



Poliüretanın Isı Yalıtım Özelliklerinin Silika Esaslı Partiküllerle İyileştirilmesi

Improvement of Thermal Isulation Properties of Polyurethane oy Silica-Based Particles

Özay Akdemir^{1*}, **Ayşe Hacirecepoğlu²**, **Özge Andıç Çakır²**,
Mehmet Sarıkanat¹, **Kutlay Sever³**, **Yoldaş Seki⁴**

¹ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

² Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

³ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

⁴ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: ozay.akdemir@ege.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 16.04.2019

Kabul Tarihi / Accepted: 05.08.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI: 10.21205/deufmd.2020226414

Atıf şekli/How to cite: AKDEMİR, Ö., HACİRECEPOĞLU, ANDIÇ-ÇAKIR, Ö., SARIKANAT, M., SEVER, K., SEKİ, Y. (2020). Poliüretanın ısı yalıtım özelliklerinin silika esaslı partiküllerle iyileştirilmesi. DEUFMD 22(64),147-153.

Öz

Bu çalışmada silika-esaslı partiküller (SP), tetra etoksi silan (TEOS) kullanarak sol-jel yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen silika-esaslı partiküller ile poliüretanın (PU) ısı iletkenliğinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Bu parçacıklar farklı oranlarda (ağırlıkça %0,5, 1, ve 2) poliüretanın içine ilave edilerek kompozit plakalar elde edilmiştir. Bu plakaların yapılan ısı iletkenlik ölçümlerinde poliüretana %0,5 SP eklenmesi ile ısı iletkenlik değerinin %16 civarında azaldığı görülmüştür. Bunun yanısıra basma dayanımında ise %6'lık bir azalma gerçekleşmiştir. Daha yüksek SP'nin PU'ya eklenmesiyle ısı iletkenlikte azalma oranı düşerken basma dayanımındaki bozulma artmıştır. SP eklenmesi poliüretanın kimyasal yapısını, ısı stabilitesini çok fazla değiştirmezken, ısı genleşme katsayısını ise düşürmüştür. Poliüretan kompozitlerin içerisindeki SP parçacıklarının dağılımı da taramalı elektron mikroskop analizleri ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Poliüretan, Silika-esaslı partiküller, Isı iletkenlik, Kompozit

Abstract

In this study, silica-based particles (SP) were fabricated via sol-gel method by using tetraethoxy silane. It is aimed to reduce the thermal conductivity of polyurethane (PU) by means of silica-based particles. The composite plates were obtained by adding these particles into PU at various ratios (0,5, 1, 2 wt%). The measurements of thermal conductivity values of these plates showed that 0,5% SP addition into PU decreased the thermal conductivity by 16%. In addition, compression strength value of PU decreased by 6%. While addition of higher weight fractions of SP into PU reduced the decreasing rate of thermal conductivity, degradation in compressive strength values increased. SP addition into PU has not changed the chemical structure and thermal stability considerably, however thermal expansion coefficient decreased remarkably. The distribution of SP within the PU matrix was examined by scanning electron microscopy observations.

Keywords: Polyurethane, Silica-based particles, Thermal conductivity, Composite

1. Giriş

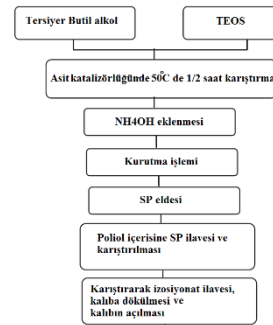
Günümüzde enerji tüketiminin sınırlandırılması ve enerji talebinin kontrol altında tutulması temel bir çevresel ve ekonomik gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bina uygulamalarında da enerji kayıplarının ve enerji tüketiminin azaltılması önemlidir [1]. Isı yalıtım uygulamalarında poliüretan sıklıkla kullanılan polimerlerden biridir. Poliüretan bir çok farklı sektörlerde geniş bir kullanım olanağı bulan önemli bir polimer sınıfıdır [2]. Özellikle ısıl izolasyon, yastıklama, suya batmama, enerji absorplama ve düşük yoğunluk gibi özellikleri nedeniyle poliüretan endüstriyel uygulamalarda bir tercih nedeni olmuştur [3]. Bununla birlikte düşük ısıl stabilite ve düşük mekanik dayanım gibi de dezavantaj sayılabilecek özellikleri vardır. Bunu yanısıra bazı ısıl izolasyon uygulamalarında PU'nun ısıl iletkenlik değerinin daha da düşürülmesi istenmektedir. Özellikle enerji tasarrufu yapabilmek ve CO₂ emisyonunu azaltabilmek için daha etkili izolasyon yapabilen binalara ya da buzdolabı gibi cihazlara ihtiyaç bulunmaktadır [4]. Bütün bu dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla poliüretan kompozitlerin üretilmesi gündeme gelmektedir [5-6].

