



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi: 19.04.2024
Kabul Tarihi: 11.05.2024

Received Date: 19.04.2024
Accepted Date: 11.05.2024

ATIKSUDAN BOYA GİDERİMİNDEKİ GELİŞMELER: ADSORPSİYON TEKNOLOJİSİ VE GELECEĞE YÖNELİK BEKLENTİLER

ADVANCES IN DYE REMOVAL FROM WASTEWATER: ADSORPTION TECHNOLOGY AND FUTURE PROSPECTS

Hakan YILDIZ¹ (ORCID: 0000-0002-2181-7226)

¹ Harran Üniversitesi, Bozova Meslek Yüksekokulu, Çevre Teknolojileri Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hakan YILDIZ, hyildiz@harran.edu.tr

ÖZET

Su kaynaklarının boya ile kirlenmesi hem insan sağlığı hem de çevre için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Son zamanlarda, adsorpsiyon teknolojisinin kullanımı, etkinliği ve maliyet verimliliği nedeniyle boyaların sudan uzaklaştırılması için umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu derleme makalesi, adsorpsiyon süreçleri yoluyla boyaların sudan uzaklaştırılmasındaki gelişmelere kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. Hem doğal hem de sentetik malzemeler dahil olmak üzere çeşitli adsorbanlar, boyaları sudan uzaklaştırma kapasiteleri açısından incelenmiştir. Adsorpsiyon etkileşimlerinin altında yatan mekanizmalar aydınlatılmış ve boya giderme verimliliğini etkileyen faktörler tartışılmıştır. Adsorpsiyon yoluyla sudan boya gideriminde gelecekteki gelişmeler için beklentiler, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir çözümlere duyulan ihtiyaç vurgulanarak kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Mevcut zorlukların üstesinden gelmek ve boya gideriminin genel verimliliğini artırmak için yeni malzemelerin entegrasyonu, proses optimizasyonu ve hibrit teknolojilerin geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Adsorpsiyona dayalı boya giderimindeki ilerlemenin ve gelecekteki eğilimlerin bu kapsamlı değerlendirmesi, herkes için güvenli ve erişilebilir içme suyu sağlama hedefi doğrultusunda çalışan araştırmacılar, politika yapıcılar ve uygulayıcılar için değerli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atıksu arıtma, boya giderimi, adsorpsiyon

ABSTRACT

The contamination of water sources with dyes poses a significant problem for both human health and the environment. In recent times, the use of adsorption technology has emerged as a promising approach for removing dyes from water due to its effectiveness and cost-efficiency. This review article provides a comprehensive overview of the advancements in the removal of dyes from water through adsorption processes. Various adsorbents, including both natural and synthetic materials, have been examined for their capacities in removing dyes from water. The underlying mechanisms of adsorption interactions are elucidated and the factors influencing dye removal efficiency are discussed. The expectations for future developments in dye removal from water through adsorption are thoroughly explored, emphasizing the need for sustainable and scalable solutions. Suggestions for the integration of new materials, process optimization, and the development of hybrid technologies are proposed in order to overcome current challenges and enhance the overall efficiency of dye removal. This comprehensive evaluation of the progress and future trends in adsorption-based dye removal provides valuable insights for researchers, policy makers, and practitioners working towards the goal of providing safe and accessible drinking water for all.

Keywords: Wastewater treatment, dye removal, adsorption

GİRİŞ

Nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme, gezegenimiz üzerinde önemli bir etkiye sahip olan çok sayıda çevre sorununa neden olmuştur. Hava kirliliği, su kirliliği, kara ve denizlerin bozulması bugün karşı karşıya olduğumuz başlıca sorunlardan bazılarıdır (Adeleye vd., 2023). 1950 yılında dünya nüfusu sadece 2,5 milyar iken 1990 yılında 5 milyara yükselmiştir. Nüfustaki bu kayda değer artışın devam etmesi beklenmekte olup, Birleşmiş Milletler 2050 yılına kadar küresel nüfusun 9 milyara kadar ulaşabileceğini öngörmektedir (United Nations, 2019). Artan nüfusla birlikte, temiz içme suyuna erişim giderek daha önemli hale gelmektedir. Ne yazık ki, dünya nüfusunun çoğunluğu hala güvenli içme suyuna erişmekte zorlanıyor. Atık su, çeşitli insan faaliyetlerinde kullanılmış ve daha sonra kirleticiler, kimyasallar veya diğer maddelerle kirlenmiş herhangi bir su olarak tanımlanır. Bu kategori, ilk kullanımından sonra çevreye salınan hem evsel, endüstriyel, ticari hem de tarımsal kaynaklı suyu kapsar (İdrissi vd., 2023). Atık su, organik ve inorganik kirleticiler, patojenler, besinler, ağır metaller, boyar maddeler ve çeşitli tehlikeli maddelerden oluşan çok çeşitli kirleticiler içerebilir (Ciğeroğlu, vd., 2024). Atık suyun uygun şekilde yönetilmesi ve arıtılması, halk sağlığının korunması, çevrenin korunması ve sürdürülebilir su kaynağı için zorunludur. Atık su arıtma süreci, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle kirliliklerin ve zararlı maddelerin ortadan kaldırılması veya azaltılmasını içerir (Arslan vd., 2024; Daverey vd., 2019). Arıtma süreçleri eleme, çökeltme, filtrasyon, adsorpsiyon, biyolojik oksidasyon, dezenfeksiyon ve membran filtrasyonu ve ileri oksidasyon gibi ileri yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli tekniklerden oluşmaktadır (Silva vd., 2023; Fiyadh vd., 2023; Asheh vd., 2021). Atık su olarak da bilinen arıtılmış atık su, temizlik derecesine ve tabii tutulduğu arıtma seviyesine bağlı olarak su ekosistemlerine uygun şekilde deşarj edilme veya sulama, endüstriyel işlemler veya yeraltı suyunun yeniden doldurulması gibi çeşitli amaçlar için kullanım alanına sahiptir (Yıldız & Yüksel, 2024).

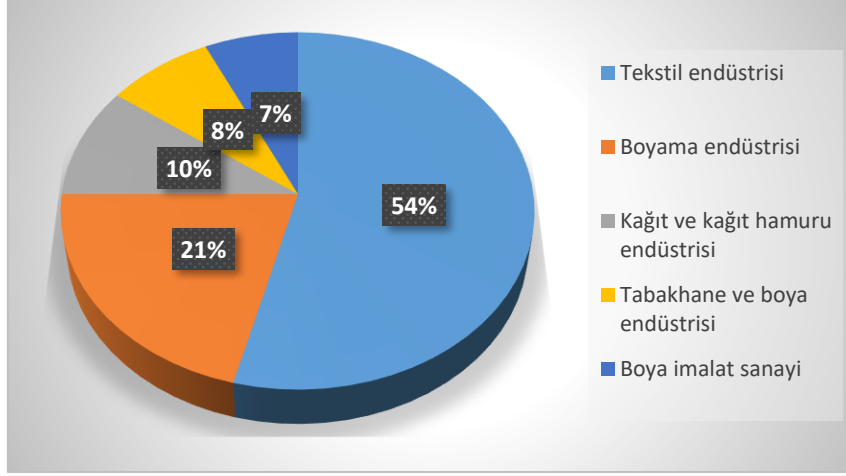
Yukarıda da bahsedildiği gibi suyu kirleten farklı kirlilik türleri vardır ve boyalar başlıca kirletici kategorilerinden biridir (Yıldız & Yüksel, 2023; Chequer vd., 2009). Boyaların su sistemlerine girmesi, suyu kullanım için uygunsuz hale getirir ve genellikle arıtılmasında zorluklar çıkarır. Bu durum, boyaların karmaşık moleküler yapısına ve birçok endüstriyel boyanın oldukça kararlı ve doğal bozulmaya karşı dirençli sentetik kaynaklardan elde edilmesine bağlanabilir (Gupta vd., 2021; Deniz & Yıldız, 2019b).



