

Stronsiyum gideriminde sentetik inorganik iyon değiştiricilerin kullanımı

Use of synthetic inorganic ion exchangers in strontium removal

Süleyman İNAN*^{1,a}

¹ Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, 35100, Bornova-İzmir

• Geliř tarihi / Received: 19.10.2021

• Düzeltilerek geliř tarihi / Received in revised form: 12.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 19.04.2022

Öz

Stronsiyum-90, nükleer reaktörlerin işletilmesi sırasında oluşan stronsiyumun en tehlikeli radyoaktif izotopudur. Nükleer kazalardan ve nükleer silah testlerinden kaynaklanan serpinti nedeniyle de çevreye yayılabilir. Tehlikeli radyonüklidlerin uzaklaştırılması ve radyoaktif atıkların güvenli yönetimi hayati bir zorunluluktur. İyon değişimi, sıvı radyoaktif atıkların yönetiminde en çok kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. İnorganik iyon değiştiriciler termal, kimyasal ve radyasyon direnci ile öne çıkar. Belirli katyonlar için seçicilik gösterirler. Bu derleme, ⁹⁰Sr'nin zeolitler, titanatlar, titanosilikatlar, diğer asit tuzları, hidrate oksitler ve metal sülfürler gibi sentetik inorganik iyon değiştiriciler ile uzaklaştırılmasına odaklanmıştır. Genel olarak, 100'den fazla yayın gözden geçirilmiş ve inorganik iyon değiştiriciler kullanılarak stronsiyum giderimi hakkında ayrıntılı veriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: İnorganik iyon değiştiriciler, Radyoaktif atık, Seçicilik, Sorpsiyon, Stronsiyum

Abstract

Strontium-90 is the most dangerous radioactive isotope of strontium, which is formed during the operation of nuclear reactors. It can also spread to the environment due to fallout from nuclear accidents and nuclear weapons tests. Removal of hazardous radionuclides and safe management of radioactive waste is a vital necessity. Ion exchange has been one of the most used methods in the management of liquid radioactive waste. Inorganic ion exchangers stand out for their thermal, chemical and radiation resistance. They show selectivity for certain cations. This review focused on removal of ⁹⁰Sr by synthetic inorganic ion exchangers such as zeolites, titanates, titanosilicates, other acid salts, hydrous oxides and metal sulfides. Overall, more than 100 publications are reviewed and detailed data on strontium removal using inorganic ion exchangers are presented.

Keywords: Inorganic ion exchangers, Radioactive waste, Selectivity, Sorption, Strontium

*a Süleyman İNAN; suleyman.inan@ege.edu.tr, Tel: (0232) 311 34 61, orcid.org/0000-0003-4185-0979

1. Giriş

1. Introduction

Bugün dünyada elektriğin yaklaşık %10'unu nükleer enerjiden sağlıyoruz. 393496 MWe toplam net kurulu güç ile 442 nükleer güç reaktörü faaliyettir. Mevcut kapasitenin yaklaşık %14'üne eşdeğer toplam net kurulu gücü 53760 MWe olan 51 reaktör yapım aşamasındadır (PRIS, 2021). Nükleer reaktörler 2019 yılında 2657.16 TWh elektrik sağlarken, 2020 yılında bu değer 2553.21 TWh'a düşmüştür (PRIS, 2021). Yakın gelecekte, yüksek karbondioksit emisyonu nedeniyle fosil yakıtlı santrallerin devreden çıkarılması gündemdedir. Ancak gelişen teknolojiye bağlı olarak dünya genelinde enerjiye olan talep sürekli artmaktadır. Nükleer santraller artan enerji talebinin baz yük kaynağı olarak sürekli enerji üretimi ile karşılanmasında kilit rol oynamaktadır. Bununla birlikte, güvenlik, atık yönetimi ve kamuoyu kabulü ile ilgili konularda geliştirmeler ve iyileştirmeler devam etmektedir.

Fisyon reaksiyonunda, uranyum-235, kütleinin yaklaşık yarısı oranında iki çekirdeğe bölünür. Bir fisyon ürünü olan stronsiyum-90 (⁹⁰Sr), yaklaşık %6 verimle oluşmaktadır. ⁹⁰Sr, kullanılmış nükleer yakıtın ve yakıtın yeniden işlenmesi sonucu ortaya çıkan yüksek seviyeli radyoaktif atıkların önemli bir bileşenidir. Nükleer silah testleri ve Fukushima gibi nükleer kazalar sonucunda da çevreye yayılmıştır.

Kullanılmış nükleer yakıt, plütonyum ve fakirleşmiş uranyumun geri kazanılması için yeniden işlenir. Yeniden işlemeyen kaynaklanan sıvı atıklar, sıvı fazın durumu, aktinit içeriği, fisyon ürünleri ve radyoaktivite açısından farklılıklar içerir (Taylor, 2015). ¹³⁷Cs ($t_{1/2} = 30.17$ y), ⁹⁰Sr ($t_{1/2} = 28.80$ y), ¹⁰⁶Ru ($t_{1/2} = 373.5$ gün) ve ⁸⁸Zr ($t_{1/2} = 83.4$ gün), yeniden işlemeyen kaynaklı atıklarda bulunan uzun ömürlü fisyon ürünleridir (Taylor, 2015; Baisden & Atkins-Duffi, 2011).

Öte yandan, nükleer santrallerin işletme, onarım ve bertaraf faaliyetleri sonucunda sıvı radyoaktif atık (SRA) oluşmaktadır. SRA, kimyasal ve radyokimyasal bileşim açısından farklılık gösterir. Kısa ömürlü radyonüklidler bozunur ve radyokimyasal bileşim zamanla önemli ölçüde değişir. Aktiviteye bağlı olarak, SRA yüksek aktif (10 Ci/L'den yüksek), orta aktif (10 ila 10⁻² Ci/L), düşük aktif (10⁻² ila 10⁻⁵ Ci/L) ve çok düşük aktif (10⁻⁶ ila 10⁻⁹ Ci/L) olarak sınıflandırılır. Aktivite 10⁻⁹ Ci/L'den az ise, SRA kabul edilen derişim limitlerinin altında seyreltilir ve deşarj edilir (Marinin & Brown, 2000).

Yüksek düzey SRA'da bulunan ⁹⁰Sr, nispeten uzun radyoaktif yarılanma ömrü (29 yıl) nedeniyle en

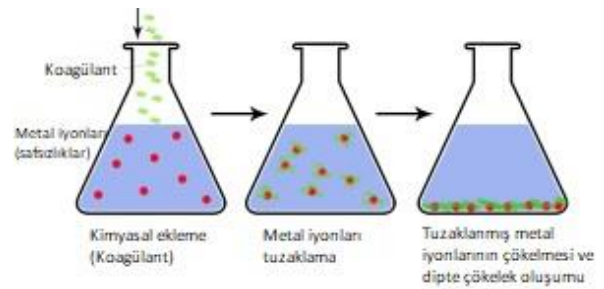
tehlikeli fisyon ürünlerinden biridir. Stronsiyum kalsiyuma benzer şekilde davranarak kemik yüzeylerinde ve kemik iliğinde birikme eğilimindedir. Stronsiyum vücuda yeme, içme veya solunum yoluyla alınabilir. (U.S. EPA, 2021). Dünya çapındaki bazı düzenleyici kurumlar için içme suyunda kabul edilebilir maksimum ⁹⁰Sr derişim seviyeleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. İçme suyunda kabul edilen maksimum ⁹⁰Sr seviyeleri

Table 1. Maximum acceptable levels of ⁹⁰Sr in drinking water

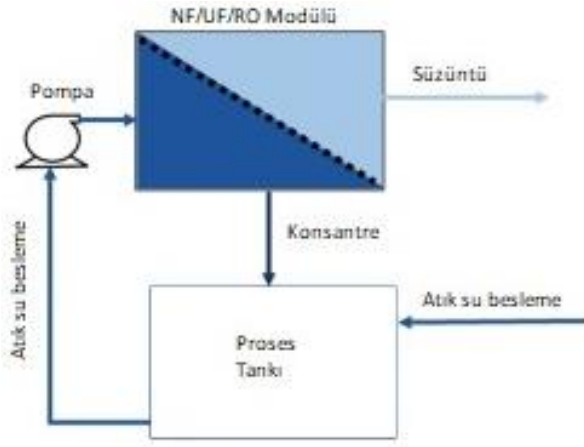
Kuruluş	Değer (Bq/L)
U.S. EPA	0.3 (U.S. EPA, 1980)
ISO/DIS 13160	10 (ISO, 2021)
WHO	10 (Radiological Aspects, 2021)

Uzun yarı ömrü ve yüksek çözünürlüğü, ana kirletici olarak radyoaktif stronsiyumun atıklardan uzaklaştırılmasını zorunlu kılar (Zhang vd., 2015a). Stronsiyumun SRA çözeltilerinden uzaklaştırılmasında koagülasyon (Rahman vd., 2011), buharlaştırma (Yang vd., 2017), membran prosesleri (Jia vd., 2017; Ambashta & Sillanpää, 2012; Luo & Wang, 2014), kimyasal çöktürme (Luo & Wang, 2014; Luo vd., 2013) solvent ekstraksiyonu (Xu vd., 2012; Kumar vd., 2011) adsorpsiyon ve iyon değişimi (Pavel & Popa, 2012; Fang vd., 2017; Krishna vd., 2004; Solbra vd., 2001; Awwal vd., 2014) gibi teknikler kullanılmaktadır. Kimyasal çöktürme tekniğine ilişkin açıklayıcı şema Şekil 1'de görülmektedir. Bu yöntemde temel olarak, koagülant atık suya eklenir ve metal iyonları tuzaklaması için karıştırma işlemi uygulanır. Tuzaklanan metal iyonları kabın dibine çöker. Şekil 2'de ise atık suların kirleticilerin ayrılmasında kullanılan nanofiltrasyon, ultrafiltrasyon veya ters ozmoz yöntemine dayanan membran sistemine ilişkin görsel verilmiştir.



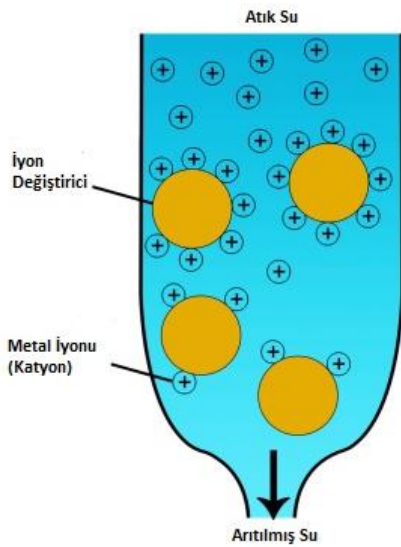
Şekil 1. Kimyasal çöktürme prosesi (Qasem vd., 2021)

Figure 1. Chemical precipitation process (Qasem vd., 2021)



Şekil 2. Atık yönetiminde kullanılan membrana dayalı arıtma sistemi (Qasem vd., 2021)
Figure 2. Membrane-based treatment system used in waste management (Qasem vd., 2021)

İyon değişim prosesleri basitliği, düşük maliyeti, yüksek kapasitesi ve seçici malzemeler nedeniyle öne çıkmaktadır. İyon değişiminin başlangıçta kil ve zeolitler gibi topraklarda gerçekleştiği keşfedilmiştir. Ticari olarak ilk temin edilebilen iyon değiştiriciler, amorf alüminosilikat jelleridir. Ancak düşük kimyasal kararlılıkları ve alternatif malzemelere duyulan ihtiyaç 1930'larda organik iyon değiştirici reçinelerin geliştirilmesinin önünü açmıştır. Bununla birlikte, 1940'larda nükleer teknolojinin kullanımının artması ile, daha iyi termal (>150°C) ve radyasyon kararlılığına sahip malzemelere duyulan gereksinim ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, araştırmacıların odak noktası inorganik iyon değiştiricilere yönelmiştir (Möller, 2002). İyon değişim prosesine ilişkin basit bir şema Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. İyon değişim süreci (Qasem vd., 2021)
Figure 3. Ion exchange process (Qasem vd., 2021)

Doğal inorganik iyon değiştiricilerin nispeten düşük seçiciliğe sahip olmaları ve kullanımlarının dar bir pH aralığında sınırlı olması gibi dezavantajları vardır. Sentetik inorganik iyon değiştiriciler kimyasal ve termal olarak kararlıdır. Ek olarak, yüksek radyasyon direnci sergilerler. Çok çeşitli metal katyonları için daha yüksek değişim kapasitesine ve seçiciliğe sahiptirler (Clearfield, 2000; Lopes vd., 2008). Sentetik inorganik iyon değiştiriciler, partikül boyutu, şekil ve gözeneklilik gibi iyi tanımlanmış kimyasal ve fiziksel özelliklerle sentezlenebilir (Figueiredo vd., 2018). Ayrıca atık immobilizasyon teknikleri ile uyumludurlar ve radyoaktif atıkların uzun süreli depolanması ve bertarafı için nihai atık formu olarak kullanılabilirler. Sentetik inorganik iyon değiştiricilerin en büyük dezavantajı, kolon kullanımına uygun olmayan ince tozlar olarak elde edilmeleridir. Bu sorun, tozların kolon işlemlerine uygun granül, pelet veya kompozit formda elde edilmesiyle çözülebilmekte aynı zamanda iyon değiştiricinin hızlı iyon değiştirme kinetiği ve seçiciliği korunmaktadır (Sylvester, 2000). Diğer yandan, sentetik malzemelerin üretim maliyetlerinin yüksek olması da bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir.