Gözenekli yapıda üretilen silika, ısı yalıtım uygulamalarında oldukça fazla dikkat çekmiştir. Bu tür maddelerin üretiminde sodyum silikat, tetraetoksi silan (TEOS), tetrametoksi silan metiltrimetoksisilan, 3 amino-propil trietoksi silan prekürsör olarak kullanılmaktadır [7]. Ancak silika aerojel üretimi sentezlenme süresi ve maliyeti yüksek olan bir süreçtir. Bunu azaltabilmek için çift prekürsör metodu kullanımı önerilmektedir [8,9]. Fakat silika aerojel oldukça kırılğan ve neme oldukça hassastır [10]. Bu nedenle parçacık kullanarak polimer arasındaki etkileşime bağlı olmakla birlikte daha üstün ısıl ve mekanik özellikler elde edilebilmektedir [6]. Bu çalışmanın amacı sol jel yöntemi ile üretilen silika esaslı partikülleri poliüretanın ısıl iletkenliğini düşürmede kullanmaktır. Bunu yanısıra silika esaslı partiküllerin poliüretanın basma dayanım ve modülünü, ısıl genleşme katsayısını ısıl stabilitesini nasıl etkilediği de belirlenmeye çalışılacaktır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında SP, XIAMETER firmasından alınan TEOS (OFS- 6697) kullanarak sol-jel

yöntemi ile sentezlenmiştir. Üretim yönteminin akış şeması Şekil 1'de özetlenmiştir. TEOS, tersiyer butil alkol (EMPLURA) içerisinde asit (HCl) katalizöründe hidroliz edilmiş ve 50°C sıcaklığında yarım saat karıştırılmıştır. Hidrolizden sonra baz (NH₄OH) katalizöründe polikondenzasyon reaksiyonu ile elde edilen karışım petri kabına alınıp vakumlu kurutma tekniği ile 10-12 saat kurutulmuştur. Üretilen SP'nin BET analizi sonucunda dış yüzey alanı 15,04 m²/g, gözenek hacim değeri 0,0204 cm³/g, adsorpsiyon ortalama gözenek çapı 37,6, BJH adsorpsiyon ortalama gözenek genişliği 72,1 ve BJH desorpsiyon ortalama gözenek genişliği 78,5'dir. Üretilen SP'nin civa porozimetre yöntemi ile elde edilen gözeneklilik değeri %67,98 olarak belirlenmiştir. Poliüretan köpük üretimi için 123,3 g izosiyanat ve 90,4 g polioliol kullanılmıştır. Silika-esaslı partiküller polioliol içerisinde polioliol+izosiyanat kütle miktarının %0,5'i, %1'i, ve %2'si olacak şekilde eklenerek el ile karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışım içerisinde izosiyanat eklenerek karıştırılmış ve karışım kalıp içerisinde dökülerek oda sıcaklığında 2 gün bekletilerek kürleşme prosesinin tamamlanması sağlanmıştır.



Şekil 1. Üretim akış şeması

2.1. Karakterizasyon yöntemleri

Çalışma kapsamında üretilen silika-esaslı partiküllerin farklı oranlarda poliüretanın içine ilave edilmesiyle üretilen ısı yalıtım plakaların karakterizasyonları aşağıda belirtilen testler yapılarak belirlenmiştir.

