



Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi (Review Article)

Makale Doi: 10.17100/nevbiltek.1178348

Geliş Tarihi: 21-09-2022

Kabul Tarihi: 23-11-2022



Zeolitlerin Özellikleri ve Doku Mühendisliği Uygulamaları¹

Fatma Zehra Koçak^{1*}, Nilüfer Küçükdeveci², Esmâ Daldiken³

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, TÜRKİYE
ORCID ID: 0000-0001-6397-322X

² Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, TÜRKİYE
ORCID ID: 0000-0002-4579-9915

³ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı, Nevşehir, TÜRKİYE

Öz

Zeolitler, volkanik aktiviteler sonucu yeryüzünde doğal olarak oluşan ve sentetik olarak da yüzlerce çeşitte üretilen zengin element içerikli alüminasilikat mineralleridir. Zeolitler ayırt edilebilir homojen poroz yapıya sahip, yüksek yüzey alanlı iyonik bileşiklerdir. Bu kimyasal ve mikroyapısal özellikler zeolitlere yüksek adsorpsiyon ve absorpsiyon kapasitesi, iyon-değişimi, moleküler seçicilik gibi etkinlikler sağlar. Bu çok yönlü üstün özellikler de zeolitlerin tarım ve hayvancılık sektörlerinden, enerji, teknoloji ve biyomedikal sektörlerine kadar çok geniş bir yelpazede etkin olarak araştırılıp kullanılmasının önünü açmıştır. Bu çalışmada zeolitlerin temel özellikleri, uygulama alanları ve spesifik olarak biyomedikal ve doku mühendisliğinde zeolitlerin önemi, güncel, potansiyel uygulama alanları araştırılarak öz bir şekilde ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminosilikat; biyomedikal; doku mühendisliği; zeolit

The Properties of Zeolites and Tissue Engineering Applications

Abstract

Zeolites are aluminosilicate minerals with rich element content which form on the earth due to volcanic activities, and can also be produced synthetically at hundreds of types. Zeolites are ionic compounds with high surface area having a well-defined porous structure. This chemical and microstructural properties provide efficiencies of high adsorption and absorption, ion-exchange and molecular selectiveness capacities etc. This versatile properties have paved the way of investigation and utilisations of zeolites in a wide range from agriculture and farming to the energy, technology, and

¹ Bu çalışma '5. International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology (IMSMATEC'22)' kapsamında bildiri olarak sunulmuştur.

* Sorumlu yazar e-mail: fzkocak@nevsehir.edu.tr

biomedical sectors. In this study, the fundamental properties of zeolites, applications and specifically the status of zeolites and current potential applications at biomedical and tissue engineering fields have been dealt with concisely.

Keywords: Aluminosilicate; biomedical; tissue engineering; zeolite

1. Giriş

Zeolitler, alüminyum ve silisyum temelli oksit iyonlarının üç boyutlu, tetrahedral kristalin dizilimiyle oluşan gözenekli yapıya sahip minerallerdir. Türkiye’de yeteri kadar doğal rezervinin bulunması da zeolitlerin ülkemizdeki araştırma ve çalışmalarda kullanılmasının önünü açmaktadır. Eşsiz mikroyapıları ile zeolitler iyon değişimi, adsorbsiyon ve moleküler seçicilik kapasitesi gibi özellikleri sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Zeolitlerin kullanım alanının tarımsal, teknolojik, çevre mühendisliği, doku mühendisliği ve tıp gibi geniş bir alanı kapsamaması nedeniyle zeolitler bilimsel araştırma ve uygulamalarda artarak yerini almaktadır [1,2].

2. Zeolitlerin Yapısal ve Kimyasal Özellikleri

Zeolitler toprak alkali iyonları içeren sulu alüminosilikat mineralleridir. Zeolitler, alüminyum merkez atomlarının oksijen atomları ile çevrelendiği $[SiO_4]^{4-}$ ve $[AlO_4]^{5-}$ tetrahedronlarının birbirine bağlanması ile boşluk ve kanallar içeren bir ağ yapısı oluştururlar [3]. Bileşimindeki yapı suyu, zeolitlerin oluşum sıcaklığı ve basıncını düşürürken poroz yapısına katkı sağlar. Zeolitlerin yoğunluğu, bu gözenekli yapısı nedeniyle, diğer silikat minerallerine göre daha düşüktür. Gözenekli yapısı ve yüzey alanının geniş olması, zeolitleri endüstriyel alanda oldukça önemli kılmaktadır. Gözenekli yapı, malzemeye adsorban özellik kazandırır [1].

