



Atık Katalitik Konvertörlerden Geri Kazanılmış Nano Boyutlu Seramik Tozlarının Epoksi Matriksli Kompozitlerde Katkı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi

Sinan KÖSE*

Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus OSB Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine, Mersin, Türkiye

Geliş Tarihi: 01.02.2023

Kabul Tarihi: 11.03.2024

Basım Tarihi: 19.01.2024

Atıf yapmak için: Köse, S. (2024). Atık Katalitik Konvertörlerden Geri Kazanılmış Nano Boyutlu Seramik Tozlarının Epoksi Matriksli Kompozitlerde Katkı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 9(1), 87-93. <https://doi.org/10.35229/jaes.1430375>

How to cite: Köse, S. (2024). Evaluation of Nano-sized Ceramic Powders Recovered from Waste Catalytic Converters as Filler in Epoxy Matrix Composites. *J. Anatolian Env. and Anim. Sciences*, 9(1), 87-93. <https://doi.org/10.35229/jaes.1430375>

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6224-3388>

*Sorumlu yazarın:

Sinan KÖSE

Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus OSB Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Pr., 33100, Akdeniz, Mersin, Türkiye

✉: sinankose@tarsus.edu.tr

Öz: Fosil yakıtlı araçların yanma sonrası egzoz gazlarında bulunan zararlı bileşenleri asgari düzeye indirgeyen katalitik konvertör sistemleri, platin, paladyum ve rodyum gibi değerli metallerin yanı sıra seramik gibi ekonomik değeri düşük malzemelerden oluşmaktadır. Kullanım ömürlerinin sonunda geri dönüşümleri hem içeriğindeki değerli metallerin ekonomiye tekrar kazandırılması hem de atık depolama gibi atık bertaraf sorunlarını ortadan kaldırmaktadır. Katalitik konvertörlerin içeriğindeki değerli metallerin tekrar geri kazanımları sırasında seramik gibi ekonomik değeri olmayan malzemeler atık olarak göz ardı edilmektedir.

Bu çalışma ile; kullanım ömürleri tamamlanmış katalitik konvertörlerden elde edilen seramiklerin, kompozitlerde katkı malzemesi olarak değerlendirilmesini amaçlanmıştır. Değerli metalleri için geri dönüşüme tabi tutulan konvertörlerin artık seramik malzemeleri öğütülerek nano boyuta indirgenmiştir. Nano boyuttaki atık katalitik konvertör seramik tozları ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında epoksiye katılarak kompozit numuneleri elde edilmiştir. Bu numunelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık katalitik konvertör, geri kazanılmış seramik tozu, kompozit malzeme, sürdürülebilir çevre.

Evaluation of Nano-sized Ceramic Powders Recovered from Waste Catalytic Converters as Filler in Epoxy Matrix Composites

Abstract: Catalytic converter systems, which minimize the harmful components in the exhaust gases of fossil fuel vehicles after combustion, consist of precious metals such as platinum, palladium, and rhodium as well as materials with low economic value such as ceramics. Their recycling at the end of their useful life eliminates both the recycling of the precious metals in their content to the economy and waste disposal problems such as waste storage. During the recycling of precious metals in catalytic converters, materials with no economic value such as ceramics are ignored as waste. Studies have shown that the use of ceramics as additives in composites leads to significant improvements in thermal conductivity properties.

This study aims to utilize ceramics obtained from end-of-life catalytic converters as additives in composites. The residual ceramic materials of the converters, which were recycled for their precious metals, were ground and reduced to nano size. Nano-sized ceramic powders were doped into epoxy at 5%, 10% and 15% by weight and composite samples were obtained. The physical, chemical and mechanical properties of these samples were analyzed and compared with each other.

Keywords: Composite material, Recycled ceramic powder, Sustainable environment, Waste catalytic converter.

*Corresponding author's:

Sinan KÖSE

Tarsus University, Mersin Tarsus OSB Vocational School of Technical Sciences, Department of Mechanical and Metal Technologies, Machinery Pract., 33100, Akdeniz, Mersin, Türkiye