Sentetik zeolitler (Smiciklas vd., 2021; Jimenez-Reyes vd., 2021; Camacho vd., 2010; Olmez Aytas vd., 2004; Barkat vd., 2015), titanatlar (Lehto & Clearfield, 1987; Li vd., 2021; Taylor-Pashow vd., 2011; Jozdani vd., 2019; Guevar vd., 2017), titanosilikatlar (Anthony vd., 1994; Miller & Brown, 1997; Clearfield vd., 2012), fosfatlar (Mu vd., 2017; Ivanets vd., 2021; Tang vd., 2018; Korneikov & Ivanenko, 2020), silikatlar (Hamed vd., 2016; Zhuravlev, 2020), metal oksitler ve bunların karışımları (Shabana & El-Dessouky, 2002; Vanketasan vd., 2000; Mishra & Singh, 1995; Trivedi & Axe, 1999; Ahmadi vd., 2014; İnan & Altaş, 2010; Zhang vd., 2015) stronsiyum ve diğer radyonüklidlerin uzaklaştırılması için iyon değiştirici malzemeler olarak kullanılmıştır. Kristal silikotitanat (CST) (Park vd., 2010) (Honeywell Şirketi, ABD), Sr-Treat (Lehto vd., 1999) (Fortum, Finlandiya) ticari adı altında sodyum titanat ve katmanlı, yarı kristal bir bileşik olan sodyum nonatitanat ($\text{Na}_4\text{TiO}_9\text{O}_{20}$) (Lehto & Clearfield, 1987) (UOP LLC, ABD) nükleer atık yönetiminde kullanılan ticari olarak mevcut iyon değiştiricileri örnekleridir. Tüm bu iyon değiştiricilerin ortak özelliği, bazik çözeltilerde stronsiyum giderimi için gösterdikleri yüksek performanslarıdır (Vijayan vd., 2011). Bu malzemelerin yüksek tuz derişimlerinde seçiciliği halen tartışmalıdır. Son zamanlarda, Manos ve Kanatzidis (2016) asidik çözeltiler de dahil olmak üzere daha geniş bir pH

aralığında stronsiyum iyonlarını uzaklaştırmak için umut verici malzemeler olarak metal sülfür iyon değiştiricileri geliştirmiştir. Bu grup altında; $K_{2x}Mn_xSn_{3-x}S_6$ ($x = 0.5-0.95$) (KMS-1), $K_{2x}Mg_xSn_{3-x}S_6$ ($x = 0.5-1$) (KMS-2) ve $K_{2x}Sn_{4-x}S_{8-x}$ ($x = 0.65-1$) (KTS-3) gibi bir çok iyon değiştirici

hazırlanmış ve incelenmiştir. Bununla birlikte, bu materyallerle ilgili daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç olduğu açıktır. Ayrıntılara girmeden önce, çeşitli iyon değiştirici tiplerinin stronsiyum sorpsiyon performansına ilişkin veriler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Sentetik inorganik iyon değiştiricilerin stronsiyum adsorpsiyon performansı
Table 2. Strontium adsorption performance of synthetic inorganic ion exchangers

İyon değiştirici	Ka(mL/g)	Kapasite(mg/g)	Verim(%)	pH aralığı	Kaynak
Zeolit 4A			99.9	4-12	(Fang vd., 2017)
Zeolit NaA			90.6	N/A	(Levenets vd., 2016)
Zeolit NaX			91.0	N/A	(Levenets vd., 2016)
Linde-type A			99.9	N/A	(Munthali vd., 2015)
Sodyum nonatitanat	235120			14.5	(Lehto & Clearfield, 1987)
Sodyum demir titanat		233.3		13.0	(Amesh vd., 2020)
Titanat nanotüp		97.7		2-10	(Ryu vd., 2016)
ETS-10 titanosilikat		211.2		N/A	(Pavel vd., 2011)
CST	7525	642.4		8-9	(Chitra vd., 2017)
Antimon silikat	35500			1-6	(Möller vd., 2001)
Mangan antimonat (MnSb)	830000	30.2		2-9	(Zhang vd., 2016b)
Zirkonyum dioksit		30.12		4-12	(İnan & Altaş, 2010)
Ta katılmış hex-WO ₃		44.43		1-8	(Li vd., 2014)
Sb ³⁺ /Sb ₂ O ₅		25.7	99.0	2-12	(Zhang vd., 2015a)
ZrO ₂ -MnO ₂		16.95		3-6	(Ahmadi vd., 2014)
TiO ₂ -SiO ₂		54.64	84.6	4-12	(Gürboğa & Tel, 2005)
KMS-1	>100000	77		1-14	(Manos & Kanatzidis, 2016)
KMS-2	>10000	87		3-10	(Manos & Kanatzidis, 2016)
KTS-3	>100000	102		2-12	(Sarma vd., 2016)

Bu derleme, radyoaktif atıklardan stronsiyumun uzaklaştırılmasında kullanılan sentetik inorganik iyon değiştiricilerin yapısal özelliklerine ve adsorpsiyon davranışlarına odaklanmaktadır. Bu kapsamda incelenen inorganik iyon değiştiriciler arasında zeolitler, çözünmeyen asit tuzları, hidrate oksitler ve metal sülfürler yer almaktadır.

2. İnorganik iyon değiştiriciler

2. İnorganik iyon değiştiriciler

2.1. Zeolitler

2.1. Zeolites

Zeolitler, açık kafes yapısına sahip hidrate alüminosilikatlardır. Kanallarında değişebilir katyonlar ve su molekülleri içerirler. Dört yüzlü SiO₄ ve AlO₄ gruplarını yapılarında bağlayarak düzenli tüneller ve boşluklar içeren çok çeşitli

malzemeler oluşturabilirler. Üç değerlikli alüminyumdan dolayı yapının negatif yükü, katyonların bağlanmasıyla nötralize edilir. Spesifik yapıya sahip zeolitler, I A ve II A gruplarındaki katyonlara oranla stronsiyum ve sezyum için yüksek seçicilik gösterirler. Zeolitler, düşük maliyetli ve bol bulunur olmaları nedeniyle radyostronsiyum ve radyosezyum iyonları içeren nükleer atık çözeltilerinin dekontaminasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır (Sylvester, 2000).

Öte yandan, kristal yapı özelliklerini önemli ölçüde etkilediğinden, endüstriyel ölçekte doğal zeolitlerin kullanımı sınırlıdır. Örneğin, küçük kanal çapları, daha büyük moleküllerin adsorpsiyonuna izin vermez. Ayrıca, doğal zeolitlerin radyonüklidler ve ağır metal iyonları için sentetik zeolitlere göre nispeten daha düşük adsorpsiyon kapasitesi vardır. Bu dezavantajlar, istenen özelliklere sahip sentetik zeolitlerin

geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmasını gerekli kılmıştır. Günümüzde en az 100 farklı zeolit yapısı bilinmektedir ve sürekli olarak mikro gözenekli kafes yapısında yeni malzemeler sentezlenmektedir. Sentetik zeolitlerin çoğunlukla ince taneli kristalimsi ve yüksek oranda dağılmış toz formda olmaları kullanımlarını sınırlandırmaktadır (Krol, 2020).

Fang vd. (2017), Cs⁺, Sr²⁺ ve Co²⁺ iyonları dahil olmak üzere radyoaktif atık çözeltilerinin saflaştırılması için doğal zeolit ve zeolit 4A'nın performansını incelemiştir. Zeolit 4A'nın doğal zeolite kıyasla daha iyi bir Sr²⁺ adsorpsiyon performansı gösterdiğini bildirmişlerdir. Adsorpsiyon kinetiği daha hızlıdır ve adsorpsiyon verimi %90'ın üzerindedir. Mimura ve Akiba (1993) hidrotermal reaksiyon ile doğal klinoptilolit ve mordeniti yüksek derecede kristallığe sahip sentetik zeolit P'ye dönüştürmüştür. Sorpsiyon testleri, doğal zeolitlere kıyasla Sr²⁺ için zeolit P'nin adsorpsiyon hızı ve dağılım katsayısının arttığını doğrulamıştır. Yazarlar ayrıca Sr²⁺ yüklü zeolit P'nin 1000°C'nin üzerinde kalsinasyon ile kararlı seramik forma dönüştüğünü rapor etmişlerdir. Çiçek vd. (2012), zeolit 3A ve süngertaşının ⁸⁵Sr adsorpsiyon özelliklerini incelemiştir. Sorbent dozajı ve başlangıç Sr aktivitesi, yanıt yüzeyi metodolojisine göre önemli parametreler olarak tespit edilmiştir. Sorbent dozajı %0.1 w/v olduğunda maksimum dekontaminasyon faktörü 41.67 bulunmuştur. Zeolit 3A, Sr'nin

radyoaktif çözeltiden uzaklaştırılmasında süngertaşından daha etkili bulunmuştur. Abdel-Rahman vd. (2010), stronsiyum için tutucu bariyer olarak sentetik zeolit Na A-X'in kullanılmasını önermişlerdir. Stronsiyum kapasitesi 90 dakikada dengeye ulaşmış ve optimum pH 6.0 olarak tespit edilmiştir. Levenets vd. (2016) statik koşullarda stronsiyum sorpsiyonu için klinoptilolit ve sentetik zeolit sorpsiyon özelliklerinin karşılaştırılması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Sorpsiyon 168 saat sonunda dengeye ulaşmıştır. NaA ve NaX sentetik zeolitleri, sırasıyla %90.6 ve %91.0'lık Sr sorpsiyon verimine sahiptir. Klinoptilolit için ise verim %88.5'dir. Sorpsiyon verimi, stronsiyum derişimindeki artışla %20 oranında azalmıştır. Munthali vd. (2015) radyoaktif suyun dekontaminasyonu için Linde-tip A, faujasit X, faujasit Y ve mordenit kullanmıştır. Linde-tip A'nın stronsiyum için en iyi seçiciliği gösterdiği ve 0.5 M K⁺ varlığında bile adsorpsiyon veriminin %99.9'dan yüksek olduğu bildirilmiştir. Zeolit tip iyon değıştiriciler ideal olarak yalnızca sınırlı pH aralığında çalışmaktadırlar. Yüksek asidik koşullarda, zeolit yapısındaki alüminyum ve silisyum çözünme eğilimi gösterir ve iyon değışim kapasitesi azalır (Savva, 2015). Ayrıca, nispeten düşük seçicilikleri nedeniyle yüksek oranda tuz içeren sulu çözeltilerden radyonüklidlerin uzaklaştırılması için yeterli değildirler. Zeolitlerin stronsiyum adsorpsiyon davranışları Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. Zeolitlerin stronsiyum adsorpsiyon performansı
Table 3. Strontium adsorption performance of zeolites