Şekil 1. Farklı Boya Sınıflarının Neden Olduğu Tehlikeli Etkiler

Boyalar renk veren kimyasal bileşiklerdir ve çeşitli ürünlerin renklendirilmesi için kozmetik, baskı ve plastik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal ve sentetik olmak üzere iki farklı boya kategorisi vardır. İlki, herhangi bir kimyasal işleme tabii tutulmadan bitkiler, hayvanlar, mineraller ve böceklerden elde edilir (Yagub vd., 2014). Öte yandan, sentetik boyalar kimyasal sentez yoluyla üretilir, bu da onları oldukça esnek ve canlılar için tehlikeli hale getirir. Ticari sentetik boyalar, renk tonu, bileşim ve uygulama teknikleri gibi faktörlere dayalı olarak birçok şekilde sınıflandırılabilir. Boyalar, sulu bir ortamda çözüldüklerinde yüklerine göre, özellikle katyonik, anyonik veya iyonik olmayan boyalar olarak da kategorize edilebilir (Khan vd., 2023; Sasmaz vd., 2021). Boyaların

çevresel etkileri, üretim sürecinden atık yönetimine kadar birçok faktörü içerebilir. Bazı boyalar, üretim aşamasında kullanılan kimyasallar nedeniyle toksik olabilir ve atık sulara veya toprağa zarar verebilir. Ayrıca, boyalı yüzeylerin çevredeki ekosistemlere ve su kaynaklarına doğrudan veya dolaylı olarak salınması, eko-toksikolojik etkilere neden olabilir. Bu etkiler arasında sucül organizmaların zarar görmesi, habitat kaybı ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi sonuçlar yer alabilir (Dutta vd., 2021). Şekil 1, sınıflandırmadan kaynaklanan çeşitli sağlık etkilerini göstermektedir.



Şekil 2. Çevreye Boya Salınımına Neden Olan Başlıca Endüstriler (Samsami vd., 2020)

Tekstil ve diğer sanayi sektörlerinde boya üretimi ve uygulaması, doğrudan boya içeren atık su oluşumuna yol açmaktadır (Yıldız vd., 2023). Çevreye boya salınımına neden olan başlıca endüstriler Şekil 2'de gösterilmektedir. Tekstil endüstrileri (%54) dünya çapında çevrede görülen mevcut boya atıklarının yarısını oluştururken, bunu boyama endüstrileri (%21), kâğıt ve kâğıt hamuru endüstrileri (%10), tabakhane ve boya endüstrileri (%8) ve boya imalat endüstrileri (%7) takip etmektedir. Çevre yönetmeliklerine göre, atık sularda toksik boyaların varlığı kabul edilemez olarak görülmektedir. Bunun nedeni, boya moleküllerinin düşük biyolojik parçalanabilirlik oranına sahip olmaları ve su ortamlarında kalıcı olmalarıdır. Ayrıca, bu moleküller fotoliz ve oksitleyici maddelere karşı dirençlidir ve bu da zararlı etkilerine katkıda bulunur (Deniz & Yıldız, 2019a).

Tekstil boya, kumaşların renklendirilmesi veya desenlendirilmesi için kullanılan kimyasal maddelerdir. Bu boyalar, kumaş liflerine nüfuz ederek istenilen renk veya deseni oluştururlar. Tekstil boya, genellikle sulu çözeltiler halinde veya pigment formunda gelir ve kumaş yüzeyine uygulanarak veya boyama işlemi sırasında kumaşa daldırılarak kullanılırlar. Sentetik boyaların sanayi sektöründe kullanımı, oksitleyici maddeler, ısı ve ışık gibi faktörlere karşı dayanıklılık gösteren organik moleküllerin varlığı ile karakterize edilir. Ayrıca, bu moleküller aerobik sindirime karşı dayanıklılık göstererek endüstriyel kullanım için oldukça cazip hale gelmektedir. Bununla birlikte, renkli atık suların çevreye deşarjının canlı organizmalar üzerinde zararlı etkileri olduğu gözlemlenmiştir (Azimi vd., 2021; Quansah vd., 2020; Othmani vd., 2019; Karcher vd., 2002). Boya atıklarının deşarjı su toplulukları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bunun nedeni, sulu sistemlerdeki belirli organizmalara zarar verebilecek parçalanma ürünlerinin potansiyel toksisitesidir. Boyaların varlığı ışığın nüfuz etmesini engelleyerek fotosentez sürecinde aksamalara ve sucül yaşam ekosistemi üzerinde zararlı etkilere yol açmaktadır. Sentetik boyalar karsinogenez ile ilişkilendirilmiştir ve kötü huylu tümörlere yol açan alerjik reaksiyonlara neden olabilir. Ticari olarak kullanılan sentetik boyaların çoğu fotodegradasyona ve biyodegradasyona karşı direnç göstermektedir. Bu tür boyaların solunması yaygın solunum sorunları tehlikesi yaratır ve bağışıklık sistemini de tehlikeye atabilir. Ayrıca, boyaların cilt tahrişine, burun tıkanıklığına veya kaşıntısına, göz tahrişine ve hapşirmaya neden olduğu bilinmektedir (Key vd., 2024; Sharma vd., 2021).

Sonuç olarak, akarsuyun doğal döngüsü bozulur ve çevrenin estetik değeri azalır. Sudaki ve tekstil atık suyundaki boya konsantrasyonunun tipik olarak sırasıyla 1 mg/L ve 10-200 mg/L olduğu ve bu miktarın dikkate değer bir miktar olduğu unutulmamalıdır (Kausar vd., 2023).