Zeolitlerin genel kimyasal formülü $[Al_nSi_{n(4-x)}O_{n8}]^{nx-}$ şeklindedir. Kristal yapıdaki alüminyum ve silisyum katyonları yer değiştirdiğinde negatif yüklü bir ağ oluşur ve boşluklarda kafese tutunan katyonlar sayesinde toplam yük dengelenir. Bu katyon yer değiştirme özelliği sayesinde çeşitli moleküller zeolitler içerisinde adsorbe ya da absorbe edilebilmektedir. Zeolitler farklı büyüklükteki molekülleri tutma ve geçirme gibi özellikleri sayesinde ‘moleküler elekler’ olarak da adlandırılmaktadır [1].

3. Zeolitlerin Çeşitleri

Zeolitler, volkanik bölgelerde doğal olarak oluştuğu gibi sentetik olarak da üretilebilmektedir. Bilinen 40 adet doğal zeolit türünün yanı sıra, 200’ü aşkın sentetik zeolit türü olduğu rapor edilmiştir [4]. Bu sınıflar genellikle kimyasal bileşim ve morfolojik yapıları nedeniyle birbirinden ayrılırlar [5]. Zeolitler farklı morfolojilerde oluşmalarının yanı sıra klinoptilolit ve heulandit gibi eş yapıli zeolitler aynı grupta sınıflandırılırlar. Heulandit grubu mineraller genellikle tabakalı ve yassı çubuk şeklinde kristalleşirler. Mordenit türleri ince lifler, çubuklar ve iğneler şeklinde bir morfoloji sergilerler. Rombohedral yapıdaki kabazit türü ise küp şeklinde bir kristal görünüme sahiptir [6].

3.1. Doğal Zeolitler

Doğal zeolitler volkanik külün bazik göl sularıyla hidrotermal reaksiyonları sonucunda oluşmuştur. Esas volkanik kökenli olan doğal zeolitler, magmatik ve metamorfik kayalarda kristalize formlarda bulunurken, tortul kayalarda küçük çaplı taneler halinde bulunabilirler. İnsanların erişemediği okyanus dibi tortullar, zeolitler açısından zengindir ve diğer kayalarda bulunan zeolitlere göre oldukça büyük yapıdadır [7].

Doğal zeolitler; fibroz, tek bağlı-4 halka zincirli, çift bağlı-4 halka zincirli, 6 halkalı, mordenit grubu, heulandit grubu ve diğer zeolitler olmak üzere 7 ana gruba ayrılmaktadır. Mordenit grup zeolitler: ‘mordenite, dachiardite, epistilbite, ferriente, bikitaite’ olmak üzere ve heulandit grup zeolitler: ‘clinoptilolite, heulandite, stilbite, setellerite, barrenite, brewsterite’ gibi farklı türlere sahiptir [8]. Doğal zeolitlerin en fonksiyonel türleri arasında klinoptilolit, mordenit ve kabazit sayılabilir [7].

3.2. *Sentetik Zeolitler*

Sentetik zeolitler laboratuvar koşullarında doğal hammaddeler ve sentetik silikatlar kullanılarak, yüksek sıcaklık veya basınç altında hidrotermal sentezleme yöntemleri ile üretilmektedirler. Doğal zeolitlerin oluşumu birkaç bin yıl alırken sentetik zeolitlerin üretimi çok kısa sürede gerçekleştirilir. Ancak, sentez reaksiyonları uygun ekipman, temiz altlık ve enerji gerektirdiği için doğal zeolitlere göre daha pahalıdır [7]. Bilinen iki yüzü aşkın sentetik zeolit tipi mevcut iken en çok kullanılan türler arasında; zeolite Y, zeolite A, zeolite L ve ZSM-5 kodlu zeolitler sayılabilir [4,5,7].

4. **Zeolitlerin Kullanım Alanları**

Zeolitler çok yüksek iç yüzey alanına sahip mineral yapı ailesi olarak tanımlanabilir. Bazı büyük molekülleri elek gibi yakalarken, daha küçük molekülleri geçirirler. Reaksiyonlarda büyük bir yüzey alanı sağlarlar. Zeolitler katyon/iyon değiş tokuşu sağlarlar, moleküler seçicilik ve adsorbsiyon/desorbsiyon özelliği gösterirler, su yumuşatıcıdır, mükemmel katalizörlerdir ve ayrıca biyolojik olarak aktiflerdir [9]. Bu üstün özellikler zeolitlerin çok çeşitli uygulama alanlarında kullanımını mümkün kılmaktadır. Zeolitlerin önemli temel kullanım alanları Tablo 1’de sunulmuştur.