İyon değıştirici	Kapasite veya % verim	Çalışma koşulları*	Sıvı faz	Kaynak
Zeolit 4A	%99.9	pH _i =12, C _i =1 mg/L, V=100 mL, m=1 g, T=25°C, t=1 saat	Simüle alkali atık çözeltisi	(Fang vd., 2017)
Zeolit P	161.92 mg/g	C _i =100-10000 mg/L, V=48 mL, m=0.16 g, T=25°C, t=3 gün	Sulu çözelti	(Mimura & Akiba, 1993)
Zeolit Na A-X	312.5 mg/g	pH _i =7, C _i =100-1000 mg/L, V=100 mL, m=0.1 g, T=25°C, t=3 saat	Yeraltı suyu	(Abdel-Rahman vd., 2010)
Zeolit NaX	%91.0	pH _i =7, C _i =6.66x10 ⁻⁴ mol/L, V=10 mL, m=0.05 g, T=25°C, t=168 saat	Sulu çözelti	(Levenets vd., 2016)
Linde-tip A	%99.9	C _i =10 mg/L, V=30 mL, m=0.5 g, T=25°C, t=1 saat	0.5 mol/L KNO ₃ de Sulu çözelti	(Munthali vd., 2015)

* pH_i: başlangıç pH'sı, C_i: başlangıç Sr derişimi, V: çözelti hacmi, m: iyon değıştirici miktarı, T: çalışma sıcaklığı, t: temas süresi

2.2. Çözünmeyen asit tuzları

2.2. Insoluble acid salts

2.2.1. Titanatlar

2.2.1. Titanates

Sodyum titanat ($\text{Na}_4\text{Ti}_4\text{O}_{20}\cdot n\text{H}_2\text{O}$) ve sodyum nonatitanat ($\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20}\cdot x\text{H}_2\text{O}$), stronsiyumu, özellikle sodyum varlığında alkali çözeltilerden etkili bir şekilde ayırabilen amorf yapıda tabakalı malzemelerdir. Amorf sodyum titanat, geri akış altında konsantre sodyum hidroksit çözeltisi içinde titanyum dioksit tozu kullanılarak hazırlanabilir. Kesin kristal yapı henüz literatürde bildirilmemiştir, ancak sodyum titanatlar genellikle aralarında katyonlar bulunan katmanlar oluşturmak üzere köşe paylaşımı yoluyla birleştirilen kenar paylaşımli TiO_6 sekizyüzlü zincirlerinden meydana gelir. Oda sıcaklığında, ara katman boşluğu yaklaşık 10 Å'dir. Bu mesafe, kuruma koşullarına ve ara katman boşluğundaki su moleküllerinin miktarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Bu boşluk, hidratlı formlarındaki stronsiyum katyonlarının yapıya difüzyonu için yeterlidir. Yüksek seçicilik, stronsiyumun $\text{Sr}(\text{OH})^+$ olarak sorpsiyonu ile açıklanabilir. Ticari adı Sr-Treat olan sodyum titanat, Fortum Ltd. tarafından üretilmiştir ve endüstriyel uygulamalar için büyük ölçekte kullanılmaktadır. Kalsiyum varlığında, malzemenin stronsiyuma göre kalsiyum için daha yüksek seçiciliği nedeniyle Sr-Treat'in performansı önemli ölçüde düşük kalmıştır. Bu nedenle, yüksek derişimlerde tuz içeren atık çözeltilerinde sodyum titanat kullanımı azalmıştır. Sodyum titanatın katyon değişim performansı da hafif asidik atık çözeltilerde düşüktür. Bu nedenle sodyum titanat kullanarak stronsiyumu ayırmak için kalsiyumun uzaklaştırılması ve çözeltilinin nötralize edilmesi gerekir (Savva, 2015).

Lehto ve Clearfield (1987) sodyum titanatın ($\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20}\cdot x\text{H}_2\text{O}$) stronsiyum için iyon değişim davranışlarını incelemiştir. $\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20}\cdot x\text{H}_2\text{O}$ 'nun alkali metallere kıyasla stronsiyum için seçici olduğunu rapor etmişlerdir. Bu bulgu çok önemlidir, çünkü nükleer atıklar genellikle ^{90}Sr ile birlikte yüksek derişimlerde Na^+ iyonları içerir. 4 M Na^+ içeren çözeltideki stronsiyum için K_d değerlerinin hala 3000 mL/g civarında olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, toprak alkali metallerinin varlığında seçicilik nispeten daha düşük kalmaktadır. Behrens vd. (1998), simule edilmiş sulu atıklardan ve yeraltı suyundan ^{89}Sr ve ^{137}Cs iyonlarının uzaklaştırılmasında katmanlı $\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20}\cdot x\text{H}_2\text{O}$ dahil olmak üzere birkaç iyon değiştiriciyi test etmiştir. Tüm sentetik iyon değiştiriciler, ^{89}Sr 'nin en az %97'sini simule yeraltı

suyundan başarıyla uzaklaştırmıştır. Sodyum nonatitanat, alkali ortamda Sr^{2+} için seçici bir malzeme olarak bilinir. pH düştüğünde, H^+ iyonlarına ilgisi artar dolayısıyla, K_D değerleri pH 7'nin altında belirgin bir şekilde düşer. Mevcut çalışmadan elde edilen veriler de bu sonucu doğrulamıştır. Alkali yapıdaki NCAW simulantında, sodyum nonatitanat 235000 mL/g'nin üzerinde bir K_D değerine sahiptir. Daha az alkali özellik gösteren simulantta ise 25300 mL/g'lık K_D değeri elde edilmiştir. Amesh vd. (2020) diğer bir titanat bazlı bileşik, sodyum demir titanatı (NaFeTiO) hazırlamış, sezyum, stronsiyum ve öropiyuma karşı iyon değiştirme davranışlarını araştırmıştır. Sr için K_D değerleri pH 6'ya kadar artış göstermiş ve stronsiyum alım kapasitesi 233 mg/g olarak bulunmuştur. Stronsiyum iyonlarının adsorpsiyonunda sodyum titanatların yanı sıra farklı metal katyonları içeren titanat bileşikleri de hazırlanmıştır. Ryu vd. (2016), hidrotermal olarak yapılandırılmış titanat nanotüpler (TiNT 'ler) ile deniz suyundan Sr^{2+} 'nin uzaklaştırılması ve geri kazanılması için bir araştırma yürütmüştür. Sorpsiyon kinetiği, yalancı ikinci dereceden model ile uyumludur. İzoterm verileri Langmuir modeli ile açıklanabilmektedir ve maksimum Sr^{2+} adsorpsiyon kapasitesi 97 mg/g'dır. Adsorpsiyonda etkin mekanizmanın iyon değişimi olduğu belirlenmiştir. Sr^{2+} iyonlarının alımı, Ca^{2+} iyonlarının varlığında önemli ölçüde azalmıştır. Ca^{2+} iyonlarının yüksek derişimi nedeniyle TiNTS'nin deniz suyunda kullanımının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

2.2.2. Titanosilikatlar

2.2.2 Titanosilicates

Titanosilikat iyon değiştiriciler, stronsiyumun nükleer atıklardan seçici olarak ayrılması için ayarlanabilir özelliklere sahip, ilgi çeken bir diğer çözünmeyen asit tuzları grubudur. Bu malzemeler titanosilikat kafesten oluşur, ancak kristal yapıları ve Ti:Si oranları farklıdır. Bu durum, iyon değişim özelliklerinde farklılıklara yol açar.

Birinci tip malzeme, $\text{Na}_2\text{Ti}_2\text{O}_3\text{SiO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (NaTS) ideal formülüne sahip sodyum titanosilikattır. Kristal formda sentezlenebilir ve yapısı X-ışını yöntemleri ile belirlenebilir. Malzeme, nötr ile bazik ortamda stronsiyum gideriminde etkilidir ve kalsiyum varlığında stronsiyum için seçiciliğe sahiptir. Ancak, zayıf asidik yapısından dolayı pH 7'nin altında ^{90}Sr giderimi için etkin olarak kullanılamamaktadır. Stronsiyum ilgisine ek olarak, sodyum titanosilikat, geniş pH aralığında sezyum iyonları için seçiciliğe sahiptir. Ticari olarak temin edilebilen CST, yaklaşık %15 mol

niyobyum içerir. Toz formda (IE-910) ve kolon proseslerinde kullanıma uygun küreler halinde (IONSIV IE-911) üretilmekte ve pazarlanmaktadır.

İkinci tip malzeme, $KFe_4(AsO_4)_3(OH)_4$ ideal formül ile doğal mineral farmakosideritin kristal yapısına sahiptir. Kübik sistemde kristalize olur. Farmakosiderit yapısında hem Si hem de Ti için Ge ile yer değiştirmenin mümkün olduğu belirlenmiştir. Bu materyaller hem Cs^+ hem de Sr^{2+} için seçicilik gösterebilirler de sodyum titanosilikat kadar etkili değildirler (Sylvester, 2000).

Cs^+ ve Sr^{2+} kationlarının uzaklaştırılmasında mikro gözenekli titanosilikat iyon değiştirici ETS-10 ($(Na, K)_2Si_5TiO_{13} \cdot nH_2O$), Pavel vd. (2011) tarafından sentezlenmiştir. Adsorpsiyon izotermi, başlangıç derişiminin artışı ile yüksek Sr^{2+} alımına işaret etmektedir. Sr^{2+} başlangıç derişimi 3520 mg/L olduğunda 211.2 mg/g'lık maksimum Sr^{2+} alım kapasitesine ulaşılmıştır. Stronsiyum alımının iyon değişimi ve fiziksel adsorpsiyon yoluyla gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca, Sr^{2+} 'nin titanosilikat matrisine immobilizasyon özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, titanosilikat içeren Sr^{2+} 'nin termal ve yüzey karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Titanosilikat, atık sulardan stronsiyum ve sezyumun giderilmesi için umut verici yüksek kapasiteli bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Sr^{2+} içeren matris, yaklaşık 800°C'de kalsinasyondan sonra kolaylıkla katılaştırılabilir ve cam-seramik malzemeye dönüştürülebilir. Chitra vd. (2017) hidrotermal yöntemle CST iyon değiştiriciyi hazırlamıştır. Yazarlar, tüneller ve boşluklardan oluşan sitinakit yapıya sahip CST'nin geniş bir pH aralığında stronsiyum ve sezyum iyonlarının yakalanmasında oldukça seçici olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak, radyoaktif stronsiyum CST yapısı içinde sabitlenebilir ve nihai bertaraf için seramik atık formuna dönüştürülebilir. Simüle edilmiş atıktaki CST, 0.6 M NaOH ve 0.1 M $NaNO_3$ varlığında hızlı bir kinetiğe sahiptir ve ^{90}Sr için oldukça seçicidir. 6 mmol SiO_2 içeren gerçek atık çözeltisinde 24 saatte adsorpsiyon dengesi kurulmuştur. Sr'nin K_D değeri ve iyon değiştirme kapasitesi sırasıyla 7525 mL/g ve 642.4 mg/g olarak belirlenmiştir. Aynı grubun bir başka çalışmasında Oleksiienko vd. (2015), sulu çözeltilerden Sr^{2+} 'yi uzaklaştırmak için sol-jel yöntemiyle titanosilikat bileşiklerini sentezlemiştir. Sentezlenen titanosilikat, pH 4 - 12 arasında Sr^{2+} için yüksek adsorpsiyon kabiliyetine sahiptir. Maksimum Sr^{2+} adsorpsiyon kapasitesi 0.01 M NaCl çözeltisinde 159.3 mg/g olarak hesaplanmıştır. Sorpsiyon kinetiği hızlıdır ve yalancı ikinci dereceden model ile uyumludur. 500 mg/L başlangıç stronsiyum derişimine kadar

adsorpsiyon üzerinde rakip iyonların önemli bir etkisi belirlenmemiştir.