Bu çalışmanın temel amacı, atıksudan boya giderimi konusundaki durumu değerlendirmek ve özellikle adsorpsiyon teknolojisinin bu alandaki rolünü vurgulamaktır. Endüstriyel boyahaneler ve benzeri tesisler, üretim süreçlerinde kullanılan kimyasallar nedeniyle atık sularda çeşitli boya kirleticilerini oluşturur. Bu kirleticilerin etkili bir şekilde arıtılması, çevre kirliliğinin azaltılması ve su kaynaklarının korunması için kritik önem taşır. Ayrıca, adsorpsiyon

teknolojisinin atıksudan boya giderimindeki güçlü yönlerini ve potansiyelini ele alarak, bu teknolojinin mevcut durumu ve gelecekteki beklentileri tartışmayı hedeflemektedir. Adsorpsiyonun etkili bir şekilde boya kirleticilerini uzaklaştırmak için nasıl kullanılabileceği, mevcut araştırma bulguları ve endüstriyel uygulamalar üzerinden incelenecektir. Bu çalışma, atıksudan boya giderimi alanında çalışan araştırmacılar, mühendisler ve çevre koruma uzmanları için bir kaynak olmayı amaçlamaktadır ve adsorpsiyon teknolojisinin potansiyelini vurgulayarak, çevresel sürdürülebilirlik ve su kaynaklarının korunması konularında bilgilendirmeyi hedeflemektedir.

ATIK SU ARITMA YÖNTEMLERİ

1990'ların sonlarında, boya çıkış suyu deşarj limiti olmadığından, boya giderme yöntemleri olarak kullanılan ön su arıtma prosesleri dengeleme ve çökeltme idi (Robinson vd., 2001). Biyolojik olarak parçalanamayan boyaların kullanımı, bu atık suların arıtılması için uygun olmadıklarından hem birincil hem de ikincil konvansiyonel sistemler için bir zorluk teşkil etmektedir. Sonuç olarak, ileri oksidasyon ve biyolojik prosesler de dahil olmak üzere boya atık suları için potansiyel arıtma proseslerini araştırmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İleri oksidasyon, KOİ'nin azaltılmasında ve askıda katı maddelerin giderilmesinde etkinlik gösterirken, atık sudan rengin giderilmesinde etkisiz olduğu kanıtlanmıştır. Benzer şekilde, boya atık suyunun karmaşık bileşimi ve yüksek organik içeriği nedeniyle, biyolojik proseslerin kullanımı da verimli arıtma ve saflaştırma elde etmede sınırlı kalmıştır (Kumari & Kumar, 2023; Feuzer vd., 2022; Dinçer, 2020; Suzuki vd., 2020). Atık sulardan boyaların giderilmesi için flokülasyon/koagülasyon, biyolojik arıtma, ileri oksidasyon işlemleri, ozonlama, adsorpsiyon ve membran filtrasyonu gibi çeşitli arıtma yöntemleri kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Atıksudan Boya Giderme Teknolojileri Avantaj-Dezavantajları

Teknikler	Avantajlar	Dezavantajlar	Referans
Kimyasal yöntemler			
Ozonlama	Ozon, atık su miktarında herhangi bir artışa yol açmadan gaz halinde kullanılabilir. Çamur üretimi söz konusu değildir.	Maddenin yarı ömrü kısadır ve sadece yirmi dakika sürer. Ayrıca, prosedürün uygulanmasıyla ilgili masraflar da oldukça yüksektir.	(Lim vd., 2022)
Fotokimyasal			
Sodyum hipoklorit (NaOCl)	Çamur üretimi ve hoş olmayan kokuların varlığı önemli ölçüde azaltılmıştır.	Yan ürünler oluşur ve aromatik aminler açığa çıkar.	(Bonetta vd., 2021)
Elektrokimyasal imha	Azo bağlarının bölünmesinin başlaması ve hızlanması gözlenir. Çamur birikiminin olmaması ve kimyasal tüketiminin minimum düzeyde olması dikkat çekicidir.	Boyaların giderim hızı daha yüksek, akış hızlarıyla ters orantılıdır.	(Rajoria vd., 2021)
Fenton Ayırıcı	Reaktifin maliyeti düşükken, prosedürün etkinliği önemli ölçüde yüksektir.	Üretim ve çamur bertarafına ilişkin sorunlar.	(Ghernaout vd., 2020)

Biyolojik yöntemler

Aerobik biyobozunma	Bu işlemin maliyeti nispeten düşüktür ve özellikle azo-boyaların giderilmesi için faydalıdır.	Mikroorganizmalar uygun ortam nedeniyle büyür, işlem hızı azalır.	(Han vd., 2020)
Anaerobik biyobozunma	Yan ürünlerin enerji kaynağı olarak kullanılması son derece uygulanabiliridir.	H ₂ S ve CH ₄ gazını serbest bırakmak için aerobik bir ortamda ek arıtma gereklidir.	

Fizikokimyasal yöntemler

Adsorpsiyon	Çok çeşitli boyalar etkili bir şekilde ortadan kaldırılabılır.	Bazı adsorbanlar için yüzey alanı nispeten düşüktür ve adsorbanların maliyeti yüksektir.	(Yıldız vd., 2023)
Membran filtrasyonu	Tüm boyalar etkili bir şekilde uzaklaştırılır.	Önemli miktarda konsantre çamur üretilir.	(Hube vd., 2020)
İyon değiştirme	Adsorbanlar kaybolmaz, bunun yerine yenilenirler.	Bu özel yöntem, özellikle dispers boyalar olmak üzere tüm boya türlerinin giderilmesinde etkili olmayabilir.	(Swanckaert vd., 2022)
Işınlama	Laboratuvar ölçeğinde oksidasyon etkin bir şekilde gerçekleştirilir.	Yüksek konsantrasyonda çözünmüş oksijene ihtiyaç vardır.	(Masula vd., 2022)
Elektrokoagülasyon	Ekonomik açıdan uygulanabilir.	Filtrasyon, flokülasyon ve çamur üretimini içeren daha ileri işlemler gereklidir.	(Shahedi vd., 2020)