✉: sinankose@tarsus.edu.tr

GİRİŞ

Özellikle fosil yakıt tüketen araçların egzoz gazlarının içerisinde yer alan karbon monoksit, hidrokarbonlar ve azot oksitler gibi zararlı maddeleri, katalitik materyal aracılığıyla karbon dioksit, su ve azot gibi daha az zararlı maddelere dönüştüren (Karim & Ting, 2020) sistemler (katalitik konvertörler); özellikle fosil yakıt tüketiminin çevreye verdiği zararları asgari düzeye indirmek için tasarlanmışlardır. Çevresel etkilerinin yanı sıra yakıt verimliliği ve kullanıldıkları sistemlerde performansın artmasını da sağlayan katalitik konvertörler yanmamış yakıtın tamamen yanmasını da sağlamaktadır. Bu sistemler başta hava kirliliği olmak üzere çeşitli avantajlar sağlarken, kullanım ömürlerinin dolmasıyla bir süre sonra atık olarak değerlendirilmektedirler. Yanma işlemi tamamlanmamış hidrokarbonlar gibi zararlı gazları CO₂, N₂, H₂O gibi daha az zararlı gazlara dönüştürülmesinde kullanılan bu sistemlerin yapısı petekli seramik malzemelerin üzerine paladyum (Pd), platin (Pt) ve rodyum (Rh) gibi değerli metaller tutturularak imal edilmektedir. Ancak kullanım ile bir süre sonra katalizör zehirlenmesine uğrayan konvertörlerin değiştirilmesi gerekmektedir (Kumaran vd., 2016). Özellikle 2006 yılında yıllık 140 milyon adet katalitik konvertör satışları dikkate alındığında (İslam vd., 2018) bu sistemler ve içerdikleri malzemelerin kullanım ömürleri sonrası çevreye etkileri yadsınamaz bir gerçektir. Artan atık katalitik konvertörler sayısı depolama sahalarının artmasına (Malhotra vd., 2015) ve imha süreçlerindeki sorunları beraberinde getirebilmektedir (Bahaloo-Horeh vd., 2019). İçeriklerindeki ağır metallerin suya ve toprağa salınması, gıda zincirine verdiği zararlar (Wang vd., 2017), ağır metallerden kaynaklı alerjik reaksiyonlar, deri hastalıkları hatta kansere yol açabilecek canlı dokularda birikme (Kalavrouziotis & Koukoulakis, 2009) gibi sağlık sorunlarına da yol açtığı bilinmektedir. Sürekli artan atık katalitik konvertör sayısı başta çevre, canlı sağlığı ve depolama sorunlarının yanı sıra içerdikleri değerli madenlerin ekonomiye tekrar kazanımı için önem arz etmektedir. Pd, Pt ve Rh başta olmak üzere değerli bu metallerin dünya genelinde üretimleri ve kullanıldıkları başlıca ürünlerin başında gelen (Fornalczyk Saturnus, 2013; Karim & Ting, 2020; Rzelewska & Regel-Rosocka, 2018) katalitik konvertörlerin geri dönüşüm süreçlerinde temel malzeme bileşenlerinden biri ekonomik değeri diğer metallere göre düşük gibi görünen seramiklerdir. Seramik gövdeler katalitik konvertörlerin ana taşıyıcı gövdeleri olup (Bahaloo-Horeh & Mousavi, 2020) geri dönüşüm süreçlerinde geri kazanımları kısıtlıdır. Katalitik konvertörlerin geri dönüşümlerinde farklı teknikler kullanılmakta olup genellikle seramik dışında kalan metal bileşenler üzerine yoğunlaşmaktadır (Diac vd., 2020; Saturnus & Fornalczyk, 2013; Shukla vd., 2023). Yapılan çalışmalarda özellikle minimize edilen elektronik cihazların

artan güç yoğunluklarına karşı enerji dağılımlarında kullanılan kompozitlerin katılanmasında kullanılan seramik tozlarından uygulama alanlarında olumlu sonuçlar edildiği görülmüştür (Chen vd., 2016; Kume vd., 2019; Yoon vd., 2022; Zhang vd., 2019;). Yang & Gu, (2010) hacimce %20'lik katkı polyster matrisli kompozitlerde 200–320 W/mK aralığında mükemmel termal iletkenlik sergilediğini raporlamıştır. Zandinejad ve arkadaşlarının seramik dolgu malzeme katkı kompozitlerin geleneksel cam dolgulu kompozitler ile karşılaştırmasında eğilme modülünde artış olduğu belirtilmiştir. Seramik tozlarının kompozit malzemelerindeki araştırmaları saf katkı maddesi olarak kullanımı olmamakla beraber diğer katkı maddelerinin geliştirilmesi/desteklenmesi amacıyla hibrit katkı malzemesi olarak değerlendirildiği de görülmektedir (Sebastian & Jantunen, 2010). Literatür araştırmasından da görüldüğü üzere, seramik katılanmış epoksi kompozitlere bulunmasına karşına atık katalitik konvertörlerin geri dönüştürülmesi sonucu kalan atık seramik tozlarının kompozit üretiminde katkı malzemesi olarak kullanıldığı çalışmalara rastlanmamıştır. Bu çalışma ile otomotiv sektöründe oluşan kullanım ömrünün sonuna gelmiş katalitik konvertörlerdeki değerli metallerin ayrılması prosesi sonucu en son kalan seramik tozu atıklarının değerlendirilmesi amacıyla epoksi reçinelere çeşitli oranlarda katkı malzemesi olarak katılanmıştır. Atık seramik tozunun kompozit malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma ile katalitik konvertörlerdeki değerli metaller ayrıştırıldığında kalan seramik tozunun katma değeri yüksek bir ürüne dönüştürülmesi ile sıfır atık oluşumuna katkıda bulunulmuştur. Bu çalışma kullanılmış katalitik konvertörlerin kullanım alanı bulması ile ilgili değerlidir. Katalitik konvertörlerin yüzeyindeki değerli metallerin ayrılması sırasında uygulanan proses sonrasında kalan tek atık olan işlem görmüş seramik tozunun kullanılabileceği katma değeri yüksek bir ürün eldesi amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Malzemeler: Mersin Tarsus Oto Sanayi Sitesi'ndeki hurda katalitik konvertörleri toplayan işletmelerden kullanım ömrünün sonuna gelmiş olan atık katalitik konvertörler temin edilmiştir. Seramik malzemelerin yapısal farklılıklarını ortadan kaldırmak ve çalışmanın geneli yansıtması adına ülkemizde en çok kullanılan araçlardan 5 model seçilerek eşit miktarlarda alınmıştır. Hidroklorik asit (HCl) %37 saflıkta, sülfürik asit (H₂SO₄) %98 saflıkta ve hidrojen peroksit (H₂O₂) %30 saflıkta olup Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir.