2.1.1. Isıl iletkenlik testleri

Üretilen SP katkılı poliüretan ısı yalıtım plakalarının ısı iletkenlik değerleri ASTM C518, ISO 8301 standardına göre muhafazalı sıcak levha metodu (guarded hot plate method) ile FOX 314 marka ısı akış metresi kullanılarak yapılmıştır.

2.1.2. TG testleri

Malzemenin sıcaklık değişimine bağlı olarak ağırlığındaki değişimleri ölçmek ve malzemelerin ısıl stabilitesini belirlemek için TGA cihazı kullanılarak analizler yapılmıştır. Termogravimetrik analiz 25°C ile 900°C sıcaklık aralığında 10°C/dk ısıtma oranında azot gazı ortamında TGA cihazı (TA Instruments SDT Q600 cihazı) ile gerçekleştirilmiştir.

2.1.3. TM testleri

SP katkılı poliüretan ısı yalıtım plakalarının ısıl genişleme katsayıları TA Instruments firmasının TMA 400 model termomekanik analiz cihazı (TMA) kullanılarak yapılmıştır. TMA cihazı genişleme modunda çalıştırılarak TM analiz numuneleri (10 mm x 5 mm x 3 mm) 40°C dan 120°C sıcaklığına kadar 5°C/dk ısıtma oranında ısıtılmışlardır.

2.1.4. Mekanik testler

Isı yalıtım plakalarının basma testleri ISO 826 standardına göre Shimadzu Autograph AG-IS Marka universal test cihazı kullanarak ölçülmüştür. Numune boyutları 50 mm x 50 mm x 20 mm' dir. Bu test sonucunda elde edilen veriler Trapezium programı ile işlenerek basma dayanımı ve modülü hesaplanmıştır.

2.1.5. Mikro-CT testleri

Scanco Medical µCT50 model cihazı kullanılarak Micro-CT testleri gerçekleştirilmiştir. En uygun filtrenin Al 0,5 mm olduğu tespit edilmiştir. Cihazın en uygun enerji seviyesi olan 55 kVp değerinde analizler yapılmıştır. Yoğunluk 145 uaA, Voxel boyutu 10 um ve entegrasyon süresi 300 ms olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir.

2.1.6. FTIR testleri

Silika-esaslı partiküllerin eklenmesi ile kimyasal yapıda meydana gelen değişimler Perkin Elmer Spektrum Two cihazı kullanılarak Elmas ATR methodu ile spektrumlar elde edilerek Fourier transform Infrared (FTIR) analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.1.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrofları

Üretilen kompozitlerin morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM, Thermo Scientific Apreo S) cihazı kullanılarak incelenmiştir. İncelemeler esnasında ark oluşmaması için, numunelerin yüzeyi kaplama cihazı (Leica em ace600) kullanılarak altın kaplanmıştır. Farklı büyütme oranlarında gerçekleştirilen SEM incelemelerinde, üretilen silika esaslı aerjel partiküllerin morfolojik özellikleri ve boyutları incelenmiştir.

3. Bulgular

3.1. Isıl iletkenlik değerinin belirlenmesi

Kütlesel olarak SP'nin %0,5, %1, ve %2 olacak şekilde PU'nun içerisine katılmasıyla elde edilen ısı yalıtım plakalarının ölçülen ısı iletkenlik sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Poliüretan ısı iletim katsayısı 0,0312 W/mK iken genel olarak çalışılan aralıkta SP eklenmesi ile düşme görülmüştür. %0,5 SP eklenmesi ile ısı iletim katsayısı 0,0263 W/mK olarak bulunmuştur. Bu da yaklaşık %16 oranında bir azalışa tekabül etmektedir. Bu düşüş oranı ağırlıkça %0,5 orandan sonraki yüksek SP oranlarında azalmaya başlamıştır. Nazeran ve Moghaddas'ın yaptığı çalışmada köpük yapıcı ajan kullandıklarında poliüretanın içine %5 SP eklenmesine kadar ısı iletkenliğinin azaldığını görmüşlerdir. Köpük yapıcı ajan olarak normal pentan kullandıklarında %5 silika aerjel ile rijit poliüretan köpüğün iletkenlik değeri 0,0257 W/mK olarak bulunmuştur [11]. Bu çalışmada gözlemlenen iletkenlik düşüşlerinin nedeni hava boşlukları içeren gözenekli bir yapının oluşması olabilir. Ancak SP'nin PU içerisinde nasıl dağıldığı da önemli olabilir. SP'nin miktarı arttıkça PU içerisinde iyi dağılmaması ve bir araya toplanması ısı iletimini zorlaştıran bir faktör olarak ortaya çıkabilir. PU içerisine SP ilavesinin diğer ısı, mekanik, kimyasal özellikleri, porozitesini ve morfolojisini etkileyip etkilemediğini anlamak için diğer analizler yapılmıştır.