ADSORPSİYON TEKNOLOJİSİ İLE SUDAN BOYA GİDERİMİ

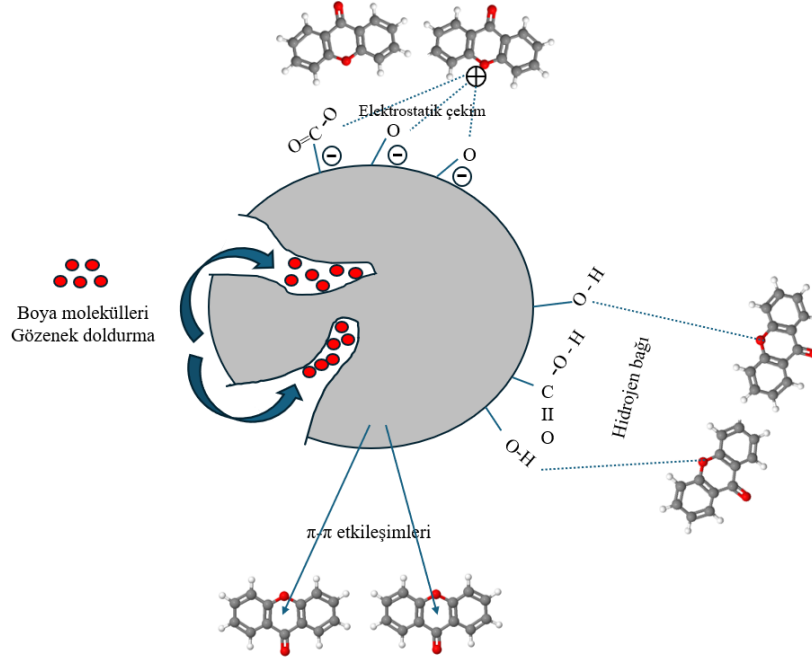
Adsorpsiyon, bir maddenin yüzeyine başka bir maddenin bağlanması sürecidir. Bu süreç, atık sularındaki organik ve inorganik kirleticilerin giderilmesinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Adsorpsiyon yöntemi, kolay erişilebilirliği, ekonomik olması ve daha yüksek oranda kirletici giderimi sağlaması nedeniyle diğer tüm proseslerden daha rekabetçidir. Endüstriyel su arıtma kriterlerini ve tüm standartlarını karşılayan bu tür adsorbanların araştırılması aynı zamanda düşük maliyetli, çevre dostu, yüksek verimliliğe sahip ve büyük ölçekte kullanılabilirliği mümkündür (Dolas, 2023; Yıldız & Yuksel, 2023; Alagha vd., 2020; Sharifi Pajaie vd., 2018; Tang vd., 2017). Boyaların adsorban yüzeyine adsorpsiyonu, hidrojen bağı, π - π etkileşimleri, elektrostatik çekim ve hidrofobik etkileşim gibi çeşitli mekanizmalar tarafından yönetilen bir süreçtir (Şekil 3). Yüzey kompleksleşme mekanizması, iyonların adsorbanın yüzey fonksiyonel gruplarına bağlanmasının yanı sıra adsorban ve adsorbat arasındaki elektrostatik etkileşimi de içerir (Genli vd., 2022; İzgi vd., 2019; Baytar vd., 2018).

Adsorpsiyonu etkileyen faktörler

Adsorpsiyon, bir maddenin yüzeyine başka bir maddenin moleküllerinin veya iyonlarının tutunması sürecidir. Bu süreci etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, adsorpsiyon sürecinin karmaşıklığını ve çeşitliliğini yansıtır. Adsorpsiyonun pratik uygulamalarında, bu faktörlerin dikkate alınması ve kontrol edilmesi önemlidir (Shahir vd., 2020).

Adsorbatın ve Adsorbanın Özellikleri

Adsorbatın özellikleri: Adsorbanın yüzeyine bağlanan moleküllerin yapısal özellikleri, boyutu, yükü, polaritesi ve kimyasal özellikleri adsorpsiyon sürecini etkiler. Adsorbanın özellikleri: Adsorbanın yüzey alanı, yapısal özellikleri, porozite, yüzey kimyası ve yüzey reaktivitesi adsorpsiyon kapasitesini belirler.



Şekil 3. Boya Gideriminde Yer Alan Farklı Adsorpsiyon Mekanizmaları

Sıcaklık

Genellikle, sıcaklık arttıkça fiziksel adsorpsiyon azalırken, kimyasal adsorpsiyon artar. Ancak bu, adsorbat ve adsorbanın özelliklerine ve spesifik adsorpsiyon koşullarına bağlı olarak değişebilir.

Basınç

Fiziksel adsorpsiyon, adsorpsiyon basıncı ile doğrudan ilişkilidir. Basınç arttıkça, adsorpsiyon miktarı artar. Bunun nedeni, artan basıncın adsorbatın yüzeye tutunma eğilimini artırmasıdır.

Adsorpsiyon Ortamı

Adsorpsiyon süreci, adsorbat ve adsorban arasındaki etkileşimlerin yanı sıra ortamın özellikleri tarafından da etkilenir. Örneğin, çözeltideki pH değeri, iyonik kuvvetler, çözücü kimyasal yapısı ve sıcaklık gibi faktörler adsorpsiyon sürecini etkileyebilir.

Yüzey Alanı ve Porozite

Adsorbanın yüzey alanı, adsorpsiyon kapasitesini doğrudan etkiler. Daha yüksek yüzey alanına sahip adsorbanlar, daha fazla adsorbatı çekebilir. Ayrıca, adsorbanın porozitesi, adsorbat moleküllerinin yüzeyine daha fazla erişim sağlayarak adsorpsiyon kapasitesini artırabilir.

Adsorbatın Konsantrasyonu

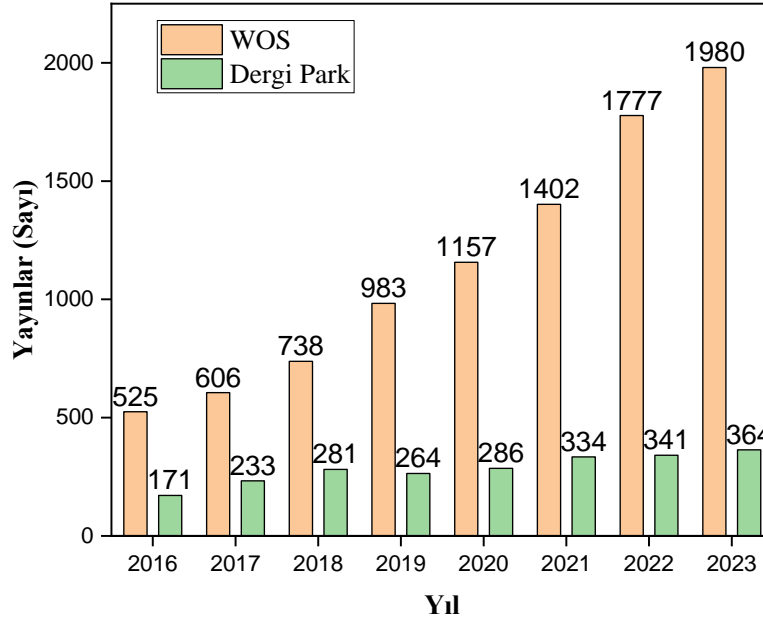
Adsorbatın başlangıç konsantrasyonu, adsorpsiyon sürecinin hızı ve kapasitesi üzerinde belirleyici bir faktördür. Daha yüksek başlangıç konsantrasyonları, daha yüksek adsorpsiyon miktarlarına yol açabilir.

Çözücü Etkisi

Adsorbatın ve adsorbanın çözücü içindeki çözünürlüğü, adsorpsiyon sürecini etkileyebilir. Çözücü, adsorbat ve adsorban arasındaki etkileşimleri değiştirerek adsorpsiyon kapasitesini artırabilir veya azaltabilir.

Boyaların giderilmesi için çeşitli adsorbanlara genel bakış

Şekil 4'te adsorpsiyon teknolojisinin atık su arıtımı alanındaki önemi ve artan kullanımı görülmektedir. 7 yılı kapsayan veriler, araştırmacıların, mühendislerin ve endüstri profesyonellerinin atık sudan kaynaklanan boya kirliliğini azaltmak için adsorpsiyon teknolojisine daha fazla odaklanmaya başladığını göstermektedir. Buna dayanarak, adsorpsiyon teknolojisinin etkinliği ve uygulanabilirliği konusunda artan bir farkındalığı yansıtabilir ve potansiyel olarak gelecekte bu alandaki araştırma ve uygulamalarda daha fazla artışa yol açabileceği söylenebilmektedir.



