksekliği içerikte SiC bulunduğunu işaret etmektedir. Bunun da aerojel sentezleme yaklaşımlarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

### 3.7. Isı iletim katsayısı analizleri

B numunesi hem keçe hem keçe+kılıf olarak en düşük ısı iletim katsayısına sahiptir. A numunesi keçe olarak ısı iletim katsayısında 2. sırada yer alırken keçe+kılıf olarak 3. sıradadır. C ise keçe ölçümlerinde A’dan sonra 3. sırada yer alırken, keçe+kılıf’da 2. sıradadır. C keçesinin (kılıfsız) ısı iletim katsayısı en yüksek olmasına rağmen saha ölçümlerinde en düşük yüzey sıcaklığını vermektedir. Kılıf eklendiğinde ısı iletim katsayıları, kılıf malzemesinin daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle yükselmektedir. C numunesine keçe+kılıf olarak bakıldığında B keçesine yakın bir ısı iletim katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Fakat bu durum yine de C keçesinin daha düşük yüzey sıcaklığına sahip olmasını açıklamamaktadır.

### 3.8. X-ışını difraktometresi (XRD) gözlemleri

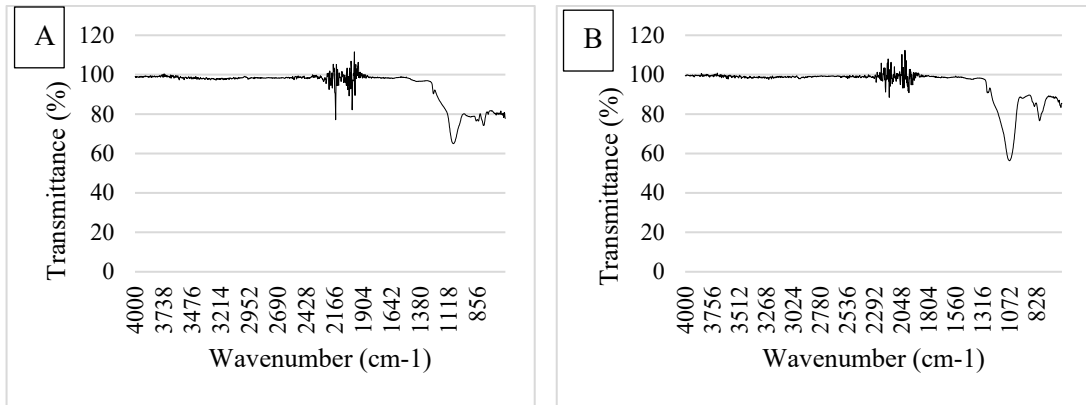
Bu analizler doğrultusunda, aerojel keçe numunelerinin hepsinin amorf yapıda olduğu gözlemlenmiştir ve bu gözlem, firma kataloglarındaki fiberlerin cam elyafı olduğunu kanıtlar niteliktedir. Şekil 8, sırayla A, B ve C olacak şekilde aerojel keçelerin XRD grafiklerini göstermektedir.

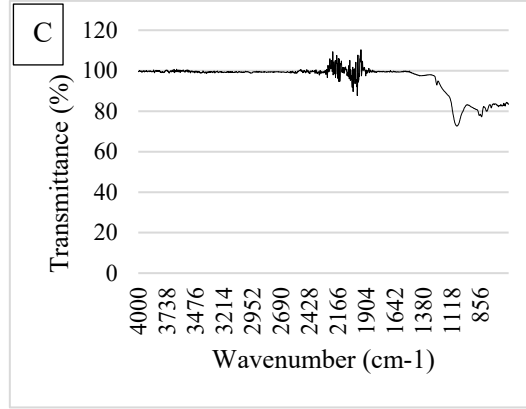


Şekil 8. Aerojel keçelerin XRD grafikleri.

### 3.9. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR) gözlemleri

Analiz sonucunda, her numunenin yaklaşık  $1090 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında pik yaptığı gözlemlenmiştir. Bu pik, aerojel keçelerin Si-O-Si bağına sahip olduğunu göstermektedir. Yine her numunenin yaklaşık  $810 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında bir başka pik yaptığı gözlemlenmiştir. Bu pik, aerojel keçelerin Si-C bağına sahip olduğunu göstermektedir. Grafiklerde  $1360 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısından başlayarak ilerleyen sabit geçirgenlik yüzdesi aerojel keçe numunelerinin ıslatılama özelliği gösterdiğini kanıtlamaktadır [13]. FTIR gözlemlerine ait grafikler Şekil 9'da verilmiştir.





**Şekil 9.** Aerojel keçelerin FTIR grafikleri.

### 3.10. Isı kapasitesi (özellik ısı) ölçümleri

Ölçülen ısı kapasitesi değerleri literatür ile uyumludur. 110°C’de en yüksek ısı kapasitesi değeri C keçesine aittir (1,5 J/gK). C keçesini B (1,36 J/gK) ve A keçeleri (1,16 J/gK) izlemektedir. C keçesinin yüzey sıcaklığının daha düşük olmasının bir diğer nedeni de ısı kapasitesinin diğer keçelere göre daha yüksek olmasıdır. Isı kapasitesinin büyük olması ısı geçişini yavaşlatır ve yalıtım amaçlı kullanımlarda tercih nedenidir.

## 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma sonunda elde edilen tüm ölçüm ve laboratuvar analiz sonuçları Tablo 2’de özetlenmiştir. Bu verilere ilaveten aerojel yalıtım keçelerinin BET yüzey alanı değerlerinin literatürde 200m<sup>2</sup>/g civarında olduğu bilinmektedir [12]. Bu yüksek yüzey alanı ve yüksek gözenekliliğin ısı yalıtımına katkıda bulunduğu değerlendirilmiştir.