Zeolitler çevresel uygulamalarda, su arıtımında ağır metal iyonlarının (nikel, bakır, kadmiyum, çinko, kurşun ve civa gibi) ve amonyak gibi organik bileşenlerin uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır. Zeolitler modifiye edilerek adsorban aktivitesi daha da güçlendirilebilmektedir [10]. Ayrıca, zeolitler nükleer atıklardaki iyonların, petrolü içeriklerin ve çöplerin ayrıştırılması gibi diğer çevresel uygulamalarda da kullanılmaktadır [2].

Zeolitler elektrokimyasal, optik ve kalorimetrik gaz sensörlerinde kullanıldığında algılama ve seçiciliği arttırmaktadır. Geniş yüzey alanı sayesinde gözenekler içerisinde adsorpsiyon kapasitesi, madde iletimi ve optik özelliklere etki ederek sensörlerde iletimi sağlamaktadır. Nano-boyutlu zeolit kristaller ve membranlar, mini tip üstün performanslı gaz sensörleri geliştirilmesinin önünü açmıştır [5]. Enerji sektöründe, doğal gaz ve kömürün saflaştırılmasında gazların uzaklaştırılmasında, solar sistemlerde ısı dönüştürücü olarak ve petrol-bazlı ürünlerin sentezinde katalizör olarak kullanılmaktadır [2].

Tarımsal ve hayvansal faaliyetlerde gübre ve ilaçların kontrollü salınımı için ve hayvan yemlerinde besleyici katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [2]. Ayrıca, biyoyumlu klinoptilolit zeolitler insanlarda bağışıklık sistemini destekleyici mineral takviyesi ve zehirli toksinleri giderici gıda takviyesi olarak da kullanılmaktadır [2,17].

Tablo 1. Zeolitlerin Temel Kullanım Alanları

Genel Uygulamalar	Özel Uygulamalar	Zeolit Türü	Açıklama	Referanslar
			Ağır metal ve amonyak Uzaklaştırma	[10][11]
	Su arıtımı		Su arıtıcı membran kompozitler (nano zeolit katkılı polisülfon membranlar)	[12]
			Endüstriyel sıvı atıklar, organik atıklar ve nükleer atıkların ayrıştırılması	[2,13]
Çevresel Uygulamalar	Atıkların ayrıştırılması	Doğal zeolitler (klinoptilolit ve kabazit gibi)	Doğal gaz ve kömürün saflaştırılması	
	Katalizör	NaX zeolitler	Gazların ayrıştırılması	[14]
		ZSM-5 Zeolit-Y		
	zeolitler	Brønsted asidik	İçten yanmalı motorlarda Foto-katalizör	[13]
	H-USY)	(H-ZSM-5 (MFI) ve	Petrokimya endüstrisinde hidrokarbon bileşiklerinin yakıtta dönüştürülmesi	
	Yakıt hücreleri	Zeolit H-beta	Biyoküklelerden yakıt dönüşümü	[14]
	(MOR)	Zeolit Silikalit-1	Laktik asit dönüşümü	
	Enerji depolama	Cu/Fe- zeolit mordenit	Hidrojen üretiminde nano-katalizör	[14]
	SAPO-34,	Zeolit- X, Y, A,	Metan sıvı yakıtlarda metanol dönüşümü	
Enerji Uygulamaları	Gaz sensörleri	AIPO-34 SnO ₂ /ZSM-5	Su adsorpsiyonu ile enerji depolama	[15]
			Yarıiletken gaz sensörlerinde seçiciliği artırma (formaldehit vb.)	
			Kemik kaybını önleyici takviye Kemik yenilenmesi için teşvik edici ajan Antioksidan ve ağır metal tutucu Titanyum ve çelik gibi kemik implant kaplamalarında osteoentegrasyon sağlama, kemik ile elastik modül uyumsuzluğunu giderme gibi biyoyumluluk özelliklerini ve korozyon direncini artırıcı	[16,17]
		Doğal mordenit Sodyum zeolit A	Kemik implantı ve diş dolgu malzemesi olarak	[18,19]
		Zeolit MFI (ZSM-5)	Yara ve yanık örtü malzemelerinde (jelatin ve hyaluronik asit ile kompozit olarak). Fibroblast hücre büyümesini teşvik edici poroziteye ve oksijen teminine katkı sağlayıcı	[3,20] [20,21]
		Faujasite	Antibakteriyel ve antioksidan özellikli diş kökü hasarlarını onarmak için gümüş iyon değişimli zeolit	[20]
Biyolojik Uygulamalar	Mineral ve gıda takviyesi		İlaç salınım sistemleri	
	Doku mühendisliği	Na A ve Zn A Zeolitler	Hemostatik ajan, biyosensör, tıbbi teşhis/görüntüleme	[22] [20]