Tablo 1. Üretilen ısı yalıtım plakalarının ısı iletim katsayıları (W/mK).

Isı Yalıtım Plakası	Ortalama Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Yüzde Fark %
PU	0,0312	1,24
PU-0,5SP	0,0263	0,47
PU-1SP	0,0267	0,09
PU-2SP	0,0271	0,89

3.2. TG analizleri

PU içerisine SP eklenmesinin poliüretanın maksimum bozunma sıcaklığını etkileyip etkilemediğini anlamak için yapılan TG analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 2'de özetlenmiştir. PU için su çıkışı dışında iki temel bozunma basamağının olduğu görülmüştür. İlki 220-420°C aralığında %63 civarında üreten bağlarının kırılmasından kaynaklı büyük bir temel bozunma diğeri de 420-600°C aralığında poliöl zincirlerinin kopmasından kaynaklı görece küçük (%15 civarında) bir ağırlık kaybı görülmüştür [11]. PU için bozunma sıcaklığı 329°C iken 0,5% SP eklendiğinde 3°C artmış, sonraki eklemelerde düşme eğilimi gözlenmiştir. %2 SP eklendiğinde ise 5°C düştüğü görülmüştür. 600°C'ye kadar olan ağırlık kayıplarına bakıldığında ise SP eklendikçe ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir.

Tablo 2. PU ve SP katkılı PU kompozitlerin TGA verileri.

Numune	Bozunma sıcaklığı (°C)	Ağırlık kaybı (600°C'ye kadar) (%)
PU	329	86,2
PU-0,5SP	332	86,2
PU-1SP	325	85,4
PU-2SP	324	81,6

3.3. TM analizleri

PU ve SP katkılı PU kompozitlerin ısı genleşme katsayıları Tablo 3'de gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi çalışılan aralıkta ısı genleşme

katsayıları SP eklendikçe azalmıştır. Bu da sıcaklık altında SP eklenmiş PU'nun PU'ya göre boyutsal olarak daha kararlı kalabileceği anlamına gelmektedir.

Tablo 3. PU ve SP katkılı PU kompozitlerin ısı genleşme katsayısı değerleri.

Numune	Isıl Genleşme Katsayısı ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)
PU	108,2
PU-0,5SP	90,5
PU-1SP	78,4
PU-2SP	61,3

3.4. Mekanik özellikler

PU ve SP eklenmiş PU kompozitlerin basma dayanımı ve basma modülü değerleri Tablo 4'de özetlenmiştir. Tablodan görülebildiği gibi çalışılan tüm aralıkta SP eklendikçe basma dayanım değerlerinde düşme meydana gelmiştir. Beklendiği gibi daha rijit bir malzemenin eklenmesi nedeniyle basma modül değerlerinde artış görülmüştür. %0,5, %1 ve %2 oranında SP'nin PU'ya eklenmesi ile basma dayanımı %6, %10 ve %30 civarında azalmıştır. Özellikle %2 SP eklendikçe ciddi bir azalmanın olduğu görülmektedir. Bu yüksek orandaki silikanın tam olarak dağılamaması ve bir araya toplanması nedeniyle olmuş olabilir.