Karakterizasyon: Atık katalitik konvertörlerin üzerindeki değerli metallerin ayrıştırılması sonucu kalan seramik tozunun bileşiminin belirlenmesi amacıyla FEI Nova NanoSEM 450 marka Alan Emisyonlu taramalı

Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ve element analizi Bruker X Flash 6130 marka Enerji Dağılım X ışını spektroskopisi (EDX) cihazı kullanılmıştır. Nanoseramik tozlarının epoksi reçinede katkılındığında elde edilen ürünlerin kristalite özellikleri PANalytical marka Empyrean model X ışını kırınımı (XRD) cihazı ile yapılmıştır. Seramik tozunun epoksi içerisinde homojen dağılımı görebilmek ve yüzey morfolojisini incelemek amacıyla SEM haritalama yapılmıştır. Seramik tozunun kompozit içerisinde dağılımını incelemek ve epoksi yapısındaki değişimi incelemek amacıyla malzemelerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) Spektrometresi analizi Bruker marka Alpha model cihaz ile 400-4000 cm^{-1} frekansında gerçekleştirilmiştir.

Seramik Tozunun Hazırlanması: Atık seramik tozunun hazırlanması amacıyla atık katalitik konvertörlerdeki değerli metaller olan platin, rodyum ve paladyumun kimyasal işlemler ile ayrılması sonucu kalan atık seramik tozları kullanılmıştır. Bu tozların hazırlanması amacıyla öncelikle 5 farklı otomobil modelinden alınmış olan eşit miktardaki katalitik konvertörler önce havanda ince toz haline gelene kadar öğütülmüştür. Ardından elde edilen toz değirmende daha ince tozlar haline getirilmiştir. Katalitik konvertör tozlarından 10 g alınarak üzerine 50 mL derişik HCl ve 9 mL H_2O_2 eklenerek 80 °C'de 24 saat karıştırılmıştır. Ardından elde edilen ürün santrifüjlenerek pH nötr olana kadar saf su ile yıkanmıştır. Oluşan ürün 70 °C'de tamamen kuruyana kadar bekletildi. İri taneciklerin kalmış olması ve nano boyutta taneciklerin ayrılması amacıyla oluşan ürün tekrar öğütme prosedürüne tabi tutulduktan sonra suda yüzdürme tekniği ile nanotanecikler ayrılmıştır. Ayrılan işlem görmüş katalitik konvertör tozu (İKK tozu) tekrar kurutularak kullanıma hazır hale getirilmiştir. Seramik tozunun nano boyutta olduğunu test edebilmek amacıyla Rayleigh saçılma prensibine göre test edilmiştir. Buna göre nano boyutta taneciklerin ortamda varlığı üzerine düşen ve dalga boyu kendinden daha büyük olan taneciklerin saçılmasına neden olur. Şekil 1'de verilen ve İKK'nın yüzdürme tekniği ile ayrılması sırasındaki görüntüsünden nanoseramiklerin ayrıldığı görülmektedir.