4.1. Zeolitlerin Biyomedikal ve Doku Mühendisliği Uygulamaları

Poroz ve hidrofilik yapısı, iyon değişimi, moleküler adsorpsiyon kapasitesi gibi özelliklerin yanı sıra, yapılan araştırmalar, zeolitlerin çoğunlukla biyoyumlu olduğunu ve anti-bakteriyel/mikrobiyal, antioksidan, antiadjuvant gibi üstün özellikler sergilediklerini göstermektedir [3]. Zeolitlerin uzun süreli kimyasal ve biyolojik kararlılığa sahip olmaları, tersinir olarak küçük molekülleri bağlayabilmeleri ve immünodülatör aktiviteye sahip olmaları sayesinde biyomedikal uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Zeolitler arasında erionit, offretite and skolecite gibi fibroz kristalin formlardaki

birkaç türünün sitotoksik özellikler sergileyebildiği bildirilmiştir [4]. Fakat yapılan araştırmalarda zeolitlerin diğer çoğu türünün biyoyumlu olduğu ve hücre büyümesini teşvik ettiği bildirilmiştir. Bu çalışmalar arasında, zeolitlerin yenileyici tıp uygulamalarında kompozit skafold (doku iskelesi) malzeme bileşimlerinde kullanıldığında incelenen fibroblast, osteoblast kondrosit, atar damar kas hücreleri gibi pek çok hücre türü ile oldukça biyoyumlu özellikler göstererek, hücre çoğalması ve doku yenilenmesinde önemli potansiyel katkılar sağladığı görülmüştür [4,21,23–25]. Ayrıca, klinoptilolit gibi biyoyumlu bir zeolit türünün kanser tedavisinde adjuvant olarak kullanımı bildirilmektedir [26]. Doku mühendisliği alanında zeolitler kemik implantı ve diş dolgu malzemesi olarak [27], yara ve yanık örtü malzemelerinde [28], antibakteriyel implantlar ve kaplamalarda [19,29] ilaç salınım sistemlerinde [30], hemostatik ajan ve tıbbi teşhis/görüntüleme ajanı olarak çeşitli alanlarda aktif olarak araştırılmakta ve kullanılmaktadır [3].

Uygun mekanik mukavemete, homojen gözenek yapısıyla geniş yüzey alanına sahip zeolitlerin kemikler ve diş dokularının onarımı ve yenilenmesinde implant ve skafold malzemesi olarak kullanım potansiyeli oldukça yüksektir. Zeolit kristallerinin üç-boyutlu mikroyapıları, gözenekli yapısı ve özel topografyası, kemik hücresi, osteoblastların bağlanması, çoğalması ve farklılaşması için oldukça uygun bir yapıdır [31]. Bedi, (2012) ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada paslanmaz çelik ve titanyum alaşımı üzerine yeni bir kompozit, zeolit-hidroksiapatit kaplaması gerçekleştirilmiştir. Kompozit kaplama süper hidrofilik özellik göstererek, kaplama ile kemik arasındaki elastik modülü uyumsuzluğunu gidermiştir. Bu durumun ameliyat sonrası kemik iyileşmesini hızlandırması öngörülmektedir [19].