Şekil 4. Atıksudan Adsorpsiyon İle Boya Giderim Çalışmalarındaki Yayın İstatistikleri (Kaynak: Web of Science (WOS) ve Dergi Park, Anahtar Kelimeler: Atıksu, Boya Giderimi, Adsorpsiyon, Erişim tarihi: 5 Nisan 2024)

Atık sulardan boya giderimi için ticari aktif karbon, iyon değiştirici reçineler, selüloz bazlı malzemeler, ticari aktif alümina, silika jeller vb. gibi farklı adsorbanlar kullanılmaktadır (Alvarado vd., 2020; Aabdullah vd., 2018; Largette & Pasquier, 2016; Li vd., 2011). Tablo 2, farklı adsorbentler kullanılarak maksimum adsorpsiyon kapasiteleri q_{max} (mg/g) hakkında bilgi vermektedir. Veriler, boya adsorpsiyonu için Langmuir izoterm modeli kullanılarak elde edilmiştir.

ELEŞTİRİLER VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Atık sudan boya giderimi için adsorpsiyon teknolojisi, etkinliği ve çok yönlülüğü nedeniyle dikkat çekmiştir. Bununla birlikte, eleştiriler ve zorluklar da yok değildir.

Eleştiriler:

Seçici Adsorpsiyon

Birçok adsorban belirli boyalara karşı seçicilik gösterir ve bu da onları atık sudan çok çeşitli boyaların giderilmesinde daha az etkili hale getirir (Zhou vd., 2019).

Adsorbent Rejenerasyonu

Kullanılmış adsorbentlerin rejenerasyonu enerji yoğun ve maliyetli olabilir, bu da prosesin ekonomik uygulanabilirliğini azaltır (Elfving vd., 2021).

Laboratuvar ölçekli çalışmalar

Literatürdeki çalışmalar umut verici sonuçlar ortaya koysa da adsorpsiyon proseslerinin verimlilik kaybı olmadan endüstriyel seviyelere ölçeklendirilmesi bir zorluk olmaya devam etmektedir (Operti vd., 2021).

Rekabetçi Adsorpsiyon

Atık sudaki diğer kirlenmelerin varlığı, adsorpsiyon bölgeleri için boyalarla rekabet ederek prosesin etkinliğini azaltabilir (Chen vd., 2021).

Tablo 2. Adsorpsiyon ile Atıksudan Boya Giderim Çalışmaları

Adsorbent	Boya	pH	Adsorpsiyon Kapasitesi	Referans
Kitosan Kaplı Pamuk Elyaf Kompozit	Remazol Parlak Kırmızı F3B	7	169.33 mg/g	(Salman vd., 2023)
Amin Fonksiyonlu Karbon Nano Tüpler	Mordant Siyah Boya 11	2	33.33 mg/g	(Qazi vd., 2023)
Mezo Gözenekli Ag-MOF	Malakit Yeşili	8	809.71 mg/g	(Aljohani vd., 2023)
Kitosan Gömülü Kompozit	Metil Oranj	5.5	175.45 mg/g	(Rehan vd., 2023)
Kişniş Bitkilerinden Üretilen Aktif Karbon	Metil Oranj ve Rodamin-6G	2-10	467.29 mg/g ve 143.47 mg/g	(Bhat vd., 2023)
Huş Ağacı Atıklarından Biyoçar	Asit Kırmızısı 18	5.2	545.2 mg/g	(dos Reis vd., 2023)
<i>Prosopis Juliflora</i> kökünden üretilen aktif karbon	Metilen Mavisi	7.07	38.75 mg/g	(Vasiraja vd., 2023)
Manyetik gümüş metal-Organik Nanokompozit	Gentian Menekşe Boyası	9	169 mg/g	(Mogharbel vd., 2023)
Zeolit	Kongo Kırmızı	2-3	666.5 mg/g	(Imessaoudene vd., 2023)
Manyetik Kitosan-Grafen Oksit Nanokompoziti	Safranin-O ve İndigo Karmin	3-7	112.6 ve 66.15 mg/g	(M. A. Ahmed vd., 2023)
Karbon@Sepiyolit Kompozitleri	Malakit Yeşili	6	1198.67 mg/g	(Largo vd., 2023)
Hurma Tohumlarından Üretilen Aktif Karbon	Metil Turuncu	8	7.57 mg/g	(Alardhi vd., 2023)
Kahve Telvesi ile Hazırlanan Selüloz ve Sodyum Aljinattan Jel Boncuklar	Metilen Mavisi ve Kongo Kırmızısı	6-2	400.50 ve 411.45 mg/g	(Kasbaji vd., 2023)

Adsorbanların Çevresel Etkisi

Yaygın olarak kullanılan bazı adsorbanların, üretim veya bertaraf sırasında çevresel etkileri olabilir (Kozyatnyk vd., 2020).

Gelecek Perspektifleri:

Nanoteknoloji

Nanomalzemelerin geliştirilmesi, seçici boya giderimi için geniş yüzey alanlarına ve özel özelliklere sahip yüksek verimli adsorbanlar için potansiyel sunmaktadır (Homaeigohar, 2020).

Hibrit Sistemler

Adsorpsiyonun membran filtrasyonu veya gelişmiş oksidasyon prosesleri gibi diğer arıtma yöntemleriyle entegre edilmesi genel verimliliği ve çok yönlülüğü artırabilir (S. F. Ahmed vd., 2021).

Yeşil Adsorbanlar

Tarımsal atık, biyokömür veya yenilenebilir kaynaklardan elde edilen aktif karbon gibi doğal ve sürdürülebilir malzemelerin adsorban olarak kullanılması çevresel kaygıları azaltabilir (Crini vd., 2019).

Proses Optimizasyonu

pH, sıcaklık, adsorban dozajı ve temas süresi gibi adsorpsiyon parametrelerinin optimize edilmesine yönelik araştırmaların sürdürülmesi verimliliği artırabilir ve işletme maliyetlerini azaltabilir (Azari vd., 2023).

Rejenerasyon Teknikleri

Kullanılmış adsorbanların rejenerasyonu için uygun maliyetli ve çevre dostu yöntemlerin geliştirilmesi, adsorpsiyon proseslerinin sürdürülebilirliğini artıracaktır (Baskar vd., 2022).