Kompozit Hazırlanması: Kompozit üretiminde LR285 epoksi reçine ve LH285 sertleştirici 1:4 (V/V) oranında kullanılmıştır. İlk olarak 50 mL epoksi reçine alınarak, %5, %10 ve %15 oranlarında İKK tozu azar azar eklenmiştir. Bu karışım mekanik karıştırıcı yardımıyla 30 dk 150 rpm karıştırma hızında karıştırılıp ardından 30 dk ultrasonik banyoda bekletilmiştir. Epoksi içerisinde kabarcık kalmadığından emin olduktan sonra tekrar mekanik karıştırıcı yardımıyla 30 dk karıştırılmıştır. Bu sırada +4 °C'ye kadar soğutulmuş olan sertleştirici İKK/epoksi karışımına eklenerek 7-10 dk karıştırma yapılmıştır. Öncesinde vazelin veya parafinik yağ ile yağlanmış dog-bone kalıplara kabarcık oluşturmayacak şekilde bu kalıba döküm yapılmıştır. Kompozit 24 saat kürlendikten sonra

kalıptan çıkartılarak fiziksel, kimyasal ve mekanik testlere tabi tutulmuştur.



Şekil 1. Seramik tozlarının lazer ışığı altında nano ölçekli yapısı.
Figure 1. Nanoscale structure of ceramic powders under laser light.