Ninan ve arkadaşları (2013) bakır ile aktifleştirilmiş faujasite türü zeoliti jelatin bazlı skafoldlar içerisinde entegre ederek liyofilizasyon yöntemiyle oldukça poroz ve geniş gözenek dağılımına sahip bir yapıda üretmiştir. Zeolit ilavesi, matrisi yapısal ve mekanik açıdan güçlendirerek kompozitin doku mühendisliği uygulamaları için optimizasyonunu sağlamıştır [32]. Bu araştırmacıların takip eden diğer çalışmalarında, hyaluronik asitin de ilave edildiği jelatin-faujasite skafoldları yara iyileşmesi için *iv-vitro* ve *in-vivo* testler ile karakterize edilmiştir. Kompozit skafoldların fibroblast hücrelerine karşı yüksek biyoyumluluk sergiledikleri ve kontrollü absorpsiyon ve bozunma kapasiteleri sayesinde doku büyümesini teşvik ettiği bildirilmiştir. Ayrıca fareler üzerinde gerçekleştirilen *in-vivo* testlerde kompozitlerin yumuşak doku büyümesini ve kolajen üretimini sağlayarak yara iyileşmesini teşvik ettiği görülmüştür [21].

Yapısındaki silikat içeriği nedeniyle zeolitler, yapay vücut sıvısına daldırıldığında apatit tabakası üretme kapasitesi nedeniyle biyoaktif özellik göstererek implant ve insan kemiği arasındaki bağın indüklenmesinde önemli bir etkinlik göstermektedirler [27]. Zeolitlerin hidrofilik ve gözenekli yapılarında Na, K ve Ca gibi mineral elementleri içermeleri gibi biyomimetik özellikleri de skafold ile doku arasında etkin bir bağ oluşumunu destekler [20]. A ve X tipi zeolitler, metakrilik reçinesi temelli diş dolgu maddesi olarak UV etkisi ile çapraz bağlanabilen ve çeşitli yüzey aktif ajanlar varlığı sayesinde mezoporoz bir yapıda üretilmiştir. Çürük ya da yaralanma sonucu dişlerin dentin ve diş minesini tabakasında meydana gelebilecek hasarların onarımında kullanılacak bu kompozit malzemeler iyon değişimi özelliği sayesinde kalsiyum ve fosfat iyon salınımı ile apatit oluşumunu teşvik edip yeniden mineralleşmeyi güçlendirmiştir [33].

Zeolitler kırık doku yenilenmesi çalışmalarında da araştırılmıştır. Bir çalışmada, elektrospining yöntemiyle üretilen PVA ve kolajen matrisli fiber kompozitler içerisine nano-boyutlu silikat ve zeolit bileşikleri eklenmesinin kondrosit, kırık doku hücrelerinin çoğalmasını arttırdığı görülmüştür [24].

Zeolitler yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip mikro-gözenekli yapısı sayesinde antibakteriyel ajanları etkili bir şekilde adsorbe ederek depolayabilmekte ve bu ajanların kontrollü salınımını gerçekleştirmektedir [29]. Antibakteriyel çalışmalarda gümüş [34], bakır [35] ve çinko [36] gibi inorganik metal iyonları zeolitler içerisine katkı olarak ilave edildiğinde malzemelerin antibakteriyel özelliklerini güçlendirildiği görülmüştür [37]. İyon değişimi ile gümüş iyonları zeolitler içerisine adsorbe edildiğinde gümüşün kontrollü salınımı sayesinde uzun süreli antibakteriyel etki başarılmıştır.

Gümüş iyonu Ag^0 veya Ag^+ içeren ultra küçük EMT-tip nano-zeolitin suda dağıtılmış formlarına maruz kalan E-koli hücrelerini tamamen yok ettiği bildirilmiştir [29].

Zeolitler, absorpsiyon/desorpsiyon ve iyon-değişimi özellikleri ile tek başlarına ya da polimerler ile birleştirilerek kompozit ve ya hidrojel gibi formlarda kontrollü ilaç salınım sistemlerinde kullanım için de oldukça elverişlidir [38]. Pavelić v.d., (2000), klinoptilolit türü zeolitin kanser tedavisinde adjuvant olarak kullanımını araştırmıştır. *In-vitro* testlerde, klinoptilolit kullanımının pek çok kanserli hücreye karşı tümör önleyici protein oluşumunu desteklediği görülmüştür. *In-vivo* çalışmalarda ise, köpeklerde ve farelerde deri kanserinde tümör oluşumunu ve büyümesini azalttığı görülmüştür [26]. Zeolitler, ibuprofen ve diklofenak gibi anti-inflamatör ilaçların, anti-diyareik ve doksorubisin gibi kemoterapi ilaçların salınımının yansira hücrelere DNA salınımında da kullanılmaktadır [31,38].