SONUÇ ve ÖNERİLER

Atık su arıtımı, çevresel sürdürülebilirlik ve insan sağlığı açısından kritik öneme sahiptir, özellikle de endüstriyel faaliyetlerin neden olduğu kirlilik göz önüne alındığında. Boyahaneler gibi endüstriyel tesisler, kullanılan

kimyasalların türü ve miktarı nedeniyle atık suların yoğun bir şekilde kirletilmesine neden olur. Bu nedenle, etkili arıtma teknolojileri ve süreçleri, çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek için kritik öneme sahiptir. Adsorpsiyon teknolojisi, boyahane atık sularının arıtılmasında etkili bir rol oynamaktadır. Ancak, gelecekte daha da ileriye gitmek için çeşitli fırsatlar ve beklentiler bulunmaktadır. Daha etkili adsorbanların geliştirilmesi, ileri adsorpsiyon proseslerinin benimsenmesi ve dijitalleşmenin artması gibi faktörler, atık su arıtımında önemli gelişmeler sağlayacaktır. Bu gelişmelerle birlikte, gelecekte atık su arıtımı alanında daha sürdürülebilir ve ekonomik çözümler beklenmektedir. Bu çözümler hem çevresel hem de ekonomik açıdan endüstrinin daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine katkıda bulunacaktır. Ayrıca, bu teknolojilerin yaygınlaşması ve benimsenmesi, küresel çapta su kaynaklarının korunmasına ve gelecek nesillere temiz bir çevre bırakılmasına yardımcı olacaktır. Sonuç olarak, adsorpsiyon teknolojisinin atık su arıtımında mevcut ve gelecekteki rolü büyük öneme sahiptir. Sürekli olarak gelişen bu teknoloji, endüstriyel atık suların daha etkili bir şekilde arıtılmasını sağlayarak çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmaya yardımcı olacaktır. Bu doğrultuda, araştırma ve yenilikçilik çabalarının devam etmesi ve uluslararası iş birliğinin artması önemlidir, böylece atık su arıtımında daha sürdürülebilir ve geleceğe yönelik çözümler bulunabilir. Bu çalışmada, boyahane atık sularının arıtılmasında adsorpsiyon teknolojisinin önemli bir rol oynayacağını göstermektedir. Ancak, bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmalarının devam etmesi ve endüstriyel uygulamalarda yeniliklerin benimsenmesi gerekmektedir. Bu sayede, gelecek nesillerin daha temiz bir çevrede yaşamasına ve doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunulabilir.

KAYNAKLAR

- Adeleye, A. T., Bahar, M. M., Megharaj, M., & Rahman, M. M. (2023). Recent developments and mechanistic insights on adsorption technology for micro- and nanoplastics removal in aquatic environments. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103777. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103777>
- Ahmed, M. A., Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2023). Synthesis, characterization and application of chitosan/graphene oxide/copper ferrite nanocomposite for the adsorptive removal of anionic and cationic dyes from wastewater. *RSC Advances*, 13(8), 5337–5352. <https://doi.org/10.1039/D2RA07883J>
- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Uddin, M. A., Inayat, A., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chia, W. Y., & Show, P. L. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125912. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>
- Al-Asheh, S., Bagheri, M., & Aidan, A. (2021). Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100109>
- Alagha, O., Manzar, M. S., Zubair, M., Anil, I., Mu'azu, N. D., & Qureshi, A. (2020). Magnetic Mg-Fe/LDH Intercalated Activated Carbon Composites for Nitrate and Phosphate Removal from Wastewater: Insight into Behavior and Mechanisms. *Nanomaterials*, 10(7), 1361. <https://doi.org/10.3390/nano10071361>
- Alardhi, S. M., Fiyadh, S. S., Salman, A. D., & Adelikhah, M. (2023). Prediction of methyl orange dye (MO) adsorption using activated carbon with an artificial neural network optimization modeling. *Heliyon*, 9(1), e12888. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12888>
- Aljohani, M. M., Al-Qahtani, S. D., Alshareef, M., El-Desouky, M. G., El-Bindary, A. A., El-Metwaly, N. M., & El-Bindary, M. A. (2023). Highly efficient adsorption and removal bio-staining dye from industrial wastewater onto mesoporous Ag-MOFs. *Process Safety and Environmental Protection*, 172, 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.036>
- Arslan, D. Ş., Ertap, H., Şenol, Z. M., El Messaoudi, N., & Mehmeti, V. (2024). Preparation of Polyacrylamide Titanium Dioxide Hybrid Nanocomposite by Direct Polymerization and Its Applicability in Removing Crystal Violet from Aqueous Solution. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(2), 573–587. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03004-8>
- Azari, A., Nabizadeh, R., Mahvi, A. H., & Nasser, S. (2023). Magnetic multi-walled carbon nanotubes-loaded alginate for treatment of industrial dye manufacturing effluent: adsorption modelling and process optimisation by central composite face-central design. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(7), 1509–1529. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1877279>
- Azimi, B., Abdollahzadeh-Sharghi, E., & Bonakdarpour, B. (2021). Anaerobic-aerobic processes for the treatment of textile dyeing wastewater containing three commercial reactive azo dyes: Effect of number of stages and bioreactor type. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 39, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.10.006>