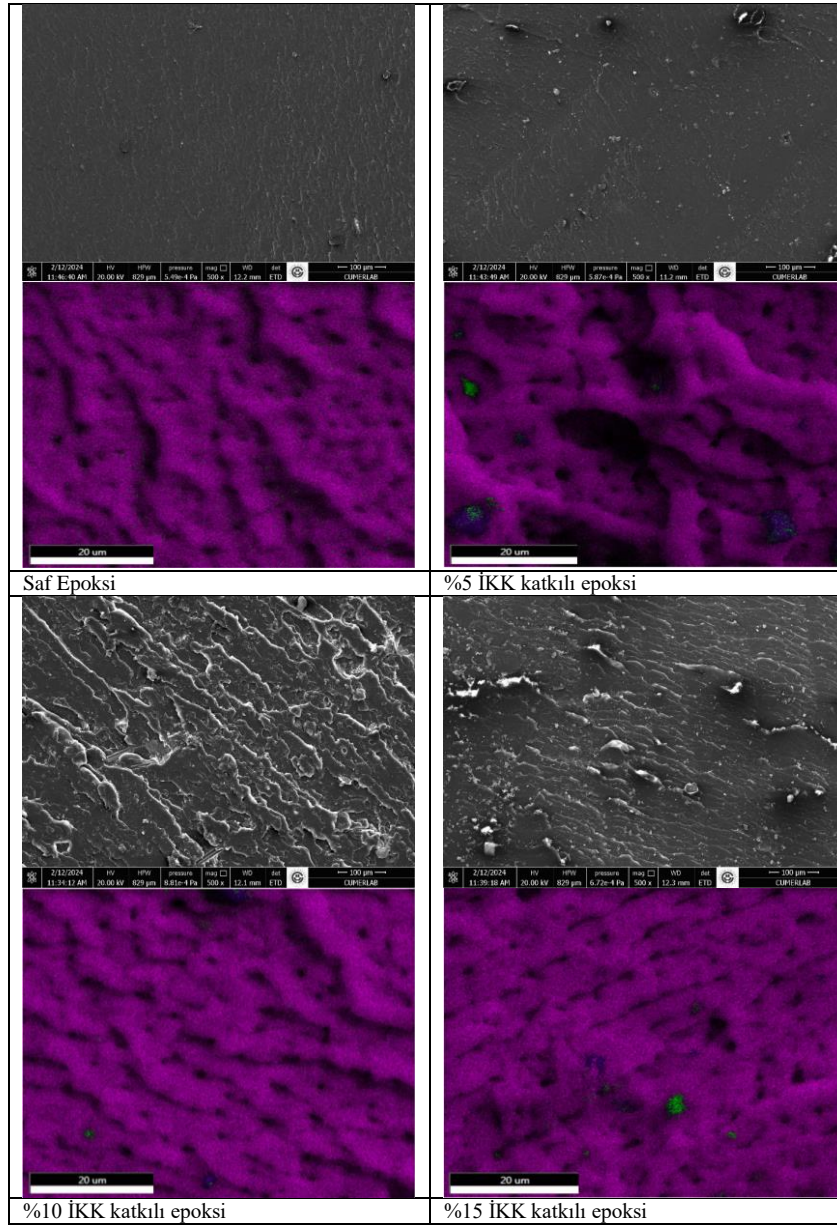
SONUÇ VE TARTIŞMA

Epoksi reçineler birçok alanda kullanılmakta olup başlıca kullanım alanını belirleyen faktörlerden biri de katkı malzemeleridir. Katkı malzemesi olarak kullanılan seramik SiO_2 ve Al_2O_3 başta olmak üzere CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O ve ZrO_2 ihtiva etmektedir. İçeriğindeki inorganik malzemeler sayesinde kompozit malzemelere katkılındığında mekanik özellikleri geliştirdiği görülmektedir. Bu çalışmada seramiğin bir türü olan ve egzozlarda zararlı tam yanmamış yakıt gazlarının tam yanmasını sağlamak amacıyla kullanılan değerli metallerin (Pd, Pt ve Rh) katalizör olarak kullanılmasında destek görevi gören seramik materyalinin kullanılması hedeflenmiştir. Kullanılmış katalitik konvertörler ile ilgili yapılan tüm çalışmalar değerli metallerin geri kazanılması ve tekrar kullanılabilirliği ile ilgilidir. Ancak bu sırada oluşan fazla miktardaki seramik atığın tekrar kullanımı konusunda bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışma ile değerli metallerin geri kazanımı işlemi sonrası oluşan katalitik konvertör tozlarının boyutlandırılarak epoksi reçinelerde katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Taneciklerin boyutlandırılması sırasında nano taneciklerin ayrılması amacıyla suda yüzdürme tekniği kullanılmıştır. Mevcut ayırma teknikleri ve ekipmanlar, nano ve mikro malzemelerin ayrılması için yeterli değildir. Katalitik konvertör tozunun işlem sonrasında su ile karışımları hazırlanmış askıda kalan kısımlar yüzdürülerek ayrılmıştır. Seramik malzemesi kimyasal içeriği ile değişmekle birlikte yoğunluğu 2.5-6 g/cm^3 , suyun ise 1 g/cm^3 'tür. Seramik yoğunluğu daha yüksek olduğundan seramik suyun dibine çöker. Ancak seramik tozu nano boyuta getirildiğinde suda yüzebilir ve bu sayede boyutlandırma yapılmıştır. Malzeme boyutu ne kadar küçük olursa epoksi içerisinde dağılması o kadar homojen olabilir ve bu sayede epoksi özelliklerinde iyileşmeler sağlanabilir.

Nano boyuttaki işlem görmüş seramik tozu epoksi içerisinde dağılımının homojenliğini ölçmek ve çekme testinde kopma yüzeyindeki oluşumları incelemek amacıyla

SEM analizi yapılmıştır. Şekil 2’de verilen SEM ve haritalama görüntülerinde tabaka şeklinde olan ve üzerinde kesik çizgiler olan yüzey epoksi matris malzemesini ve bu matris yüzeyinde dağılmış top şeklindeki oluşumlar İKK’yı ve yuvarlak çukurlar çekme testi sırasında kırılma sonucu diğer yüzeyde kalan İKK’nın oluşturduğu yüzeyi ifade etmektedir. İKK tozunun epoksi içerisindeki oranı arttıkça epoksi kırık yüzeyindeki kopma direncinin arttığı görülmektedir. %10 İKK içeren örnekte kopma yüzeylerinin

oldukça fazla olması kopma direncinin en yüksek olduğu örnek olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni kopma çizgilerinin olduğu noktalarda İKK’nın bağ zayıflamasına neden olmasıdır. Epoksi-epoksi arasındaki bağ sertleştirici ajan vasıtasıyla birbirlerine bağlanır ancak İKK-epoksi arasındaki bağ sertleştirici gibi bir kovalent bağdan ziyade moleküller arası çekim kuvvetleri vasıtasıyla gerçekleşir. Bu nedenle de katkı malzemesindeki artı kırık yüzey miktarını artırmıştır.



Şekil 2. %5, %10 ve %15’lik seramik tozu katkılı ve katkısız kompozit numuneleri SEM görüntüleri.
Figure 2. SEM images of composite samples filler with 5%, 10% and 15% ceramic powder.

Şekil 2’de verilen haritalama görüntülerinde pembe rengi C elementini, mor rengi Si elementini ve yeşil rengi O elementini işaret etmektedir. Buna göre mikroskop görüntülerinden de anlaşılacağı üzere nanoseramik tozları epoksi içerisinde oldukça homojen bir şekilde dağılmıştır. Seramik tozundan gelen element olan Si’un görüntülerde toplanmadığı ve homojen dağıldığı açıkça

görülmemektedir. Birkaç mikron boyutlara sahip taneciklerin varlığı haritalama görüntülerinde görülebilir. Ancak bu şekilde toplanmaların olmayışı seramik tozunun nano boyutta dağıldığını desteklemektedir. Ayrıca Şekil 1’de verilen Rayleigh saçılma testi de seramik tozlarının nano boyutta olduğunu desteklemektedir. Özellikle nano malzemelerin kompozitlerde katkı malzemesi olarak