2.2.3. Diğer asit tuzları

2.2.3 Other acid salts

Bu grup altında incelenen iyon değiştiriciler çok değerlikli metallerin asidik tuzlarıdır. Periyodik tablonun IV, V ve VI. gruplarındaki metallerin asidik oksitlerinin karışımları olarak hazırlanırlar. Dört değerlikli metallerin asit tuzları bu grubun en çok rapor edilen üyesidir. Çözünürlükleri yoktur. Bileşimleri stokiometrik değildir ve çöktürme koşullarına bağlıdır. Bu sınıflandırma altında sentezlenen iyon değiştiriciler arasında zirkonyum, titanyum, toryum, kalay, seryum, krom, demir, niyobyum ve tantalın fosfat, arsenat, molibdat, tungstat, antimonat, silikat, vanadat ve tellurat bileşikleri bulunur (Naushad, 2009).

Möller vd. (2001), çöktürme yöntemi ile kristal ve amorf antimon silikat iyon değiştiricileri hazırlamıştır. Her iki bileşik de 0.1 M HNO_3 çözeltisinde ^{85}Sr için yüksek seçicilik göstermiştir. Kristal ve amorf malzemeler için sırasıyla 35500 ve 19700 mL/g'lık K_D değerleri elde edilmiştir. Asidik ortam da dahil olmak üzere geniş bir pH aralığında seçicilikleri, onları diğer iyon değiştiriciler arasında benzersiz kılmaktadır. Antimon silikat bileşikleri, Zhang vd. (2015b) tarafından başlangıç materyali olarak daha az toksik $SbCl_3$ kullanılarak sentezlenmiştir. Sb oranı arttığında piroklor yapı gözlenmiş, ancak Si oranındaki artış daha büyük yüzey alanı sunan amorf bir yapı ortaya çıkarmıştır. İyon değiştiricinin Sr alımının pH 1.2 ile 11 arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Si/Sb oranı 2.9 olduğunda, 10^8 mL/g'lık maksimum K_D değerine ulaşılmıştır. 0.1 M Ca^{2+} varlığında K_d değeri 102 mL/g'a düşmüştür. Adsorpsiyon kinetiği, yalancı ikinci derece modelini takip etmektedir. Solbra vd. (2001) titanyum silikat iyon değiştirici, $M_2Ti_2O_3SiO_4 \cdot nH_2O$ ($M = H, Na$), ile sezyum ve stronsiyum alımı üzerine bir çalışma yürütmüştür. Adsorpsiyon testleri $NaNO_3$, $CaCl_2$, NaOH ve HNO_3 varlığında yapılmıştır. Sr alımı nötral ve alkali çözeltelerde mümkün olmuştur.

Zhang vd. (2016a) tarafından kobalt ve stronsiyum iyonlarının uzaklaştırılması için kalay antimonat sorbenti hazırlanmıştır. Sorbent, nano ölçekli ve piroklor yapıda rutil kristallerinden oluşmaktadır. Kalay antimonat, stronsiyum için pH 2 - 12 aralığında yüksek bir kapasiteye sahiptir. Sr adsorpsiyonu Freundlich izotermine iyi şekilde uyum göstermiştir. Zhang vd. (2016b) mangan antimonat ($MnSb$) malzemeleri ile asidik

çözeltiden stronsiyum(II) ve kobalt(II)'nin uzaklaştırılmasına odaklanan başka bir araştırmayı rapor etmiştir. Malzemelerin yüksek yüzey alanı, Sr^{2+} ve Co^{2+} iyonlarının alımı için uygun bir yapı oluşturmaktadır. $pH > 2$ 'deki çözeltilerde elde edilen K_D değeri 8.3×10^5 mL/g'dır. Sorpsiyon, Na^+ , Mg^{2+} ve Ca^{2+} iyonlarının varlığından etkilenmiştir. Sorpsiyon kinetiği hızlıdır ve artan sıcaklıkla birlikte Sr^{2+} alımı artmıştır. Sr adsorpsiyonu Freundlich izotermi ile açıklanabilmiştir. [Sonar vd. \(2011\)](#) tarafından kalay, mangan ve zirkonyum antimonatlar ve kompozitleri sentezlenmiş, düşük düzey radyoaktif atıklardan radyostronsiyumun uzaklaştırılmasında test edilmişlerdir. Kompozit malzemeler, toz halindeki malzemelerin polimetil

meta akrilat ile kaplanarak kürecik oluşturmasıyla elde edilmiştir. pH 11'in üzerindeki tüm kompozitler için 2000 ± 200 'lık K_D değerine ulaşılmıştır. [El-Latif ve Elkady \(2011\)](#) sol-jel, çöktürme ve hidrotermal teknikleri kullanarak nano-zirkonyum vanadat iyon değiştiricileri hazırlamışlardır. Başlatıcı derişimi, reaksiyon sıcaklığı ve süresi, ortaya çıkan ürünün iyon değişim özellikleri üzerinde etkili olmuştur. Tüm örnekler stronsiyuma kıyasla sezyum için yüksek ilgi göstermiştir. Kimyasal, termal ve radyasyon kararlılıkları oldukça yüksektir. Çözünmeyen asit tuzlarının stronsiyum adsorpsiyon davranışlarına ilişkin özet Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çözünmeyen asit tuzlarının stronsiyum adsorpsiyon performansı

Table 4. Strontium adsorption performance of insoluble acid salts

İyon değiştirici	Kapasite veya % verim	Dağılma katsayısı	Çalışma koşulları*	Sıvı faz	Kaynak
Sodyum titanat	195.36 mg/g	-	$pH_i=12.83$, $C_i=0.08$ mol/L, $m=0.2$ g, $t=5$ gün	Alkali çözelti	(Lehto & Clearfield, 1987)
Sodyum nonatitanat	-	235120 mL/g	$pH_i=14.5$, $V/m=200$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=24$ saat	Alkali NCAW (nötralize akış asit atığı) simulantı	(Behrens vd., 1998)
Sodium demir titanat	233 mg/g	-	$pH_i=14$, $V/m=200$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=6$ saat	0.1 M $NaNO_3$ varlığında 0.1 M $NaOH$ çözeltisi	(Amesh vd., 2020)
Titanat nanotüp	91.74 mg/g	-	$pH_i=8$, $V/m=1000$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=30$ dak	Sulu çözelti	(Ryu vd., 2016)
ETS-10 titanosilikat	211.2 mg/g	-	$pH_i=neutral$, $C_i=3520$ mg/L, $V/m=250$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=24$ saat	Sulu çözelti	(Pavel vd., 2011)
Kristal silikotitanat	-	17525 mL/g	$pH_i=8-9$, $V/m=100$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=24$ saat	Radyoaktif çözelti	(Chitra vd., 2017)
Titanosilikat	79.64 mg/g	-	$pH_i=7.08$, $V/m=100$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=24$ saat	0.01 M $NaCl$	(Oleksiienko vd., 2015)
Kristal antimon silikat	-	35500 mL/g	$pH_i < 6$, $V/m=100-200$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=1-4$ gün	0.1 M HNO_3	(Möller vd., 2001)
Mangan antimonat	30.2 mg/g	-	$pH_i=4$, $C_i=10$ mg/L, $V/m=4000$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=40$ saat	Sulu çözelti	(Zhang vd, 2016b)

* pH_i : başlangıç pH'sı, C_i : başlangıç Sr derişimi, V: çözelti hacmi, m: iyon değiştirici miktarı, T: çalışma sıcaklığı, t: temas süresi

2.3. Hidrate metal oksitler ve karışımları

2.3. Hydrous metal oxides and mixtures

Hidrate oksitler, metal katyonları ve anyonların ayrılmasında yaygın olarak kullanılan önemli bir inorganik iyon değiştirici grubudur. Bu malzemeler

çoğunlukla amorfudur ve hazırlama koşullarına bağlı olarak özellikleri değişebilir. Parçacık ve kafes hidratları olarak iki gruba ayrılabilirler. 3, 4, 13 ve 14. gruptaki metallerin çoğu partikül hidratları oluşturur. Yüzey büyük ölçüde hidroksil grupları, koordineli ve hidrojen bağlı su

molekülleri ile kaplıdır. pH arttıkça kation alımı artarken, pH azaldıkça anyon alımı artar. Partikül hidratlara tipik örnekler SnO₂ ve ZrO₂'dir (Vijayan vd. 2011).

Hidrate ZrO₂, en çok rapor edilen partikül hidratlardan biridir. İnan vd. (2006) hidrate ZrO₂ ile stronsiyum sorpsiyon davranışlarını incelemişlerdir. Hidrate zirkonyum dioksit, alkali çözeltilerde yüksek sorpsiyon verimine sahiptir. Sorpsiyon dengesine 240 dakikada ulaşılmış ve sorpsiyon verileri Langmuir izotermi ile açıklanmıştır. Tek tabaka stronsiyum kapasitesi 30.12 mg/g olarak hesaplanmıştır. Sıcaklığın sorpsiyon verimi üzerinde pozitif etkisi tespit edilmiştir. Proses endotermiktir ve kendiliğinden gerçekleşmiştir. Ancak Ca²⁺ ve Ba²⁺ varlığında sorbentün seçiciliği düşük kalmıştır. ZrO₂ ile yürütülen bir diğer çalışmada, Venkatesan vd. (2000) sıcaklığın sorpsiyon kinetiği üzerinde bir etkisi olduğuna dikkat çekmiştir. Sr²⁺ alımı 30°C'de 100 dakikada dengeye ulaşmaktadır. pH 8'in üzerinde sorpsiyon veriminde kayda değer bir artış görülmüştür. Bu, Sr'nin yüzeyde SrOH⁺ iyonları olarak adsorplanması ile açıklanabilir. Baryum ve stronsiyumun hidrate demir oksit üzerindeki adsorpsiyon çalışmaları Mishra ve Tiwary (1999) tarafından yürütülmüştür. pH, temas süresi, derişim ve sıcaklığın sorpsiyon üzerindeki etkisi incelenmiştir. İzoterm verileri Freundlich modeli ile tanımlanmış ve sorpsiyon kinetiği yalancı birinci dereceden denklem ile uyumlu bulunmuştur. 10⁻² M başlangıç Sr²⁺ derişiminde hidrate demir oksitin alım kapasitesi 22.97 mg/g'dır. Sıcaklığın etkisi 303 ve 333 K aralığında incelenmiştir. 333 K'da Sr²⁺ alım kapasitesi 0.058 mg/g bulunmuştur. Çözelti pH'sının metal sorpsiyonu üzerinde önemli bir etkisi gözlenmiştir. pH 5.2'den 9.2'ye arttığında Sr²⁺ alımında kademeli bir artış görülmektedir. pH 9.2 ile 10.8 arasında Sr alımı hemen hemen sabitken, pH 11'in üzerinde keskin bir artış gözlemlenmiştir. Shabana ve El-Dessouky (2002), hidrate titanyum dioksit kullanarak klorürlü çözeltilerden sezyum ve stronsiyum iyonlarının sorpsiyonu üzerine bir çalışma rapor etmişlerdir. Malzeme, nötral çözeltilerde her iki iyon için de nispeten yüksek iyon değişim kapasitesi göstermiştir. Asidik çözeltilerde stronsiyum ilgisi daha düşüktür. Kolonda, 10⁻² M NaCl'de Sr²⁺ iyonlarının alımı, Cs⁺ iyonlarından yaklaşık %51 daha az gerçekleşmiştir. Dyer vd. (2000) tünel yapılı iki tip mangan oksit hazırlamış ve bunların radyonüklidlere karşı sorpsiyon davranışlarını incelemiştir. 0.1 M NaNO₃ çözeltisinde Mg formundaki todorokit tipi malzemeler, diğer zayıf asit iyon değiştiriciler gibi Sr için benzer sorpsiyon

özelliklerine sahiptir. pH 2'de Sr alımı ihmal edilebilir düzeyde tespit edilmiştir. Ca formundaki todorokit tipi malzemeler, stronsiyum için kalsiyuma göre daha yüksek seçicilik göstermiştir. Logunov vd. (2004), tuzluluk içermeyen sulardan ⁹⁰Sr'nin uzaklaştırılması için mangan dioksit bazlı sorbentleri kullanmıştır. Optimum Sr sorpsiyonu pH 6.9'da elde edilmiştir.