- Baskar, A. V., Bolan, N., Hoang, S. A., Sooriyakumar, P., Kumar, M., Singh, L., Jasemizad, T., Padhye, L. P., Singh, G., Vinu, A., Sarkar, B., Kirkham, M. B., Rinklebe, J., Wang, S., Wang, H., Balasubramanian, R., & Siddique, K. H. M. (2022). Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review. *Science of The Total Environment*, 822, 153555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153555>
- Baytar, O., Şahin, Ö., Saka, C., & Ağrak, S. (2018). Characterization of Microwave and Conventional Heating on the Pyrolysis of Pistachio Shells for the Adsorption of Methylene Blue and Iodine. *Analytical Letters*, 51(14), 2205–2220. <https://doi.org/10.1080/00032719.2017.1415920>
- Bhat, S., Uthappa, U. T., Sadhasivam, T., Altalhi, T., Soo Han, S., & Kurkuri, M. D. (2023). Abundant cilantro derived high surface area activated carbon (AC) for superior adsorption performances of cationic/anionic dyes and supercapacitor application. *Chemical Engineering Journal*, 459, 141577. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141577>
- Bonetta, S., Pignata, C., Bonetta, S., Amagliani, G., Brandi, G., Gilli, G., & Carraro, E. (2021). Comparison of UV, Peracetic Acid and Sodium Hypochlorite Treatment in the Disinfection of Urban Wastewater. *Pathogens*, 10(2), 182. <https://doi.org/10.3390/pathogens10020182>
- Chen, Q., Zhang, Q., Yang, Y., Wang, Q., He, Y., & Dong, N. (2021). Synergetic effect on methylene blue adsorption to biochar with gentian violet in dyeing and printing wastewater under competitive adsorption mechanism. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101099. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101099>
- Chequer, F. M. D., Angeli, J. P. F., Ferraz, E. R. A., Tsuboy, M. S., Marcarini, J. C., Mantovani, M. S., & de Oliveira, D. P. (2009). The azo dyes Disperse Red 1 and Disperse Orange 1 increase the micronuclei frequencies in human lymphocytes and in HepG2 cells. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 676(1–2), 83–86. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2009.04.004>
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D., & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195–213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>
- da Silva, A. F. V., da Silva, J., Vicente, R., Ambrosi, A., Zin, G., Di Luccio, M., & de Oliveira, J. V. (2023). Recent advances in surface modification using polydopamine for the development of photocatalytic membranes for oily wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103743. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103743>
- Daverey, A., Pandey, D., Verma, P., Verma, S., Shah, V., Dutta, K., & Arunachalam, K. (2019). Recent advances in energy efficient biological treatment of municipal wastewater. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100252>
- Deniz, F., & Yıldız, H. (2019a). Bioremediation potential of a widespread industrial biowaste as renewable and sustainable biosorbent for synthetic dye pollution. *International Journal of Phytoremediation*, 21(3), 259–267. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1524451>
- Deniz, F., & Yıldız, H. (2019b). Taguchi DoE methodology for modeling of synthetic dye biosorption from aqueous effluents: parametric and phenomenological studies. *International Journal of Phytoremediation*, 21(11), 1065–1071. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1594687>
- Dinçer, A. R. (2020). Increasing BOD5/COD ratio of non-biodegradable compound (reactive black 5) with ozone and catalase enzyme combination. *SN Applied Sciences*, 2(4), 736. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2557-y>
- Dolas, H. (2023). Activated carbon synthesis and methylene blue adsorption from pepper stem using microwave assisted impregnation method: Isotherm and kinetics. *Journal of King Saud University - Science*, 35(3), 102559. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102559>
- dos Reis, G. S., Bergna, D., Grimm, A., Lima, E. C., Hu, T., Naushad, M., & Lassi, U. (2023). Preparation of highly porous nitrogen-doped biochar derived from birch tree wastes with superior dye removal performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 669, 131493. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131493>
- Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S. K., & Gupta, A. K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: a critical review. *Materials Advances*, 2(14), 4497–4531. <https://doi.org/10.1039/D1MA00354B>
- El Messaoudi, N., Çiğeroğlu, Z., Şenol, Z. M., Bouich, A., Kazan-Kaya, E. S., Noureen, L., & Américo-Pinheiro, J. H. P. (2024). *Green synthesis of nanoparticles for remediation organic pollutants in wastewater by adsorption (ss.*

305–345). <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2023.06.016>

Elfving, J., Kauppinen, J., Jegoroff, M., Ruuskanen, V., Järvinen, L., & Sainio, T. (2021). Experimental comparison of regeneration methods for CO₂ concentration from air using amine-based adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 404, 126337. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126337>

Feuzer-Matos, A. J., Testolin, R. C., Pimentel-Almeida, W., Radetski-Silva, R., Deomar-Simões, M. J., Poyer-Radetski, L., Ariento-Neto, R., Batista-Barwinski, M. J., Somensi, C. A., & Radetski, C. M. (2022). Treatment of Wastewater Containing New and Non-biodegradable Textile Dyes: Efficacy of Combined Advanced Oxidation and Adsorption Processes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(7), 273. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05751-1>

Fiyadh, S. S., Alardhi, S. M., Al Omar, M., Aljumaily, M. M., Al Saadi, M. A., Fayaed, S. S., Ahmed, S. N., Salman, A. D., Abdalsalm, A. H., Jabbar, N. M., & El-Shafi, A. (2023). A comprehensive review on modelling the adsorption process for heavy metal removal from waste water using artificial neural network technique. *Heliyon*, 9(4), e15455. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15455>

Genli, N., Kutluay, S., Baytar, O., & Şahin, Ö. (2022). Preparation and characterization of activated carbon from hydrochar by hydrothermal carbonization of chickpea stem: an application in methylene blue removal by RSM optimization. *International Journal of Phytoremediation*, 24(1), 88–100. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1926911>

Ghernaout, D., Elboughdiri, N., & Ghareba, S. (2020). Fenton Technology for Wastewater Treatment: Dares and Trends. *OALib*, 07(01), 1–26. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106045>

Gupta, S. A., Vishesh, Y., Sarvshrestha, N., Bhardwaj, A. S., Kumar, P. A., Topare, N. S., Raut-Jadhav, S., Bokil, S. A., & Khan, A. (2021). Adsorption isotherm studies of Methylene blue using activated carbon of waste fruit peel as an adsorbent. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.044>

Han, Y., Yang, L., Chen, X., Cai, Y., Zhang, X., Qian, M., Chen, X., Zhao, H., Sheng, M., Cao, G., & Shen, G. (2020). Removal of veterinary antibiotics from swine wastewater using anaerobic and aerobic biodegradation. *Science of The Total Environment*, 709, 136094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136094>

Homaeigohar, S. (2020). The Nanosized Dye Adsorbents for Water Treatment. *Nanomaterials*, 10(2), 295. <https://doi.org/10.3390/nano10020295>

Hube, S., Eskafi, M., Hrafnkelsdóttir, K. F., Bjarnadóttir, B., Bjarnadóttir, M. Á., Axelsdóttir, S., & Wu, B. (2020). Direct membrane filtration for wastewater treatment and resource recovery: A review. *Science of The Total Environment*, 710, 136375. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136375>

Imessaoudene, A., Cheikh, S., Hadadi, A., Hamri, N., Bollinger, J.-C., Amrane, A., Tahraoui, H., Manseri, A., & Mouni, L. (2023). Adsorption Performance of Zeolite for the Removal of Congo Red Dye: Factorial Design Experiments, Kinetic, and Equilibrium Studies. *Separations*, 10(1), 57. <https://doi.org/10.3390/separations10010057>

İzgi, M. S., Saka, C., Baytar, O., Saraçoğlu, G., & Şahin, Ö. (2019). Preparation and Characterization of Activated Carbon from Microwave and Conventional Heated Almond Shells Using Phosphoric Acid Activation. *Analytical Letters*, 52(5), 772–789. <https://doi.org/10.1080/00032719.2018.1495223>

Karcher, S., Kornmüller, A., & Jekel, M. (2002). Anion exchange resins for removal of reactive dyes from textile wastewaters. *Water Research*, 36(19), 4717–4724. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00195-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00195-1)

Kasbaji, M., Mennani, M., Grimi, N., Oubenali, M., Mbarki, M., EL Zakhem, H., & Moubarik, A. (2023). Adsorption of cationic and anionic dyes onto coffee grounds cellulose/sodium alginate double-network hydrogel beads: Isotherm analysis and recyclability performance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, 124288. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124288>

Kausar, A., Zohra, S. T., Ijaz, S., Iqbal, M., Iqbal, J., Bibi, I., Nouren, S., El Messaoudi, N., & Nazir, A. (2023). Cellulose-based materials and their adsorptive removal efficiency for dyes: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 1337–1355. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.220>

Key, S., Ryan, P. G., Gabbott, S. E., Allen, J., & Abbott, A. P. (2024). Influence of colourants on environmental degradation of plastic litter. *Environmental Pollution*, 347, 123701. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123701>

khalidi-idrissi, A., Madinzi, A., Anouzla, A., Pala, A., Mouhir, L., Kadmi, Y., & Souabi, S. (2023). Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial