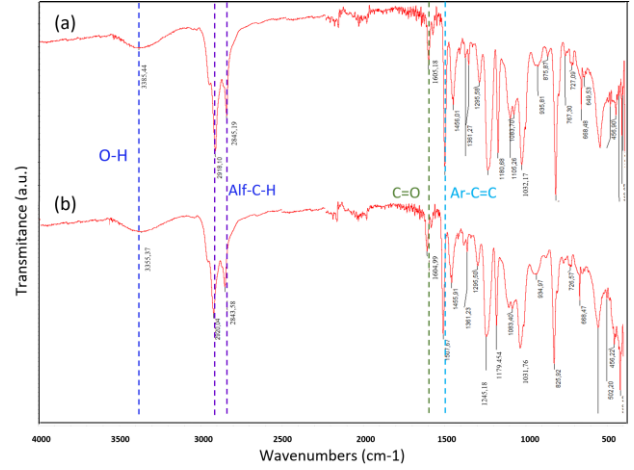
kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde nano malzemelerin topaklandığı ve gerçekte nano boyutta yapıya dahil olmadığı görülmektedir.

Kompozitlere ait FT-IR spektrumları Şekil 3'te verilmiştir. FT-IR spektrumu ile seramik tozu olmadan ve katkıladıktan sonra epoksi kompozit yapısındaki fonksiyonel grupların değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. 3388 cm⁻¹'de OH piki, 2918 ve 2845 cm⁻¹'de oluşan pikler alifatik C-H piklerini, 1605 cm⁻¹'deki pik yapıdaki C=O pikini, 1507 cm⁻¹'de epoksi yapısındaki aromatik halkadaki C=C piklerini göstermektedir. Seramik tozu bileşenleri inorganik yapıda olması nedeniyle katkılama sonrası tüm piklerde sağa doğru kaymalar gözlenmiştir. Bu kaymaların nedeni safsızlık gibi davranan seramik tozu nedeniyle epoksida bulunan fonksiyonel gruplar arasındaki etkileşimin azalmasıdır.

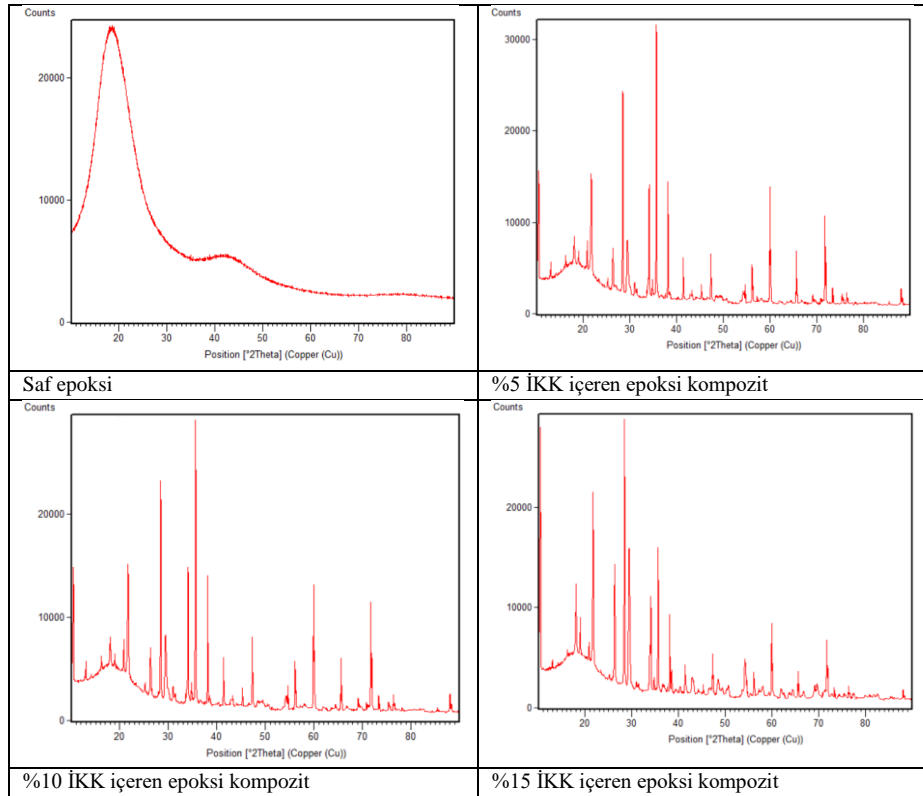
Hem saf hem de seramik tozu katkılı epoksilere ait FT-IR spektrumları incelendiğinde her iki spektrum arasında yeni piklerin oluşmadığı görülmüştür. Bu durum seramik tozunun epoksi içerisinde homojen dağıldığını ve topaklanma olmadığını göstermektedir. Seramik nano boyutta olduğundan ve homojen dağıldığından nano seramik tozuna ait piklerin epoksi tarafından baskılandığı düşünülmektedir. Saf epoksi ve nanoseramik tozu katkılı

epoksi kompozitlere ait XRD kırınım desenleri Şekil 4'te verilmiştir. XRD ölçümleri 40 kV, 15 mA enerjide, 5 derece/dk tarama hızı ile 10-90 ° tarama aralığında yapılmıştır.