Kafes yapısındaki hidratlar, 5. ve 15. gruptaki daha yüksek oksidasyon basamaklarında bulunan metaller tarafından oluşturulur. Tipik olarak, metal oksitler zayıf asidiktir ve bu nedenle asidik koşullarda iyon değiştirici olarak davranmazlar. Antimon pentoksitte olduğu gibi metalin daha yüksek değeri ile asitlikleri artar. Sb, iyon değişim kapasitesi 5.1 meq/g olan antimon pentoksit [(H₃O)₂Sb₂O₆·xH₂O] yapısı oluşturabilir. Diğer hidrate oksitler arasında asidik koşullarda stronsiyum için en yüksek alım kapasitesine sahiptir. Bu yapı piroklor olarak adlandırılır ve kation seçiciliği boyut sınırlamaları ile ilişkilidir (Vijayan vd. 2011).

Zhang vd. (2015a) Sr²⁺ adsorpsiyonu için seçiciliği yüksek olan antimon pentoksit bazlı iyon değiştiriciyi rapor etmiştir. Materyal, yüksek tuzlu çözeltilerde, pH 2 – 12 aralığında etkili olmuştur. Sb³⁺/Sb oranı 0.41 olduğunda, optimum adsorpsiyon elde edilmiş ve K_d değeri 8.8 x 10⁸ mL/g bulunmuştur. 0.1 mol/L Ca²⁺ varlığında K_d değeri 10²-10³ mL/g aralığındadır. K_F değeri sıcaklık artışıyla artış göstermiş ve 323 K'da 40.6 mg/g olarak elde edilmiştir. Sorpsiyon kinetiği yalancı ikinci derece modele uymaktadır. Sorpsiyon partikül içi difüzyon yoluyla meydana gelmiştir. Tantal katkılı altıgen tungsten oksidin (hex-WO₃) nükleer atıklardan stronsiyum ve sezyum ayırma performansı Li vd. (2014) tarafından incelenmiştir. Stronsiyum adsorpsiyon kapasitesini arttırmak için Ta katkı olarak ilave edilmiştir. Ta/W yer değiştirme oranı 0.07 olduğunda maksimum Sr kapasitesine ulaşılmıştır. Optimum koşullar, pH 4 ve 2 saatlik temas süresi olarak gözlenmiştir. Sr sorpsiyon verileri hem Langmuir hem de Freundlich izotermine uymaktadır. Ta katkılı hex-WO₃ için maksimum Sr kapasitesi 44.43 mg/g hesaplanmıştır. Sorpsiyon işlemi ekzotermiktir ve kendiliğinden gerçekleşmiştir.

Tekli hidrate oksitler bir araya gelerek karışık oksitler oluşturur ve üstün özelliklere sahip iyon değiştiriciler elde edilir. Gürboğa ve Tel (2005), stronsiyum adsorpsiyonu için TiO₂-SiO₂ karışık jel kürelerinin hazırlanması üzerine bir çalışma yürütmüştür. %60 TiO₂ içeren karışık oksit, pH

10.6'da %84.6 adsorpsiyon verimine sahiptir. Adsorpsiyon dengesine 120 dakikada ulaşmıştır. İzoterm verileri, Freundlich izotermiyle iyi bir uyum göstermiştir. Sıcaklık adsorpsiyon üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. Maksimum adsorpsiyon verimi 323 K'da %93.1 olarak elde edilmiştir. Beklendiği gibi Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının varlığında K_D değerleri azalmıştır. Zirkonyum ve mangan karışık oksitlere odaklanan birçok çalışma mevcuttur. Zirkonyum dioksit, bazik çözeltilerde ($pH > 8$) stronsiyum için yüksek bir afiniteye sahiptir. Ayrıca, yüksek kimyasal ve radyasyon kararlılığı gösterir. Mangan dioksit ise daha asidik yüzey sağlayarak hafif asidik koşullarda katyon değişimini mümkün kılar. Hidrate, amorf MnO_2-ZrO_2 kullanılarak sulu çözeltilerden stronsiyum iyonlarının adsorpsiyon çalışmaları, [Ahmadi vd. \(2014\)](#) tarafından yürütülmüştür. Maksimum adsorpsiyon verimine pH 5.5'te ulaşılmış ve pH 5'in altında inorganik iyon değiştiricilerin çoğunda olduğu gibi nispeten daha düşük sorpsiyon gözlenmiştir. Maksimum stronsiyum alım kapasitesi 66 mg/g bulunmuştur. Sorpsiyon kinetiği yalancı ikinci dereceden model ile iyi bir

şekilde açıklanmış ve adsorpsiyon mekanizması kemisorpsiyon olarak modellenmiştir. [İnan ve Altaş \(2010\)](#) asidik çözeltilerden stronsiyum iyonlarının adsorpsiyonu için Mn-Zr karışık hidrate oksiti hazırlamıştır. Sorpsiyon verimi pH 4'te %80'e ulaşmış ve pH 8'e kadar sabit kalmıştır. Sorpsiyon Langmuir izotermi ile uyumludur ve maksimum Sr^{2+} alım kapasitesi 30.9 mg/g'dır. Ca^{2+} varlığında stronsiyum sorpsiyon kapasitesi azalış göstermiştir. Adsorban Sr^{2+} iyonlarına karşı Ba^{+2} iyonlarından daha seçicidir. Termodinamik veriler endotermik ve kendiliğinden gerçekleşen bir prosese işaret etmektedir. Nano boyutlu MnO_2-ZrO_2 ile ilgili bir diğer çalışma, [Ahmadi vd. \(2015\)](#) tarafından yapılmıştır. Yazarlar, nano boyuttaki kompozitin birçok avantajı olduğunu bildirmişlerdir. MnO_2-ZrO_2 yüksek adsorpsiyon verimine sahiptir ve optimum pH 5.5 olarak belirlenmiştir. Sorpsiyon 30 dakikada denegeye ulaşmış ve daha sonra sabit kalmıştır. Sorpsiyon yalancı ikinci dereceden model ile tanımlanmıştır. Hidrate metal oksit ve karışımlarının stronsiyum adsorpsiyon davranışlarına ilişkin veri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Hidrate metal oksit ve karışımlarının stronsiyum adsorpsiyon performansı
Table 5. Strontium adsorption performance of hydrous metal oxides and mixtures

İyon değiştirici	Kapasite veya % verim	Çalışma koşulları*	Sıvı faz	Kaynak
MnO_2-ZrO_2 kompoziti	16.95 mg/g	$pH_i=5.5$, $C_i=50$ mg/L, $V/m=100$ mL/g, $T=45^\circ C$, $t=60$ dak	Sulu çözelti	(Ahmadi vd., 2014)
Mn-Zr karışık hidrate oksit	30.86 mg/g	$pH_i=4.1$, $C_i=100$ mg/L, $V/m=250$ mL/g, $T=30^\circ C$, $t=180$ dak	Asidik çözelti	(İnan & Altaş, 2010)
Ta katkılı Hex- WO_3	44.43 mg/g	$pH_i=4$, $C_i=180$ mg/L, $V/m=250$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=2$ saat	Asidik çözelti	(Li vd., 2014)
TiO_2-SiO_2	%84.6	$pH_i=10.6$, $C_i=5$ mg/L, $V/m=250$ mL/g, $T=23^\circ C$, $t=2$ saat	Alkali çözelti	(Gürboğa & Tel, 2005)
Sb^{3+}/Sb_2O_5	25.7 mg/g	$pH_i=4$, $C_i=4$ mg/L, $V/m=4000$ mL/g, $T=30^\circ C$, $t=40$ saat	Asidik çözelti	(Zhang vd., 2015a)
Hidrate ZrO_2	30.12 mg/g	$pH_i=11.7$, $V/m=250$ mL/g, $T=30^\circ C$, $t=4$ saat	Alkali çözelti	(İnan vd., 2006)
Hidrate ZrO_2	>%90	$pH_i \geq 8$, $C_i=10$ mg/L, $V/m=1000$ mL/g, $T=30^\circ C$, $t=100$ dak	Sulu çözelti	(Venkatesan vd., 2000)

* pH_i : başlangıç pH'sı, C_i : başlangıç Sr derişimi, V: çözelti hacmi, m: iyon değiştirici miktarı, T: çalışma sıcaklığı, t: temas süresi

2.4. Metal sülfürler 2.4. Metal sulfides

Son zamanlarda geliştirilmiş metal sülfür iyon değiştiriciler (MSİD'ler), sıvı atıkların yönetiminde

oldukça etkili olan malzemelerdir. Bu malzemeler katmanlı, üç boyutlu kristal kafes, amorf ve aerogel gibi çeşitli formlarda hazırlanabilmektedir. MSİD'lerin temel özelliği, yapılarındaki S^{2-} ligandları nedeniyle sahip oldukları üstün Sr^{2+}

adsorpsiyon performansındır. Ayrıca düşük maliyetli sentez, hızlı kinetik, yüksek kapasite ve spesifik katyonlar için seçicilik gibi avantajları bulunmaktadır (Manos & Kanatzidis, 2016). Ağır metallerin (Qi vd., 2017; Li vd., 2014a; Li vd., 2014b; Manos & Kanatzidis, 2009) ve radyonüklidlerin (Yang vd., 2016; Neeway vd., 2016; Sengupta vd., 2014; Manos & Kanatzidis, 2012) adsorpsiyonu için başarıyla kullanılmışlardır. Bugüne kadar, Sr^{2+} adsorpsiyonu için KMS-1 (Manos vd., 2008), KMS-2 (Mertz vd., 2013), KTS-3 (Sarma vd., 2016) ve $[Me_2NH_2]_{4/3}[Me_3NH]_{2/3}Sn_3S_7 \cdot 1.25H_2O$ (FJSM-SnS) (Qi vd., 2015) gibi birçok katmanlı metal sülfür bileşiği geliştirilmiştir. Çokyüzlü metal sülfür, $K_6Zn_4Sn_5S_{17}$, (Manos vd., 2005) gibi üç boyutlu kristal yapıya sahip metal sülfürler de incelenmiştir. $K_6Zn_4Sn_5S_{17}$ 'nin yapısındaki üç farklı büyüklükteki boşluk nedeniyle Cs^+ ve NH_3^+ için yüksek seçicilik gösterdiği bildirilmiştir (Manos vd., 2006). Sahip oldukları farklı yapılar göz önüne alındığında, metal sülfürlerin çeşitli metal iyonlarına karşı davranışlarını araştırmak için daha kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır (Zhang vd., 2018).