**Tablo 2.** Ölçüm ve analiz sonuçları.

		A		B		C	
Sıcaklık ölçümleri	Ölçüm noktası	9	10	6	7	3	4
	Sıcaklık (°C)	50,3	47,6	53,3	48,3	47,7	44,2
Kalınlık (mm)		10		15		10	
Fiber çapları (µm)		10		14		10	
Isı iletim katsayısı (kılıfsız) (W/mK)		0,0312		0,0278		0,0330	
Isı iletim katsayısı (kılıflı) (W/mK)		0,05		0,042		0,0433	
Isı kapasitesi (C <sub>p</sub> ) (J/gK)		1.16		1.36		1.50	
Yoğunluk (110°C) (kg/m <sup>3</sup> )		162		178		191	
Yoğunluk (765°C) (kg/m <sup>3</sup> )		156		170		184	
Temas açısı (keçe) (°)		146		100		125	
Temas açısı (kılıf) (°)		127		145		129	

Tablo 2’ye göre her üç numune benzer mikro-yapı ve ısı iletim katsayısı değerlerine sahiptir. Isıl iletkenlik ile ısı kapasitesi ters orantılıdır. Dolayısı ile aerojel keçeler yalıtım amaçlı kullanıldıklarından ısı kapasitelerinin büyük olması tercih sebebidir. En yüksek ısı kapasitesi değeri 1.5 J/gK ile yerli ürün olan C aerojel numunesine aittir. Isı yalıtımı için bir diğer önemli parametre de yoğunluktur. Yalıtım malzemesinin

yoğunluğu azaldıkça ısı yalıtım özelliği iyileşir. Yoğunluğu en düşük olan numune A iken yerli ürün C numunesi en yüksek yoğunluk değerine sahiptir.

Temas açısının 90°'den yüksek olması malzemenin ıslatılmama özelliğini kanıtlamaktadır, temas açısı arttıkça ıslatılmama özelliği de artmaktadır. Keçe numunesi A, en yüksek temas açısı değerine sahipken, kılıf numunesi A'nın temas açısı en düşüktür. Temas açısı tüm numunelerde 90°'nin üzerinde olduğu için tüm keçe ve kılıfların ıslatılmama özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Yerli ürün daha yoğun olmasına rağmen ısı yalıtımı, ısı kapasitesi ve ıslatılmama (temas açısı) özellikleriyle yabancı menşeli ürünlerle rekabet edebilmektedir. Yerli ürünün ithal ürünlerin maliyetinden daha düşük olacağı düşünüldüğünde, hem firma hem de yalıtım ihtiyacı duyan sanayi sektörü için önemli bir maddi tasarruf imkanı vermektedir.

Bu çalışma, silika aerojel keçelerin jeotermal tesislerde ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliği açısından olumlu sonuçlar vermiştir. İkinci aşama olarak keçelerin zamana bağlı olarak ısı performanslarındaki değişiminin incelenmesi, uzun vadeli performanslarının belirlenmesi açısından gereklidir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü-Tümleşik Araştırma Merkezi uzman ekibine ve İzmir Jeotermal Enerji San. ve Tic. A.Ş.'ne çalışma boyu süren desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J. L. Gurav, I.K. Jung, H.H. Park, E. S. Kang, D. Y. Nadargi, Silica Aerogel: Synthesis and Applications, Journal of Nanomaterials, 2010.
- [2] B. E. Coffman, J.E. Fesmire, S. White, G. Gould, S. Augustynowicz, Aerogel Blanket Insulation Materials For Cryogenic Applications, AIP Conference Proceedings, (2010) 1218, 913.
- [3] H. Zhang, Heat-insulating Materials and Sound-absorbing Materials, Materials in Civil Engineering, 304-423, 2011.
- [4] İ. Ayçam, M. Tuna, G. Süt, Sürdürülebilirlik Ve Mimari Değişimin Yalıtım Malzemelerine Etkileri, 2010.
- [5] H. C. Bayrakçı, M. Davraz, E. Başpınar, Yeni Nesil Isı Yalıtım Malzemesi: Vakum Yalıtım Paneli, SDU Journal of Technical Sciences, 1-12, 2011.
- [6] S. Ng, B. P. Jelle, Y. Zhen, Ó. H. Wallevik, Effect of storage and curing conditions at elevated temperatures on aerogel-incorporated mortar samples based on UHPC recipe, Construction and Building Materials, (2016) 106, 640-649.
- [7] L.W. Hrubesh, Aerogel applications, Journal of Non-Cryst. Solids 225 (1998) 335-342.
- [8] J. Fricke, Aerogels and their applications, Journal of Non-Crystalline Solids 147&148 (1992) 356-362.
- [9] M. A. Hasan, R. Sangashetty, A. C. M. Esther, S. B. Patil, B. N. Sherikar, A. Dey, Prospect of Thermal Insulation by Silica Aerogel: A Brief Review, (2017) 98(2):297-304.
- [10] A. S. Dorcheh, M.H. Abbasi, Silica aerogel; synthesis, properties and characterization, Journal of Materials Processing Technology, 199 (2008) 10-26.
- [11] H. Thorne-Banda & T.Miller, Aerogel by Cabot Corporation: Versatile Properties for Many Applications, Aerogels Handbook, 847-856, 2011.

- [12] K. Nocentina, P. Achard, P. Biwole, Hygro-thermal properties of silica aerogel blankets dried using microwave heating for building thermal insulation, *Energy and Buildings*, 158 (2018) 14–22.
- [13] U. Berardi, S. (Mark) Zaidi, Characterization of commercial aerogel-enhanced blankets obtained with supercritical drying and of a new ambient pressure drying blanket, *Energy & Buildings*, 198 (2019) 542–552.