Zeolitler, kanser gibi çeşitli hastalıkların teşhisinde biyobelirteçleri algılayan biyosensör uygulamalarında da kullanılmaktadır. Enzimlerin içerisine enkapsüle edildiği klinoptilolit ve β -zeolit türleri pH-duyarlı potansiyometrik transistörler ile kombine edilen biyosensörler geliştirilmiştir. Buna ilaveten, klinik olarak büyük öneme sahip olan üre tespitinde, amonyum seçiciliğine sahip transistörlerde üreaz enzimini bağlayan klinoptilolit içeren polimer kompozit membranların biyosensör olarak kullanımı bildirilmiştir [3].

5. Sonuçlar

Poroz ve iyonik yapıda inorganik mineraller olup, mekanik ve biyolojik kararlılığa sahip olan zeolitler çeşitli endüstriyel ve bilimsel alanlarda yapılan araştırma ve çalışma faaliyetlerinde oldukça ilgi çeken malzemelerdir. Üstün adsorpsiyon ve moleküler seçicilik kapasitesi sayesinde zeolitler, ayırma, saflaştırma, katalizör ve sensör gibi teknolojik uygulamalarda önemli etkinliğe sahiptirler. Ayrıca, biyouyumlu ve biyoaktif olmaları nedeniyle, zeolitler biyomedikal uygulamalarda ilaç salınımı, teşhis, görüntüleme, biyosensör gibi uygulamaların yanı sıra doku mühendisliğinde özellikle kemik yenilenmesi ve tedavisinde kullanım için oldukça yüksek potansiyele sahip malzemelerdir.

6. Teşekkür ve Katkı Beyanı

Bu çalışma, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından desteklenen 'KBP22F01' nolu proje* kapsamında gerçekleştirilmiştir. F.Z.K.; çalışmanın dizaynı, literatür araştırması, makale yazımı ve makale son formatının oluşturulması. N.K.; literatür araştırması ve makale yazımı. E.D.; literatür araştırması ve makale yazımı.

7. Kaynaklar

- [1]. Sahin, M.B. "Zeolitler". *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekon. Bülteni*, 17, 53–60, 2014
- [2]. Gülen, J.; Zorbay, F.; Arslan, S. "Zeolitler ve Kullanım Alanları". *Karaelmas Sci. Eng. J.* 2, 63–68, 2012
- [3]. Serati-Nouri, H.; Jafari, A.; Roshangar, L.; Dadashpour, M.; Pilehvar-Soltanahmadi, Y.; Zarghami, N. "Biomedical Applications of Zeolite-Based Materials: A Review". *Mater. Sci. Eng. C*, 116, 111225, 2020
- [4]. Bacakova, L.; Vandrovцова, M.; Kopova, I.; Jirka, I. "Applications of Zeolites in Biotechnology and Medicine- a Review". *Biomater. Sci.*, 6, 974–989, 2018
- [5]. Zheng, Y.; Li, X.; Dutta, P.K. "Exploitation of Unique Properties of Zeolites in the Development of Gas Sensors". *Sensors*, 12, 5170–5194, 2012
- [6]. Moshoeshoe, M.; Nadiye-Tabbiruka, M.S.; Obuseng, V. "A Review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites". *Am. J. Mater. Sci.*, 7, 196–221, 2017
- [7]. Krol, M. "Natural vs. Synthetic Zeolites". *Crystals*, 10, 1–8, 2020.
- [8]. Hardi, G.W.; Maras, M.A.J.; Riva, Y.R.; Rahman, S.F. "A Review of Natural Zeolites and Their Applications: Environmental and Industrial Perspectives". *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 15, 730–734, 2020.
- [9]. Sobuś, N.; Czekaj, I.; Diichuk, V.; Kobasa, I.M. "Characteristics of the Structure of Natural Zeolites and Their Potential Application in Catalysis and Adsorption Processes". *Tech. Trans.*, 1–20, 2020