Manos ve Kanatzidis (2016), MSİD'leri kullanarak toksik metal iyonlarının ve radyonüklitlerin sorpsiyonu için kapsamlı araştırmalar yürütmüştür. Sr^{2+} sorpsiyon çalışmaları KMS-1 ve KMS-2 tipi malzemeler kullanılarak yapılmıştır. Maksimum tek tabaka Sr^{2+} sorpsiyon kapasiteleri KMS-1 ve KMS-2 için sırasıyla 77 ve 87 mg/g olarak bulunmuştur. Her iki malzeme de geniş bir pH aralığında Sr^{2+} için yüksek kapasite göstermiştir. KMS-1, 5 M Na^+ çözeltisinde pH 14'te 1.2×10^4 mL/g K_D değerine sahiptir. Ayrıca, KMS-1 oksit tipi iyon değiştiricilere kıyasla asidik çözeltelerde kabul edilebilir bir ilgiye sahiptir. Çünkü, yapıdaki S^{2-} ligandlarının protonlara karşı sınırlı bir ilgisi vardır. KMS-2, Sr^{2+} 'nin giderilmesinde hem asidik hem de alkali çözeltelerde çok iyi sonuç vermiştir. pH 3'te K_d değeri 6.3×10^4 'tür. Mertz vd. (2013) yapıdaki mangani(Mn) magnezyum(Mg) ile değiştirerek KMS-2 iyon değiştiriciyi geliştirmiştir. Mg toksik değildir ve yalnızca tek bir kararlı değerlik basamağına sahiptir. KMS-2'nin Sr^{2+} için KMS-1'den daha yüksek alım kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir. KMS-2'nin Sr^{2+} için K_d değeri nötral pH'da 2.1×10^4 mL/g olarak hesaplanmıştır. Malzemenin pH 3 - 10 aralığındaki kimyasal kararlılığı, onu nükleer atık akışları için kullanılabilir hale getirir. Ancak, Ni^{2+} iyonlarının varlığında KMS-2'nin seçiciliği azalmaktadır. Bu davranış, malzemenin daha yumuşak iyonlara olan ilgisi ile açıklanabilir. Başka bir çalışmada Sarma vd. (2016), Cs^+ , Sr^{2+} ve UO_2^{2+} iyonlarının hızlı ve

seçici olarak uzaklaştırılması için yeni bir metal sülfür olan KTS-3 bileşiğini sentezlemiştir. Materyal, pH 2 - 12 arasında kimyasal olarak kararlıdır. KTS-3, pH 4 - 10 aralığında stronsiyum için ~%98 sorpsiyon verimine sahiptir. Sr^{2+} için pH 2 ve 12'de sorpsiyon verimi %81 ve %88 olarak bulunmuş, K_D değerleri sırasıyla 10^3 - 10^5 aralığında tespit edilmiştir. Cs^+ iyonlarının Sr^{2+} sorpsiyonu üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Ancak 1 mol/L'ye kadar Na^+ iyonlarının varlığında K_D değerlerinde önemli bir düşüş gözlenmiştir. Sorpsiyonun yaklaşık %92'si 5 dakikada tamamlanmıştır. KTS-3, daha önce rapor edilmiş KMS tipi malzemelerden daha yüksek olan 102 mg/g'lık Sr^{2+} iyon değişim kapasitesine sahiptir. Zhang vd. (2018) yeni bir metal sülfür adsorban ile sulu çözeltiden radyoaktif Sr^{2+} 'nin seçici adsorpsiyonunu incelemiştir. Malzeme kimyasal ve termal olarak kararlıdır ve çok yüzlü yapıdan oluşmaktadır. Sorpsiyon işlemi 10 dakikada tamamlanmış ve yalancı ikinci dereceden modele uyum göstermiştir. Langmuir modeline göre maksimum tek tabaka kapasitesi 298 K'de 19.3 mg/g olarak belirlenmiştir. Malzeme, hem düşük hem de yüksek derişimlerde Sr^{2+} için etkili bulunmuştur. Sorpsiyon mekanizması, yüzeydeki iyon değişimi ve S-Sr etkileşimlerinden oluşmaktadır. Başka bir metal sülfür bileşiği, Na/Zn/Sn/S (NaZTS), kuaterner metal sülfür nanolevhaları, radyoaktif stronsiyum iyonlarının adsorpsiyonu için Zhang vd. (2020) tarafından sentezlenmiştir. Önceki çalışmalarda belirtildiği gibi NaZTS, >%98.4 adsorpsiyon verimi ile pH 3 - 12 aralığında Sr^{2+} iyonlarını uzaklaştırmıştır. Sorpsiyon kinetiği çok hızlıdır ve 5 dakikada sorpsiyon dengesi kurulmuştur. 318 K'da maksimum Sr^{2+} alımı 40.4 mg/g'dır. Malzemenin yapısında üstün adsorpsiyon özelliklerinden sorumlu olan S^{2-} ligandları bulunmaktadır. Liang vd. (2019) potasyum niyobyum sülfür (KNbS) bileşiğini hazırlamış ve Sr^{2+} , Co^{2+} gibi iyonlara karşı adsorpsiyon davranışını araştırmıştır. Sr^{2+} için adsorpsiyon dengesine 35 dakikada ulaşılmıştır. Maksimum Sr^{2+} alım kapasitesi 80 mg/g'dır. Malzemenin optimum uzaklaştırma performansı pH 4 - 10 aralığında tespit edilmiştir. Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının Sr^{2+} alımı üzerinde önemli etkileri olduğu bulunmuştur. Sorpsiyon işlemi, kimyasal adsorpsiyonun iyon değişiminde rol oynadığını gösteren yalancı ikinci derece modele uygunluk göstermiştir. Ayrıca, Sr^{2+} sorpsiyonu tek tabakalı olarak meydana gelmiş ve Langmuir izotermi ile açıklanmıştır.

3. Sonuçlar

3. Conclusions

Bu derleme kapsamında sıvı nükleer atıklardaki stronsiyum iyonlarının uzaklaştırılmasında kullanılan sentetik inorganik iyon değiştiriciler incelenmiş ve yapılan çalışmalar rapor edilmiştir. Stronsiyum iyonları çok çeşitli tiplerdeki radyoaktif atıklarda bulunmaktadır. Stronsiyumu hafif asidik, nötral ve alkali çözeltilerden seçici olarak ayırabilen ticari ve endüstriyel ölçekli iyon değiştiriciler vardır. Temel sorun, yüksek kalsiyum iyonu derişiminde ve yüksek asidik çözeltilerde stronsiyumu uzaklaştırabilme yeteneğine sahip iyon değiştiricileri tasarlamaktır. Bu sorunların aşılabilmesi için yeni materyaller geliştirilmekte ve çalışmalar devam etmektedir. Radyonüklid yüklü inorganik iyon değiştiriciler, nihai bertaraf için katı atık formları olarak yüksek dayanıklılığa sahiptir.

Zeolitler, kil mineralleri ve hidroksiapatitler gibi doğal inorganik iyon değiştiriciler, birçok araştırmacı tarafından stronsiyumun uzaklaştırılması için sıklıkla kullanılmıştır. Doğal mineraller bol, ucuz malzemeler olmasına rağmen, asidik koşullarda bozdukları için yalnızca belirli bir pH aralığında yüksek kapasiteye sahiptirler. Seçicilikleri yoktur ve mekanik özellikleri kolon ayırımı için uygun değildir. Özellikle alkali çözeltide stronsiyumun seçici olarak uzaklaştırılması için titanyum bazlı iyon değiştiriciler önerilmiştir. Ticari adı Sr-Treat olan sodyum titanat, stronsiyum içeren nükleer atık akışlarının arıtılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kalsiyum iyonlarının varlığında stronsiyum seçiciliği düşük kalmaktadır. Titanosilikatlar, özellikle alkali ortamlarda stronsiyum iyonları için yüksek kapasite ve seçicilik gösteren asit tuzlarıdır. Toz halindeki CST, dünya çapında pazarlanmaktadır. Çok değerlikli metallerin üstün özelliklere sahip birçok asidik tuz bileşiği de rapor edilmiştir. Bu bileşikler suda çözünmez ve yüksek kimyasal, termal ve radyasyon kararlılığına sahiptirler. Hemen hepsi stronsiyum için nötralden alkali pH aralığına kadar yüksek kapasite ve seçicilik gösterir. Öte yandan, asidik ortamda stronsiyum iyonlarının uzaklaştırılması için antimon, tungsten gibi yüksek valens değerliğine sahip elementleri içeren iyon değiştiriciler umut verici veriler sağlamıştır. Hidrate oksitler, metal katyonları olarak Zr, Ti, Si, Mn, Fe, Al, Sb ve W dahil olmak üzere iyon değiştiricilerin en büyük gruplarından biridir. Malzemelerin yüzeyi katyon değişiminden sorumlu olan hidroksil grupları ile kaplıdır. Genelde zayıf asidiktirler ve asidik ortamda iyon değiştirici görevi görmezler. Artan pH ile katyon

alım kapasiteleri artar. Öte yandan, beş değerlikli antimon ve altı değerlikli tungsten içeren oksit bileşikleri daha yüksek asidik karaktere sahiptir ve asidik yüzeyleri nedeniyle asidik çözeltide de stronsiyum iyonlarına ilgi gösterirler. Karışık hidrate oksitler, tekli oksitlerden daha üstün malzemeler elde etmek için birlikte çöktürme veya sol-jel yöntemi ile hazırlanmaktadır. Metal sülfürler, çeşitli atık çözeltilerden belirli katyonları adsorbe edebilen nispeten yeni malzemelerdir. Hazırlanışları basittir, kapasite ve seçicilik açısından metal iyonlarının alımı için üstün özelliklere sahiptirler. Yüzeylerinde S²⁻ ligandlarının bulunması nedeniyle asidik çözeltide protonlara karşı ilgi göstermezler, dolayısıyla katyon değiştirici olarak davranırlar. Bu davranış, metal sülfürleri asidik ortamdan stronsiyum iyonlarının alımı için özellikle umut verici kılmaktadır. Rapor edilen çalışmaların sonuçları, metal sülfürlerin geniş bir pH aralığında stronsiyumu seçici olarak uzaklaştırabilme yeteneklerini ortaya koymaktadır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Abdel-Rahman, R. O., Ibrahim, H. A., Hanafy, M., & Abdel-Monem, N. M. (2010). Assessment of synthetic zeolite NaA-X as sorbing barrier for strontium in a radioactive disposal facility. *Chemical Engineering Journal*, 157(1), 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.057>
- Ahmadi, S. J., Akbari, N., Shiri-Yekta, Z., Mashhadizadeh, M. H., & Pourmatin, A. (2014). Adsorption of strontium ions from aqueous solution using hydrous, amorphous MnO₂-ZrO₂ composite: A new inorganic ion exchanger. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299, 1701-1707. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2852-9>
- Ahmadi, S. J., Akbari, N., Shiri-Yekta, Z., Mashhadizadeh, M. H., & Hosseinpour, M. (2015). Removal of strontium ions from nuclear waste using synthesized MnO₂-ZrO₂ nano-