3.5. Mikro-CT analizi

%0,5, %1 ve %2 SP içeren PU kompozitlerin micro-CT analizleri Tablo 5'de gösterilmiştir. Ortalama gözenek çapı değerleri PU-0,5SP, PU-1SP ve PU-2SP için sırasıyla 326, 325 ve 385 μm olarak bulunmuştur. %0,5 ve 1% SP içeren PU kompozitlerin hemen hemen aynı iken %2 SP eklendiğinde ortalama gözenek çapında ciddi bir yükselme meydana gelmiştir. Bu gözenek artışı basma dayanımındaki ciddi düşüşü de açıklamaktadır. Gözenek çapı arttığı için basma dayanımı düşmektedir. Buradan da görüldüğü gibi daha fazla SP eklenmesi % porozite değerinde ciddi bir değişiklik yaratmadığı görülmektedir. Ölçülen poroziteye anlamlı bir farklılık yaratmamış olması MicroCT çözünürlüğünün kompozitlerin belli bir çapın altındaki gözenekliliğin karakterizasyonunu gerçekleştirilmekte yetersiz kalmasından kaynaklanıyor olabilir.

Tablo 4. PU ve SP katkılı PU kompozitlerin basma dayanım ve modül değerleri

Numune	Basma Dayanımı (MPa)	Basma Modülü (MPa)
PU	1,09±0,02	0,72±0,04
PU-0,5SP	1,03±0,01	0,79±0,01
PU-1SP	0,98±0,01	0,82±0,03
PU-2SP	0,76±0,05	1,07±0,04

Tablo 5. Kompozitlerin ortalama gözenek çapı ve porozite değerleri

Numune	Ortalama gözenek çapı (µm)	Porozite (%)
PU	341	94,8
PU-0,5SP	326	94,8
PU-1SP	325	95,1
PU-2SP	385	95,0

3.6. FTIR analizi

SP katkılı PU kompozitlerin FTIR spektrumları Şekil 2'de gösterilmiştir. Her üç numunede de 2275 cm^{-1} civarında görülen pik izo-siyonat grubundan kaynaklanmaktadır. Bu pikin varlığı bütün izo-siyonatların üretere dönüşmediği anlamına gelmektedir. Bu bağlamda ortamda hala monomer bulunmaktadır. 3300 cm^{-1} de görülen pik (N-H) grubundan kaynaklanmaktadır. Bu da piki verebilecek fonksiyonel grup monomerlerde olmadığı için buradan da üretere oluşumu görülmektedir. Bu da bize polimerizasyonun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. 1708 cm^{-1} civarında görülen pik ise hidrojen bağı içeren karbonil grubundan kaynaklanıyor olabilir. Karbonil ve amin gruplarının varlığı bize monomerlerin poliüretana dönüştüğünü göstermektedir. SP eklendikçe FTIR spektrumlarında ciddi bir farklanma görülmemektedir.

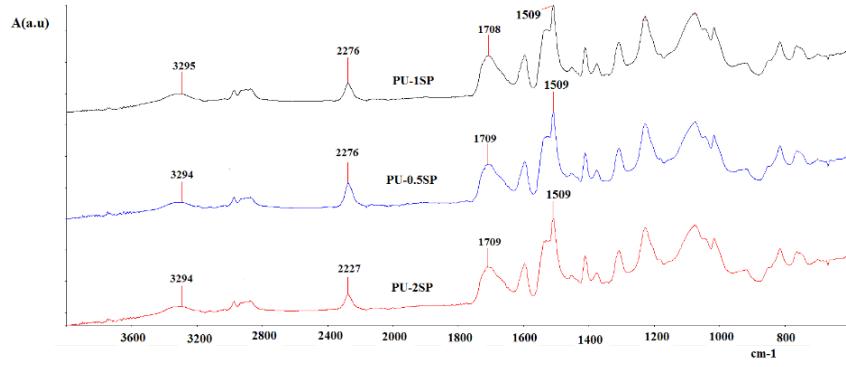
3.7. SEM analizleri

SP için SEM mikrografı Şekil 3'de ve PU-0,5SP, PU-1SP ve PU-2SP için SEM mikrografı ise Şekil 4'de gösterilmiştir. %0,5 ve %1 oranında SP içeren PU'nun SEM mikrograflarında (Şekil 4a