- [10]. Wang, S.; Peng, Y. "Natural Zeolites as Effective Adsorbents in Water and Wastewater Treatment". *Chem. Eng. J.*, 156, 11–24, 2010
- [11]. Sprynskyy, M.; Buszewski, B.; Terzyk, A.P.; Namieśnik, J. "Study of the Selection Mechanism of Heavy Metal (Pb²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, and Cd²⁺) Adsorption on Clinoptilolite". *J. Colloid Interface Sci.*, 304, 21–28, 2006
- [12]. Yurekli, Y.; Yildirim, M.; Aydın, L.; Savran, M. "Filtration and Removal Performances of Membrane Adsorbers". *J. Hazard. Mater.*, 332, 33–41, 2017
- [13]. Rhodes, C.J. "Properties and Applications of Zeolites". *Sci. Prog.* 2010, 93, 223–284,
- [14]. Li, Y.; Li, L.; Yu, J. "Applications of Zeolites in Sustainable Chemistry". *Chem*, 3, 928–949, 2017
- [15]. Sun, Y.; Wang, J.; Du, H.; Li, X.; Wang, C.; Hou, T. "Formaldehyde Gas Sensors Based on SnO₂/ZSM-5 Zeolite Composite Nanofibers". *J. Alloys Compd.*, 868, 159140, 2021
- [16]. Banu, J.; Varela, E.; Guerra, J.M.; Halade, G.; Williams, P.J.; Bahadur, A.N.; Hanaoka, K.; Fernandes, G. Dietary "Coral Calcium and Zeolite Protects Bone in a Mouse Model for Postmenopausal Bone Loss". *Nutr. Res.*, 32, 965–975, 2012
- [17]. Ivkovic, S.; Deutsch, U.; Silberbach, A.; Walraph, E.; Mannel, M. "Dietary Supplementation With the Tribomechanically Activated Zeolite Clinoptilolite in Immunodeficiency : Effects". *Adv. Nat. Ther.*, 21, 135–148, 2004.
- [18]. Bedi, R.S.; Beving, D.E.; Zanello, L.P.; Yan, Y. "Biocompatibility of Corrosion-Resistant Zeolite Coatings for Titanium Alloy Biomedical Implants". *Acta Biomater.*, 5, 3265–3271, 2009
- [19]. Bedi, R.S.; Chow, G.; Wang, J.; Zanello, L.; Yan, Y.S. "Bioactive Materials for Regenerative Medicine: Zeolite-Hydroxyapatite Bone Mimetic Coatings". *Adv. Eng. Mater.*, 14, 200–206, 2012
- [20]. Zarrintaj, P.; Mahmodi, G.; Manouchehri, S.; Mashhadzadeh, A.H.; Khodadadi, M.; Servatan, M.; Ganjali, M.R.; Azambre, B.; Kim, S.J.; Ramsey, J.D.; et al. "Zeolite in Tissue Engineering: Opportunities and Challenges". *MedComm*, 1, 5–34, 2020
- [21]. Ninan, N.; Muthiah, M.; Park, I.K.; Elain, A.; Wong, T.W.; Thomas, S.; Grohens, Y. "Faujasites Incorporated Tissue Engineering Scaffolds for Wound Healing: In Vitro and in Vivo Analysis". *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5, 11194–11206, 2013
- [22]. Kocaaga, B.; Kurkuoglu, O.; Tatlier, M.; Batirel, S.; Guner, F.S. "Low-Methoxyl Pectin–Zeolite Hydrogels Controlling Drug Release Promote in Vitro Wound Healing". *J. Appl. Polym. Sci.*, 136, 1–16, 2019
- [23]. Iqbal, N.; Abdul Kadir, M.R.; Mahmood, N.H. Bin; Yusoff, M.F.M.; Siddique, J.A.; Salim, N.; Froemming, G.R.A.; Sarian, M.N.; Balaji Raghavendran, H.R.; Kamarul, T. "Microwave Synthesis, Characterization, Bioactivity and in Vitro Biocompatibility of Zeolite-Hydroxyapatite (Zeo-HA) Composite for Bone Tissue Engineering Applications". *Ceram. Int.*, 40, 16091–16097, 2014
- [24]. Mehra, M.; Anarkoli, A.O.; Rafienia, M.; Ghasemi, N.; Davary, N.; Bonakdar, S.; Naeimi, M.; Agheb, M.; Salamat, M.R. "Incorporation of Zeolite and Silica Nanoparticles into Electrospun PVA/Collagen Nanofibrous Scaffolds: The Influence on the Physical, Chemical Properties and Cell Behavior". *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, 65, 457–465, 2016
- [25]. Seifu, D.G.; Isimjan, T.T.; Mequanint, K. "Tissue Engineering Scaffolds Containing Embedded Fluorinated-Zeolite Oxygen Vectors". *Acta Biomater.*, 7, 3670–3678, 2011
- [26]. Pavelić, K.; Hadžija, M.; Bedrica, L.; Pavelić, J.; Crossed D signikić, I.; Katić, M.; Kralj, M.; Bosnar, M.H.; Kapitanović, S.; Poljak-Blaži, M.; et al. "Natural Zeolite Clinoptilolite: New Adjuvant in Anticancer Therapy". *J. Mol. Med.*, 78, 708–720, 2000