- composite by hydrothermal method in supercritical condition. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(3), 478-485. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2852-9>
- Ambashta, R. D., & Sillanpää, M. E. T. (2012). Membrane purification in radioactive waste management: A short review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 105, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.12.002>
- Amesh, P., Suneesh, A. S., Venkatesan, K. A., Maheswari, R. U., & Vijayalakshmi, S. (2020). Preparation and ion exchange studies of cesium and strontium on sodium iron titanate. *Separation and Purification Technology*, 238, 116393. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116393>
- Anthony, R. G., Dosch, R. G., Gu, D., & Philip, C. V. (1994). Use of silicotitanates for removing cesium and strontium from defense waste. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 33(11), 2702-2705. <https://doi.org/10.1021/ie00035a020>
- Awual, M. R., Suzuki, S., Taguchi, T., Shiwaku, H., Okamoto, Y., & Yaita, T. (2014). Radioactive cesium removal from nuclear wastewater by novel inorganic and conjugate adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, 242, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.072>
- Baisden, P. A., & Atkins-Duffi, C. E. (2011). Radioactive waste management. In A. Vertes, S. Nagy, Z. Klencsar, R. G. Lovas, & F. Rosch (Eds.), *Handbook of Nuclear Chemistry*. Springer.
- Barkat, M., Nibou, D., Amokrane, S., Chegrouche, S., & Mellah, A. (2015). Uranium (VI) adsorption on synthesized 4A and P1 zeolites: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Comptes Rendus Chimie*, 18(3), 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2014.09.011>
- Behrens, E. A., Sylvester, P., & Clearfield, A. (1998). Assessment of a sodium nonatitanate and pharmacosiderite-type ion exchangers for strontium and cesium removal from DOE waste simulants. *Journal of Environmental Science and Technology*, 32(1), 101-107. <https://doi.org/10.1021/ES9704794>
- Camacho, L. M., Deng, S., & Parra, R. R. (2010). Uranium removal from groundwater by natural clinoptilolite zeolite: Effects of pH and initial feed concentration. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 393-398. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.017>
- Chitra, S., Shanmugamani, A. G., Sudh, R., Kalavathi, S., & Paul, B. (2017). Selective removal of cesium and strontium by crystalline silicotitanates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 312, 507-515. <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5249-3>
- Clearfield, A. (2000). Inorganic ion exchangers, past, present, and future. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 18(4), 655-678. <https://doi.org/10.1080/07366290008934702>
- Clearfield, A., Medvedev, D. G., Kerlegon, S., Bossier, T., Burns, J. D., & Jackson, M. (2012). Rates of exchange of Cs⁺ and Sr²⁺ for poorly crystalline sodium titanium silicate (CST) in nuclear waste systems. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 30(3), 229-243. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.639256>
- Çiçek, E., Cojocaru, C., Zakrzewska-Trznadel, G., Harasimowicz, M., & Miskiewicz, A. (2012). Response surface methodology for the modelling of ⁸⁵Sr adsorption on zeolite 3A and pumice. *Environmental Technology*, 33(1), 51-59. <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.549514>
- Dyer, A., Pillinger, M., Newton, J., Harjula, R., Möller, T., & Amin, S. (2000). Sorption behavior of radionuclides on crystalline synthetic tunnel manganese oxides. *Chemistry of Materials*, 12(12), 3798-3804. <https://doi.org/10.1021/cm001142v>
- El-Latif, M. M. A., & Elkady, M. F. (2011). Synthesis, characterization and evaluation of nano-zirconium vanadate ion exchanger by using three different preparation techniques. *Materials Research Bulletin*, 46(1), 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2010.09.032>
- Fang, X-H., Fang, F., Lu, C-H., & Zheng, L. (2017). Removal of Cs⁺, Sr²⁺, and Co²⁺ ions from the mixture of organics and suspended solids aqueous solutions by zeolites. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(3), 556-561. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.11.008>
- Figueiredo, B. R., Cardoso, S. P., Portugal, I., Rocha, J., & Silva, C. M. (2018). Inorganic ion exchangers for cesium removal from radioactive wastewater. *Separation and Purification Reviews*, 47(4), 306-336. <https://doi.org/10.1080/15422119.2017.1392974>
- Guevar, C., Hertz, A., Brackx, E., Barre, Y., & Grandjean, A. (2017). Mechanisms of strontium removal by a Ba-titanate material for the wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4948-4957. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.024>
- Gürboğa, G., & Tel, H. (2005). Preparation of TiO₂-SiO₂ mixed gel spheres for strontium adsorption. *Journal of Hazardous Materials*, 120(1-3), 135-

142.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.12.037>
- Hamed, M. M., Holiel, M., & Ahmed, I. M. (2016). Sorption behavior of cesium, cobalt and europium radionuclides onto hydroxyl magnesium silicate. *Radiochimica Acta*, 104(12), 873-890. <https://doi.org/10.1515/ract-2016-2579>
- ISO-International Organization for Standardization. (2021, 10 Ekim). *ISO/DIS 13160(en) Water quality-strontium 90 and strontium 89-test methods using liquid scintillation counting or proportional counting*. <https://www.iso.org/standard/78205.html>
- Ivanets, A., Radkevich, A., Shashkova, I., Kitikova, N., Zarubo, A., & Venhlinkskaya, E. (2021). Study of dynamic adsorption and desorption kinetics of cesium, strontium, cobalt radionuclides on granular phosphate adsorbent. *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 327, 1291-1298. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07584-w>
- İnan, S., & Altaş, Y. (2010). Adsorption of strontium from acidic waste solution by Mn-Zr mixed hydrous oxide prepared by co-precipitation. *Separation Science and Technology*, 45(2), 269-276. <https://doi.org/10.1080/01496390903409666>
- İnan, S., Tel, H., & Altaş, Y. (2006). Sorption studies of strontium on hydrous zirconium dioxide. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 267(3), 615-621. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-0094-9>
- Jia, F., Li, J., Wang, J., & Sun, Y. (2017). Removal of strontium ions from simulated radioactive wastewater by vacuum membrane distillation. *Annals of Nuclear Energy*, 103, 363-368. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.02.003>
- Jimenez-Reyes, M., Almazan-Sanchez, P. T., & Solache-Rios, M. (2021). Radioactive waste treatments by using zeolites. A short review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 233, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106610>
- Jozdani, S. M. B., Nilchi, A., & Abdolmohammadi, S. (2019). Disposal of cesium ion from wastewater using biocompatible titanate nanotube. *Desalination and Water Treatment*, 138, 219-229. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23335>
- Korneikov, R. I., & Ivanenko, V. I. (2020). Extraction of cesium and strontium cations from solutions by titanium(IV) phosphate-based ion exchangers. *Inorganic Materials*, 56(5), 528-532. <https://doi.org/10.1134/S0020168520050088>
- Krishna, M. V. B., Rao, S., Arunachalam, J., Murali, M., Kumar, S., & Manchanda, V. (2004). Removal of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from actual low level radioactive waste solutions using moss as a phyto-sorbent. *Separation and Purification Technology*, 38(2), 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.11.002>
- Krol, M. (2020). Natural vs. synthetic zeolites. *Crystals*, 10(7), 622. <https://doi.org/10.3390/cryst10070622>
- Kumar, J. R., Kim, J.-S., Lee, J.-Y., & Yoon, H.-S. (2011). A brief review on solvent extraction of uranium from acidic solutions. *Separation and Purification Reviews*, 40(2), 77-125. <https://doi.org/10.1080/15422119.2010.549760>
- Lehto, J., & Clearfield, A. (1987). The ion exchange of strontium on sodium titanate Na₄Ti₉O₂₀·xH₂O. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters*, 118(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/BF02165649>
- Lehto, J., Bordkin, L., Harjula, R., & Tusa, E. (1999). Separation of radioactive strontium from alkaline nuclear waste solutions with the highly effective ion exchanger SrTreat. *Nuclear Technology*, 127(1), 81-87. <https://doi.org/10.13182/NT99-A2985>
- Levenets, V. V., Lonin, A. Y., Omelnik, O. P., & Shchur, A. O. (2016). Comparison the sorption properties of clinoptilolite and synthetic zeolite during sorption strontium from the water solutions in static conditions: Sorption and quantitative determination of strontium by the method PIXE. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 3961-3966. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.011>
- Li, H., Huang, Y., Liu, J., & Duan, H. (2021). Hydrothermally synthesized titanate nanomaterials for the removal of heavy metals and radionuclides from water: A review. *Chemosphere*, 282, 131046. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131046>
- Li, J., Wang, X., Yuan, B., & Fu, M. (2014a). Layered chalcogenide for Cu²⁺ removal by ion exchange from wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 200, 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.09.008>
- Li, J., Wang, X., Yuan, B., Fu, M., & Cui, H. (2014b). Robust removal of heavy metals from water by intercalation chalcogenide [CH₃NH₃]_{2x}Mn_xSn_{3-x}S₆·0.5H₂O. *Applied Surface Science*, 320, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.057>
- Li, X., Mu, W., Xie, X., Liu, B., Tang, H., Zhou, G., Wei, H., Jian, Y., & Lou, S. (2014). Strontium

- adsorption on tantalum-doped hexagonal tungsten oxide. *Journal of Hazardous Materials*, 264, 386-394. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.032>
- Liang, C., Jia, M., Wang, X., Du, Z., Men, J., & Ding, H. (2019). Preparation of potassium niobium sulfide and its selective adsorption properties for Sr^{2+} and Co^{2+} . *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322, 377-387. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06685-5>
- Logunov, M. V., Skobtsov, A. S., Soldatov, B. V., Pazdnikov, A. P., Voroshilov, Y. A., & Rovny, S. I. (2004). Research and application of inorganic selective sorbents at Mayak PA. *Comptes Rendus Chimie*, 7(12), 1185-1190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crci.2004.05.006>
- Lopes, C. B., Lito, P. F., Otero, M., Lin, Z., Rocha, J., Silva, C. M., Pereira, E., & Duarte, A. C. (2008). Mercury removal with titanasilicate ETS-4: Batch experiments and modelling. *Microporous and Mesoporous Materials*, 115(1-2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.10.055>
- Luo, X., & Wang, J. (2014). Study on radioactive wastewater treatment by precipitation and membrane separation. *Applied Mechanics and Materials*, 490-491, 972-975. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.972>
- Luo, X., Zhang, G., Wang, X., & Gu, P. (2013). Research on a pellet coprecipitation micro-filtration process for the treatment of liquid waste containing strontium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 298(2), 931-939. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2495-x>
- Manos, M. J., & Kanatzidis, M. G. (2016). Metal sulfide ion exchangers: superior sorbents for the capture of toxic and nuclear waste-related metal ions. *Chemical Science*, 7(8), 4804-4824. <https://doi.org/10.1039/C6SC01039C>
- Manos, M. J., Iyer, R. G., Quarez, E., Liao, J. H., & Kanatzidis, M. G. (2005). $\{\text{Sn}[\text{Zn}_4\text{Sn}_4\text{S}_{17}]\}^{6-}$: A robust open framework based on metal-linked penta-supertetrahedral $[\text{Zn}_4\text{Sn}_4\text{S}_{17}]^{10-}$ clusters with ion-exchange properties. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(23), 3552-3555. <https://doi.org/10.1002/anie.200500214>
- Manos, M. J., Chrissafis, K., & Kanatzidis, M. G. (2006). Unique pore selectivity for Cs^+ and exceptionally high NH_4^+ exchange capacity of the chalcogenide material $\text{K}_6\text{Sn} [\text{Zn}_4\text{Sn}_4\text{S}_{17}]$. *Journal of American Chemical Society*, 128(27), 8875-8883. <https://doi.org/10.1021/ja061342t>
- Manos, M. J., & Kanatzidis, M. G. (2009). Sequestration of heavy metals from water with layered metal sulfides. *Chemistry-A European Journal*, 15(19), 4779-4784. <https://doi.org/10.1002/chem.200900353>
- Manos, M. J., & Kanatzidis, M. G. (2012). Layered metal sulfides capture uranium from seawater. *Journal of American Chemical Society*, 134(39), 16441-16446. <https://doi.org/10.1021/ja308028n>
- Manos, M. J., Ding, N., & Kanatzidis, M. G. (2008). Layered metal sulfides: Exceptionally selective agents for radioactive strontium removal. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(10), 3696-3699. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711528105>
- Marinin, D. V., & Brown, G. N. (2000). Studies of sorbent/ion-exchange materials for the removal of radioactive strontium from liquid radioactive waste and high hardness groundwaters. *Waste Management*, 20(7), 545-553. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00017-9)
- Mertz, J. L., Fard, Z. H., Malliakas, C. D., Manos, M. J., & Kanatzidis, M. G. (2013). Selective removal of Cs^+ , Sr^{2+} , and Ni^{2+} by $\text{K}_{2x}\text{Mg}_x\text{Sn}_{3-x}\text{S}_6$ ($x=0.5-1$) (KMS-2) relevant to nuclear waste remediation. *Chemistry of Materials*, 25(10), 2116-2127. <https://doi.org/10.1021/cm400699r>
- Miller, J. E., & Brown, N. E. (1997). Development and properties of crystalline silicotitanate (CST) ion exchangers for radioactive waste applications. Technical report, SAND97-0771. <https://doi.org/10.2172/469131>
- Mimura, H., & Akiba, K. (1993). Adsorption behavior of cesium and strontium on synthetic zeolite P. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 30(5), 436-443. <https://doi.org/10.1080/18811248.1993.9734500>
- Mishra, S. P., & Singh, V. K. (1995). Radiotracer technique in adsorption study XIII. Adsorption of barium and strontium ions on chromium(IV) oxide powder. *Applied Radiation and Isotopes*, 46(9), 847-853. [https://doi.org/10.1016/0969-8043\(95\)00149-8](https://doi.org/10.1016/0969-8043(95)00149-8)
- Mishra, S. P., & Tiwary, D. (1999). Ion exchangers in radioactive waste management. Part XI. Removal of barium and strontium ions from aqueous solutions by hydrous ferric oxide. *Applied Radiation and Isotopes*, 51(4), 359-366. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(99\)00065-2](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(99)00065-2)
- Möller, T. (2002). *Selective crystalline inorganic materials as ion exchangers in the treatment of nuclear waste solutions*. [Doctoral Thesis, University of Helsinki].