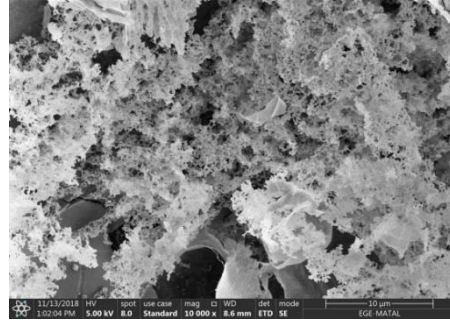
ve 4b) SP'ye dair herhangi bir parçacık izi çok düşük oranlarda SP kullanıldığından görünmemektedir. Ancak Şekil 4c'den de görüldüğü gibi %2 SP eklenmesiyle birlikte bir takım partiküllerin ortaya çıkmaya başladığı görülmektedir. %2 SP içeren PU kompozite (Şekil 4d) daha yakından bakıldığında (ok ile gösterilen partiküllere) ise aerojel benzeri bir yapıda görünen silika-esaslı partiküller net bir şekilde fark edilmektedir. Ayrıca Şekil 4c'den %2'lik SP oranında SP'nin homojen bir şekilde dağılmadığı görülmektedir. Partikül boyutları da büyüklü küçüklü olmak üzere farklı boyutlardadır.

4. Tartışma ve Sonuç

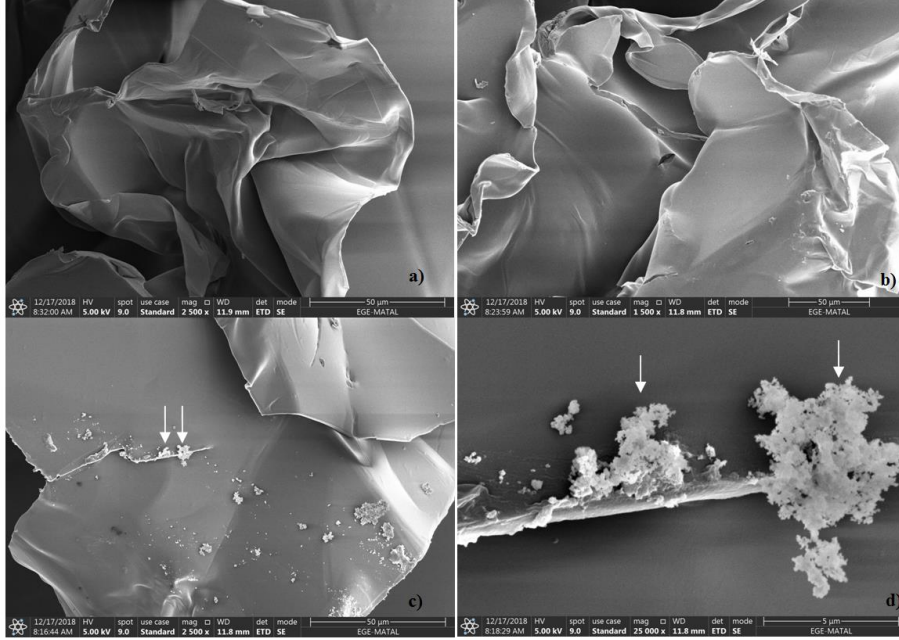
Sol jel yöntemi elde edilen silika partiküller poliüretanın ısı izolasyon özelliklerini düşürmek için kullanılmıştır. Bu bağlamda %0,5 ve %2 oranlarında SP'nin poliüretanın içine eklenmesi ile poliüretanın ısı iletim katsayısının %16 ve %13 civarında düştüğü görülmüştür. Bu silika esaslı partiküller poliüretanın ısı stabilitesini çok fazla değiştirmemiştir. Bununla birlikte %0,5 ve %2 oranlarında SP eklenmesi poliüretanın basma dayanımını sırasıyla %6 ve %30 oranında düşürmüştür. Bununla birlikte ısı genleşme katsayıları ise dikkate değer oranda düşme gerçekleşmiştir. Yürütülen bu çalışmanın sonucunda poliüretanın içine %0,5 oranında SP eklenmesi, poliüretanın ısı izolasyon özelliklerini iyileştirdiği ve diğer özellikleri de dikkate değer oranda bozmadığı için önerilmektedir. Öyle ki poliüretan içerisine %0,5 SP eklenmesi ile basma dayanımı 1,09 MPa'dan 1,03 MPa'a ortalama gözenek çapı 341 μm 'den 326 μm 'ye, ısı genleşme katsayısı 108,2 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 'den 90,5 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 'ye düşmüştür. Ayrıca temel bozunma basamağı için maksimum bozunma sıcaklığını da 3 $^\circ\text{C}$ arttırmıştır. Bir sonraki çalışmada daha düşük maliyetli silika kaynakları kullanarak daha büyük ölçekte aerojel üretimi ve poliüretan esaslı yalıtım malzemelerindeki performanslarının test edilmesi planlanmaktadır.