Tepe noktası $2\theta = 22^\circ$ olan ve $2\theta = 15^\circ - 30^\circ$ arasında gözlenen yayvan pik epoksi reçineye ait amorf yapıyı işaret etmektedir.



Şekil 3. FT-IR spektrumu a) saf epoksi, b) %10 katkılı epoksi.
Figure 3. FT-IR spectra a) pure epoxy, b) 10% filler epoxy.



Şekil 4. Nanoseramik katkılı epoksi kompozitlere ait XRD kırınım desenleri.
Figure 4. XRD diffraction patterns of nanoceramic filler epoxy composites.

Bununla birlikte nanoseramik tozuna ait piklerin kompozite katkılanma sonrasında gözlemlendiği görülmektedir. İKK oranının artışıyla birlikte seramiğe ait piklerin yoğunluğunda artış olduğu görülmektedir. Ayrıca

epoksiye ait yayvan pikin hala gözlenmesi seramik tozunun kompozit içerisinde oldukça homojen dağıldığını göstergesidir. Tablo 1'de %5, %10 ve %15 oranlarında nano-seramik tozu ilaveli epoksi kompozitlerin çekme

mukavemeti sonuçları verilmiştir. Tablo 1'den, nano-seramik tozu miktarının artmasıyla kompozitlerin çekme mukavemetinin azaldığı ve epoksi kompozitlerin mukavemetlerinin, saf epoksinin mukavemet değerlerinden daha düşük olduğu görülebilmektedir. Çatlak gibi yapıdaki kusurlar, genel olarak homojen dağılmış parçacık takviyeli bir kompozit malzemedeki (izotropik) çekme özelliklerini ve fiber takviyeli polimer kompozitlerdeki fiber kırılması ve matris çatlaması gibi arıza modlarını yönetmektedir. Partikül ilaveli kompozit malzemelerde, polimer matris içerisine ilave edilen dağılmış sert partiküller, polimer-partikül arayüzeyi boyunca gerilim transferi yerine süreksizlik oluşturarak yapının zayıflamasına neden olur ve bu kusurlu bölgelerde ortaya çıkan gerilim konsantrasyonları deformasyonun erken başlamasına neden olur. Tablo 1'de görüldüğü gibi saf epoksi polimerine ilave edilen nano-seramik tozu kompozitlerin çekme modülünü artırmıştır. Yapılan çalışmalarda bu artışın sebebinin metal parçacıkları ve metal parçacıkları ile epoksi arasındaki arayüz nedeniyle güçlendirme mekanizması olduğu belirtilmiştir. Seramik tozu-epoksi kompozitlerde, tozun epoksi matris içerisinde homojen dağılması, kompozitin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Homojen dağılan partiküller nedeniyle artan çekme modülü rijitliğin bir göstergesidir. Epoksi matris içerisine ilave edilen sert ve gevrek faz olan nano-seramik tozu rijitliği artırmıştır.

Tablo 1. Çekme testi sonuçları.

Table 1. Tensile test results.

Kompozit bileşen(ter)i	Çekme mukavemeti, MPa	Çekme modülü, MPa
Epoksi	56.28	1150
Epoksi + %5 İKK	50.14	1254
Epoksi + %10 İKK	47.26	1348
Epoksi + %15 İKK	44.74	1566

Elde edilen tüm sonuçlar gösteriyor ki atık katalitik konvertörlerin değerli metalleri geri kazanımı sonucu en son kalan seramik tozu atıklarının nanoboyutta epoksi reçineye katkı malzemesi olarak eklenmesi ile elde edilen kompozitlerin hazırlanabildiğini göstermektedir. Ayrıca SEM ve haritalama görüntüleri, FT-IR spektrumu, XRD kırınım deseni sonuçlarından yola çıkılarak nanoseramik tozunun yapıya homojen olarak katıldığı ve topaklanmalar olmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar atık seramik tozunun katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi sağlanmıştır. Bu çalışma, atık katalitik konvertörün %100 geri dönüşümü sağlanması açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

Bahaloo-Horeh, N. & Mousavi, S.M. (2020). Comprehensive characterization and environmental risk assessment of end-of-life automotive catalytic converters to arrange a

sustainable roadmap for future recycling practices. *Journal of Hazardous Materials*, **400**, 123186. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2020.123186](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123186)

Chen, H., Ginzburg, V.V., Yang, J., Yang, Y., Liu, W., Huang, Y. & Chen, B. (2016). Thermal conductivity of polymer-based composites: *Fundamentals and applications. Progress in Polymer Science*, **59**, 41-85. DOI: [10.1016/j.progpolymsci.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.03.001)

Diac, C., Maxim, F.I., Tirca, R., Ciocanea, A., Filip, V., Vasile, E. & Stamatin, S.N. (2020). Electrochemical Recycling of Platinum Group Metals from Spent Catalytic Converters. *Metals*, **10**(6), 822. DOI: [10.3390/met10060822](https://doi.org/10.3390/met10060822)

Firmansyah, M.L., Kubota, F. & Goto, M. (2019). Selective recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts by leaching and solvent extraction. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **52**(11), 835-842.