- Möller, T., Harjula, R., Pillinger, M., Dyer, A., Newton, J., Tusa, E., Amin, S., Webb, M., & Araya, A. (2001). Uptake of ^{85}Sr , ^{134}Cs and ^{57}Co by antimony silicates doped with Ti^{4+} , Nb^{5+} , Mo^{6+} and W^{6+} . *Journal of Materials Chemistry*, 11(5), 1526-1532. <https://doi.org/10.1039/B009888O>
- Mu, W., Yu, Q., Zhang, R., Li, X., Hu, R., He, Y., Wei, H., Jian, Y., & Yang, Y. (2017). Controlled fabrication of flower-like α -zirconium phosphate for the efficient removal of radioactive strontium from acidic nuclear wastewater. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(46), 24388-24395. <https://doi.org/10.1039/C7TA07803J>
- Munthali, M. W., Johan, E., Aono, H., & Matsue, N. (2015). Cs^+ and Sr^{2+} adsorption selectivity of zeolites in relation to radioactive decontamination. *Journal of Asian Ceramics Societies*, 3(3), 245-250. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.04.002>
- Naushad, M. (2009). Inorganic and composite ion exchange materials and their applications. *Ion Exchange Letters*, 2, 1-14.
- Neeway, J. J., Asmussen, R. M., Lawter, A. R., Bowden, M. E., Lukens, W. W., Sarma, D., Riley, B. J., Kanatzidis, M. G., & Qafoku, N. P. (2016). Removal of TcO_4^- from representative nuclear waste streams with layered potassium metal sulfide materials. *Chemistry of Materials*, 28(11), 3976-3983. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b01296>
- Oleksienko, O., Levchuk, I., Sitarz, M., Meleshevych, S., Strelko, V., & Sillanpää, M. (2015). Removal of strontium (Sr^{2+}) from aqueous solutions with titanosilicates obtained by the sol-gel method. *Journal of Colloid and Interface Science*, 438, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.09.075>
- Olmez Aytas, S., Akyil, S., & Eral, M. (2004). Adsorption and thermodynamic behavior of uranium on natural zeolite. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 260, 119-125. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000027070.25215.92>
- Park, Y., Shin, W. S., Reddy, S., Shin, S.-J., & Choi, S.-J. (2010). Use of nano crystalline silicotitanate for the removal of Cs, Co, Sr from low-level liquid radioactive waste. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 5(2), 238-242. <https://doi.org/10.1166/jno.2010.1101>
- Pavel, C. C., & Popa, K. (2014). Investigations on the ion exchange process of Cs^+ and Sr^{2+} cations by ETS materials. *Chemical Engineering Journal*, 245, 288-294. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.036>
- Pavel, C. C., Walter, M., Pöml, P., Bouexiere, D., & Popa, K. (2011). Contrasting immobilization behavior of Cs^+ and Sr^{2+} cations in a titanosilicate matrix. *Journal of Materials Chemistry*, 21(11), 3831-3837. <https://doi.org/10.1039/C0JM03135F>
- Popa, K., & Pavel, C. C. (2012). Radioactive wastewaters purification using titanosilicates materials: State of the art and perspectives. *Desalination*, 293, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.02.027>
- PRIS-Power Reactor Information System. (2021, 10 Ekim). *The database on nuclear power reactors*. <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- PRIS-Power Reactor Information System. (2021, 10 Ekim). *Trend in electricity supplied*. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendinElectricalProduction.aspx>
- Qasem, N.A.A., Mohammed, R.H., Lawal, D.U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *Npj Clean Water*, 4, 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Qi, X., Du, K., Feng, M., Gao, Y., Huang, X., & Kanatzidis, M. G. (2017). The layered $\text{A}_2\text{Sn}_3\text{S}_7$ (A=organic cation) as efficient ion-exchanger for rare earth element recovery. *Journal of the American Chemical Society*, 139(12), 4314-4317. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b00565>
- Qi, X., Du, K., Feng, M., Li, J., Du, C., Zhang, B., & Huang, X. (2015). A two-dimensionally microporous thiostannate with superior Cs^+ and Sr^{2+} ion-exchange property. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(10), 5665-5673. <https://doi.org/10.1039/C5TA00566C>
- Radiological Aspects. (2021, 10 Ekim). *Guidelines for Drinking-Water Quality*. Erişim adresi https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDW9rev1and2.pdf.
- Rahman, R. O. A., Ibrahim, H. A., & Hung, Y. T. (2011). Liquid radio-active wastes treatment: A review. *Water*, 3(2), 551-565. <https://doi.org/10.3390/w3020551>
- Ryu, J., Kim, S., Hong, H.-J., Hong, J., Kim, M., Ryu, T., Park, I.-S., Chung, K.-S., Jang, J. S., & Kim, B.-G. (2016). Strontium ion (Sr^{2+}) separation from seawater by hydrothermally structured titanate nanotubes: Removal vs. recovery. *Chemical Engineering Journal*, 304, 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.131>
- Sarma, D., Malliakas, C. D., Subrahmanyam, K. S., Islama, S. M., & Kanatzidis, M. G. (2016). $\text{K}_{2x}\text{Sn}_{4-x}\text{S}_{8-x}$ ($x=0.65-1$): A new metal sulfide for

- rapid and selective removal of Cs⁺, Sr²⁺ and UO₂²⁺ ions. *Chemical Science*, 7(2), 1121-1132. <https://doi.org/10.1039/C5SC03040D>
- Savva, S. N. (2015). *New materials for strontium removal from nuclear waste streams*. [Doctoral Thesis, University of Birmingham].
- Sengupta, P., Dudwadkar, N. L., Vishwanadh, B., Pulhani, V., Rao, R., Tripathi, S. C., & Dey, G. K. (2014). Uptake of hazardous radionuclides with layered chalcogenide for environmental protection. *Journal of Hazardous Materials*, 266, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.010>
- Shabana, E. I., & El-Dessouky, M. I. (2002). Sorption of cesium and strontium ions on hydrous titanium dioxide from chloride medium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 253(2), 281-284. <https://doi.org/10.1023/A:1019610128059>
- Smiciklas, I., Coha, I., Jovic, M., Nodilo, M., Sljivic-Ivanovic, M., Smiljanic, S., & Grahek, Z. (2021). Efficient separation of strontium radionuclides from high-salinity wastewater by zeolite 4A synthesized from Bayer process liquids. *Scientific Reports*, 11, 1738. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81255-y>
- Solbra, S., Allison, N., Waite, S., Mikhalovsky, S. V., Bortun, A. I., Bortun, L. N., & Clearfield, A. (2001). Cesium and strontium ion exchange on the framework titanium silicate M₂Ti₂O₃SiO₄·nH₂O (M = H, Na). *Environmental Science & Technology*, 35(3), 626-629. <https://doi.org/10.1021/es000136x>
- Sonar, N. L., Pardeshi, V., De, V., Shukla, R., Valsala, T. P., Kulkarni, Y., Manoj, N., Pillai, C. S., Tyagi, A. K., Raj, K., & Manchanda, V. K. (2011). Evaluation of metal antimonate compounds for the removal of radiostrontium from radioactive liquid waste: Characterization and sorption behavior. *Separation Science and Technology*, 46(11), 1776-1787. <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.571226>
- Sylvester, P. (2000). *Strontium from nuclear wastes: Ion exchange*. Academic Press.
- Tang, M., Chen, J., Wang, P., Wang, C., & Ao, Y. (2018). Highly efficient adsorption of uranium(VI) from aqueous solution by a novel adsorbent: Titanium phosphate nanotubes. *Environmental Science: Nano*, 5, 2304-2314. <https://doi.org/10.1039/C8EN00761F>
- Taylor-Pashow, K. M. L., Missimer, D. M., Jurgensen, A., & Hobbs, D. T. (2011). Characterization of modified monosodium titanate - an improved sorbent for strontium and actinide separations. *Separation Science and Technology*, 46(7), 1087-1097. <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.554951>
- Taylor, R. (2015). *Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel*. Elsevier.
- Trivedi, P., & Axe, L. (1999). A comparison of strontium sorption to hydrous aluminum, iron, and manganese oxides. *Journal of Colloid and Interface Science*, 218(2), 554-563. <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6465>
- U.S. EPA-United States Environmental Protection Agency. (2021, 10 Ekim). *Radionuclide basics: Strontium-90*. <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-strontium-90>
- U.S. EPA, EMSL. (1980). *Method 905.0: Radioactive strontium in drinking water, prescribed procedures for measurement of radioactivity in drinking water*, EPA/600/4/80/032. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-905.0.pdf>
- Venkatesan, K. A., Panner Selvam, G., & Vasudeva Rao, P. R. (2000). Sorption of strontium on hydrous zirconium oxide. *Separation Science and Technology*, 35(14), 2343-2357. <https://doi.org/10.1081/SS-100102106>
- Vijayan, S., Belikov, K., & Drapailo, A. (2011). Inorganic sorbents for radiostrontium removal from waste solutions: Selectivity and role of calixarenes. Technical Report, AECL-CW-121600-CONF-001.
- Xu, C., Wang, J., & Chen, J. (2012). Solvent extraction of strontium and cesium: A review of recent progress. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 30(6), 623-650. <https://doi.org/10.1080/07366299.2012.700579>
- Yang, A., Yang, P., & Huang, C. P. (2017). Effect of Mg(II) on the removal of uranium from low radioactive wastewater by flocculation using polyacrylamide. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 21(4), 4017006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000359](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000359)
- Yang, H., Luo, M., Luo, L., Wang, H., Hu, D., Lin, J., Wang, X., Wang, Y., Wang, S., & Bu, X. (2016). Highly selective and rapid uptake of radionuclide cesium based on robust zeolitic chalcogenide via stepwise ion-exchange strategy. *Chemistry of Materials*, 28, 8774-8780. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b04273>
- Zhang, L., Wei, J., Zhao, X., Li, F., Jiang, F., & Zhang, M. (2015a). Strontium(II) adsorption on use of silicotitanates for removing cesium and strontium from defense waste Sb(III)/Sb₂O₅. *Chemical Engineering Journal*, 267, 245-252.

- Zhang, L., Wei, J., Zhao, X., Li, F., & Jiang, F. (2015b). Adsorption characteristics of strontium on synthesized antimony silicate. *Chemical Engineering Journal*, 277, 378-387. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.145>
- Zhang, L., Wei, J., Zhao, X., Li, F., Jiang, F., Zhang, M., & Cheng, X. (2016a). Competitive adsorption of strontium and cobalt onto tin antimonate. *Chemical Engineering Journal*, 285, 679-689. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.013>
- Zhang, L., Wei, J., Zhao, X., Li, F., Jiang, F., Zhang, M., & Cheng, X. (2016b). Removal of strontium(II) and cobalt(II) from acidic solution by manganese antimonate. *Chemical Engineering Journal*, 302, 733-743. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.040>
- Zhang, M., Gu, P., Zhang, Z., Liu, J., Dong, L., & Zhang, G. (2018). Effective, rapid and selective adsorption of radioactive Sr²⁺ from aqueous solution by a novel metal sulfide adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 351, 668-677. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.069>
- Zhang, M., Gu, P., Yan, S., Dong, L., & Zhang, G. (2020). Na/Zn/Sn/S (NaZTS): Quaternary metal sulfide nanosheets for efficient adsorption of radioactive strontium ions. *Chemical Engineering Journal*, 379, 122227. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122227>
- Zhuravlev, I. (2020). Titanium silicates precipitated on the rice husk biochar as adsorbents for the extraction of cesium and strontium radioisotope ions. *Colloids and Interfaces*, 3(1), 36. <https://doi.org/10.3390/colloids3010036>