Şekil 2. PU kompozitlerin FTIR spektrumları



Şekil 3. SP'nin SEM mikrografları



Şekil 4. Kompozitlerin SEM mikrografları: a)PU-0,5SP, b) PU-1SP, c) PU-2SP, d)PU-2SP(yakın)

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 115M075 nolu proje ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] Diascorn, N., Calas, S., Sallee H., Achard P., Rigacci A. 2015. Polyurethane aerogels synthesis for thermal insulation – textural, thermal and mechanical properties, *The Journal of Supercritical Fluids*, Cilt. 106, s 76-84. DOI: 10.1016/j.supflu.2015.05.012
- [2] Lee P.C., Kim B.R., Jeoung S.K., Lee G., Han S.W., Kim H., Li K.D., Han J.K. 2016. Flame retardancy and thermal stability of polyurethane foam composites containing carbon additives, *AIP Conference Proceedings*, Cilt. 1713, s. 120014-1-120014-4. DOI: 10.1063/1.4942329.
- [3] Nikje M.M.A., Tehrani, Z.M. 2009. Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane Rigid Foam/Modified Nanosilica Composite, *Polymer Engineering & Science*, Cilt. 50(3), s. 468-473. DOI:10.1002/pen.21559.
- [4] Verdolotti, L., Lavorgna, M., Lamanna, R., Di Maio, E., Iannace, S. 2015. Polyurethane-silica hybrid foam by sol-gel approach: Chemical and functional properties. *Polymer*, Cilt. 56, s. 20-28. DOI:10.1016/j.polymer.2014.10.017.
- [5] Saha, M.C., Kabir, M.E, Jeelani S. 2008. Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles. *Mater. Sci. Eng. A*, Cilt. 479, s. 213-222. DOI: 10.1016/j.msea.2007.06.060.
- [6] Jeon, H.T., Jang, M.K., Kim, B.K., Kim, K.H. 2007. Synthesis and characterizations of waterborne polyurethane-silica hybrids using sol-gel process, *Cilt. 302*, s. 559-567, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.03.043.
- [7] Dourbash, A., Buratti C., Belloni, E., Motohari S. 2017. Preparation and characterization of polyurethane/silica aerogel nanocomposite materials, *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt. 134, s.1-13, DOI: 10.1002/app.44521.
- [8] Bhagat, S.D., Kim Y.H., Ahn, Y.S., Yeo J.G. 2007. Rapid synthesis of water-glass based aerogels by in situ surface modification of the hydrogels, *Applied Surface Science*, Cilt. 253, s. 3231-3236, DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.07.016
- [9] Rao, A.V., Kalesh R.R. 2004. Organic Surface Modification of TEOS Based Silica Aerogels Synthesized by Co-Precursor and Derivatization Methods, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Cilt. 30, s. 141-147, DOI: 10.1023/B:JSST.0000039498.61813.9e.
- [10] Chang K.Y., Wang Y.Z., Peng, K.C, Tsai H.S., Chen, J.R., Huang C., Ho, K.S., Lien W. 2014. Preparation of silica aerogel/polyurethane composites for the application of thermal insulation, *Journal of Polymer Research*, Cilt. s. , DOI: 10.1007/s10965-013-0338-7.
- [11] Nazeran, N., Moghaddas, J. 2017. Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Cilt. 461, s. 1-11, DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.037