Islam, K.M.N., Hildenbrand, J. & Hossain, M.M. (2018). Life cycle impacts of three-way ceramic honeycomb catalytic converter in terms of disability adjusted life year. *Journal of Cleaner Production*, **182**, 600-615. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.02.059](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.059)

Kalavrouziotis, I.K. & Koukoulakis, P.H. (2009). The Environmental impact of the platinum group elements (pt, pd, rh) emitted by the automobile catalyst converters. *Water Air Soil Pollut* **196**, 393-402. DOI: [10.1007/s11270-008-9786-9](https://doi.org/10.1007/s11270-008-9786-9)

Karim, S. & Ting, Y.P. (2020). Ultrasound-assisted nitric acid pretreatment for enhanced biorecovery of platinum group metals from spent automotive catalyst. *Journal of Cleaner Production*, **255**, 120199. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.120199](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120199)

Kumaran, N.K., Balaji, A., Manonmani, S. & Kumar, R. (2016). Catalytic converter for automotive exhaust emission; Review, *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering*, **1**(8), 1-6.

Kume, S., Yamada, I., Watari, K., Harada, I. & Mitsuishi, K. (2009). High-Thermal-Conductivity AlN Filler for Polymer/Ceramics Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, **92**(1), 153-156. DOI: [10.1111/j.1551-2916.2008.02650.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02650.x)

Malhotra, J., Bhandwal, M., Tyagi, R.K., Kalia, A., Pandey, S. & Rahul A. (2015). Ecofriendly catalytic converter to reduce biochemical effect of exhaust gases. *Der Pharma Chem.*, **7**(12), 56-61

Rzelewska, M. & Regel-Rosocka, M. (2018). Wastes generated by automotive industry spent

- automotive catalysts. *Physical Sciences Reviews*, 3(8), 20180021. DOI: [10.1515/psr-2018-0021](https://doi.org/10.1515/psr-2018-0021)
- Saternus, M. & Fornalczyk, A. (2013).** Possible ways of refining precious group metals (PGM) obtained from recycling of the used auto catalytic converters. *Metalurgija*, 52(2), 267-270.
- Sebastian, M.T. & Jantunen, H. (2010).** Polymer-Ceramic Composites of 0-3 Connectivity for Circuits in Electronics: A Review. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 7(4), 415-434. DOI: [10.1111/j.1744-7402.2009.02482.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02482.x)
- Shukla, M.K., Chauhan, B.V.S., Bhaskar, T., Dhar, A. & Vedratnam, A. (2023).** Recycling of Platinum Group Metals and Alternative Catalysts for Catalytic Converters. In R. K. Upadhyay, S. K. Sharma, V. Kumar, & H. Valera (Eds.), *Transportation Systems Technology and Integrated Management* (pp. 363-398). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Wang, L., He, J., Xia, A., Cheng, M., Yang, Q., Du, C. & Zhou, Q. (2017).** Toxic effects of environmental rare earth elements on delayed outward potassium channels and their mechanisms from a microscopic perspective. *Chemosphere*, 181, 690-698. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2017.04.141](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.141)
- Yang, K. & Gu, M. (2010).** Enhanced thermal conductivity of epoxy nanocomposites filled with hybrid filler system of triethylenetetramine-functionalized multi-walled carbon nanotube/silane-modified nano-sized silicon carbide. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(2), 215-221. DOI: [10.1016/j.compositesa.2009.10.019](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.019)
- Yoon, H., Matteini, P. & Hwang, B. (2022).** Review on three-dimensional ceramic filler networking composites for thermal conductive applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 576, 121272. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2021.121272](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121272)
- Zandinejad, A.A., Atai, M. & Pahlevan, A. (2006).** The effect of ceramic and porous fillers on the mechanical properties of experimental dental composites. *Dental Materials*, 22(4), 382-387. DOI: [10.1016/j.dental.2005.04.027](https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.04.027)
- Zhang, Y., Heo, Y.J., Son, Y.R., In, I., An, K.H., Kim, B.J. & Park, S.J. (2019).** Recent advanced thermal interfacial materials: A review of conducting mechanisms and parameters of carbon materials. *Carbon*, 142, 445-460. DOI: [10.1016/j.carbon.2018.10.077](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.10.077)