- [27]. Iqbal, N.; Abdul Kadir, M.R.; Iqbal, S.; Razak, S.I.A.; Shahid Rafique, M.; Bakhsheshi-Rad, H.R.; Hasbullah Idris, M.; Khattak, M.A.; Raghavendran, H.R.B.; Abbas, A.A. "Nano-Hydroxyapatite Reinforced Zeolite ZSM Composites: A Comprehensive Study on the Structural and in Vitro Biological Properties". *Ceram. Int.*, *42*, 7175–7182, 2016
- [28]. Barbosa, G.P.; Debone, H.S.; Severino, P.; Souto, E.B.; Da Silva, C.F. "Design and Characterization of Chitosan/Zeolite Composite Films - Effect of Zeolite Type and Zeolite Dose on the Film Properties". *Mater. Sci. Eng. C*, *60*, 246–254, 2016
- [29]. Dong, B.; Belkhair, S.; Zaarour, M.; Fisher, L.; Verran, J.; Tosheva, L.; Retoux, R.; Gilson, J.P.; Mintova, S. "Silver Confined within Zeolite EMT Nanoparticles: Preparation and Antibacterial Properties". *Nanoscale*, *6*, 10859–10864, 2014
- [30]. Zhang, Y.; Yan, W.; Sun, Z.; Pan, C.; Mi, X.; Zhao, G.; Gao, J. "Fabrication of Porous Zeolite/Chitosan Monoliths and Their Applications for Drug Release and Metal Ions Adsorption". *Carbohydr. Polym.*, *117*, 657–665, 2015
- [31]. Derakhshankhah, H.; Jafari, S.; Sarvari, S.; Barzegari, E.; Moakedi, F.; Ghorbani, M.; Varnamkhasti, B.S.; Jaymand, M.; Izadi, Z.; Tayebi, L. "Biomedical Applications of Zeolitic Nanoparticles, with an Emphasis on Medical Interventions". *Int. J. Nanomedicine*, *15*, 363–386,
- [32]. Ninan, N.; Grohens, Y.; Elain, A.; Kalarikkal, N.; Thomas, S. "Synthesis and Characterisation of Gelatin/Zeolite Porous Scaffold". *Eur. Polym. J.*, *49*, 2433–2445, 2013
- [33]. Sandomierski, M.; Buchwald, Z.; Koczorowski, W.; Voelkel, A. "Calcium Forms of Zeolites A and X as Fillers in Dental Restorative Materials with Remineralizing Potential". *Microporous Mesoporous Mater.*, *294*, 109899, 2020
- [34]. Sánchez, M.J.; Mauricio, J.E.; Paredes, A.R.; Gamero, P.; Cortés, D. "Antimicrobial Properties of ZSM-5 Type Zeolite Functionalized with Silver". *Mater. Lett.*, *191*, 65–68, 2017
- [35]. Alswat, A.A.; Ahmad, M. Bin; Hussein, M.Z.; Ibrahim, N.A.; Saleh, T.A. "Copper Oxide Nanoparticles-Loaded Zeolite and Its Characteristics and Antibacterial Activities". *J. Mater. Sci. Technol.*, *33*, 889–896, 2017
- [36]. Fox, S.; Wilkinson, T.S.; Wheatley, P.S.; Xiao, B.; Morris, R.E.; Sutherland, A.; Simpson, A.J.; Barlow, P.G.; Butler, A.R.; Megson, I.L.; et al. "NO-Loaded Zn²⁺-Exchanged Zeolite Materials: A Potential Bifunctional Anti-Bacterial Strategy". *Acta Biomater.*, *6*, 1515–1521, 2010
- [37]. Top, A.; Ülkü, S. "Silver, Zinc, and Copper Exchange in a Na-Clinoptilolite and Resulting Effect on Antibacterial Activity". *Appl. Clay Sci.*, *27*, 13–19, 2004
- [38]. Servatan, M.; Zarrintaj, P.; Mahmodi, G.; Kim, S.J.; Ganjali, M.R.; Saeb, M.R.; Mozafari, M. "Zeolites in Drug Delivery: Progress, Challenges and Opportunities". *Drug Discov. Today*, *25*, 642–656, 2020