- discharges. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10), 11719–11740. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04867-z>
- Kozyatnyk, I., Yacout, D. M. M., Van Caneghem, J., & Jansson, S. (2020). Comparative environmental assessment of end-of-life carbonaceous water treatment adsorbents. *Bioresource Technology*, 302, 122866. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122866>
- Kumari, P., & Kumar, A. (2023). ADVANCED OXIDATION PROCESS: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant. *Results in Surfaces and Interfaces*, 11, 100122. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100122>
- Largitte, L., & Pasquier, R. (2016). A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.006>
- Largo, F., Haounati, R., Ouachtak, H., Hafid, N., Jada, A., & Addi, A. A. (2023). Design of organically modified sepiolite and its use as adsorbent for hazardous Malachite Green dye removal from water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(3), 183. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06185-z>
- Lim, S., Shi, J. L., von Gunten, U., & McCurry, D. L. (2022). Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review. *Water Research*, 213, 118053. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118053>
- Masula, K., Bhongiri, Y., Raghav Rao, G., Vijay Kumar, P., Pola, S., & Basude, M. (2022). Evolution of photocatalytic activity of CeO₂–Bi₂O₃ composite material for wastewater degradation under visible-light irradiation. *Optical Materials*, 126, 112201. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112201>
- Mogharbel, R. T., Alkhamis, K., Felaly, R., El-Desouky, M. G., El-Bindary, A. A., El-Metwaly, N. M., & El-Bindary, M. A. (2023). Superior adsorption and removal of industrial dye from aqueous solution via magnetic silver metal-organic framework nanocomposite. *Environmental Technology*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2178331>
- Operti, M. C., Bernhardt, A., Grimm, S., Engel, A., Figdor, C. G., & Tagit, O. (2021). PLGA-based nanomedicines manufacturing: Technologies overview and challenges in industrial scale-up. *International Journal of Pharmaceutics*, 605, 120807. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120807>
- Othmani, A., Kesraoui, A., Boada, R., Seffen, M., & Valiente, M. (2019). Textile Wastewater Purification Using an Elaborated Biosorbent Hybrid Material (Luffa–Cylindrica–Zinc Oxide) Assisted by Alternating Current. *Water*, 11(7), 1326. <https://doi.org/10.3390/w11071326>
- Qazi, R. A., Ullah, N., Bibi, N., Khattak, R., Jamila, N., Begum, B., Aman, N., Rahayu, F., & Karami, A. M. (2023). Amine-Functionalized MWCNTs for the Removal of Mordant Black 11 Dye. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(10), 644. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06662-5>
- Quansah, J. O., Hlaing, T., Lyonga, F. N., Kyi, P. P., Hong, S.-H., Lee, C.-G., & Park, S.-J. (2020). Nascent Rice Husk as an Adsorbent for Removing Cationic Dyes from Textile Wastewater. *Applied Sciences*, 10(10), 3437. <https://doi.org/10.3390/app10103437>
- Rajoria, S., Vashishtha, M., & Sangal, V. K. (2021). Review on the treatment of electroplating industry wastewater by electrochemical methods. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1472–1479. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.165>
- Rehan, A. I., Rasee, A. I., Awual, M. E., Waliullah, R. M., Hossain, M. S., Kubra, K. T., Salman, M. S., Hasan, M. M., Hasan, M. N., Sheikh, M. C., Marwani, H. M., Khaleque, M. A., Islam, A., & Awual, M. R. (2023). Improving toxic dye removal and remediation using novel nanocomposite fibrous adsorbent. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 673, 131859. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131859>
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)
- Salman, M. S., Sheikh, M. C., Hasan, M. M., Hasan, M. N., Kubra, K. T., Rehan, A. I., Awual, M. E., Rasee, A. I., Waliullah, R. M., Hossain, M. S., Khaleque, M. A., Alsukaibi, A. K. D., Alshammari, H. M., & Awual, M. R. (2023). Chitosan-coated cotton fiber composite for efficient toxic dye encapsulation from aqueous media. *Applied Surface Science*, 622, 157008. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157008>

- Samsami, S., Mohamadizani, M., Sarrafzadeh, M.-H., Rene, E. R., & Firoozbahr, M. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 138–163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>
- Sasmaz, M., Senel, G. U., & Obek, E. (2021). Boron Bioaccumulation by the Dominant Macrophytes Grown in Various Discharge Water Environments. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 106(6), 1050–1058. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03222-7>
- Shabir, F., Sultan, M., Miyazaki, T., Saha, B. B., Askalany, A., Ali, I., Zhou, Y., Ahmad, R., & Shamshiri, R. R. (2020). Recent updates on the adsorption capacities of adsorbent-adsorbate pairs for heat transformation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109630. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109630>
- Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 22, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.05.009>
- Sharifi Pajaie, S. H., Archin, S., & Asadpour, G. (2018). Optimization of Process Parameters by Response Surface Methodology for Methylene Blue Removal Using Cellulose Dusts. *Civil Engineering Journal*, 4(3), 620. <https://doi.org/10.28991/cej-0309121>
- Sharma, J., Sharma, S., & Soni, V. (2021). Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review. *Regional Studies in Marine Science*, 45, 101802. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101802>
- Suzuki, M., Suzuki, Y., Uzuka, K., & Kawase, Y. (2020). Biological treatment of non-biodegradable azo-dye enhanced by zero-valent iron (ZVI) pre-treatment. *Chemosphere*, 259, 127470. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127470>
- Swanckaert, B., Geltmeyer, J., Rabaey, K., De Buysser, K., Bonin, L., & De Clerck, K. (2022). A review on ion-exchange nanofiber membranes: properties, structure and application in electrochemical (waste)water treatment. *Separation and Purification Technology*, 287, 120529. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120529>
- Tang, R., Dai, C., Li, C., Liu, W., Gao, S., & Wang, C. (2017). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Agricultural Residue Walnut Shell: Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies. *Journal of Chemistry*, 2017, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2017/8404965>
- United Nations. (2019). *World Population Prospects 2019 Highlights*.
- Vasiraja, N., Saravana Sathiyar Prabhakar, R., & Joshua, A. (2023). Preparation and Physio-Chemical characterisation of activated carbon derived from prosopis juliflora stem for the removal of methylene blue dye and heavy metal containing textile industry effluent. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136579>
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- Yildiz, H., Gülşen, H., Şahin, Ö., Baytar, O., & Kutluay, S. (2023). Novel adsorbent for malachite green from okra stalks waste: synthesis, kinetics and equilibrium studies. *International Journal of Phytoremediation*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2243621>
- Yildiz, H., & Yuksel, A. Y. (2023). Novel Adsorbent for Methylene Blue from Waste Fish Scales (Cyprinus Carpio): Kinetics and Equilibrium Studies. *Environmental Engineering and Management Journal*, 22(6), 1073–1080. <https://doi.org/10.30638/eemj.2023.088>
- Yildiz, H., & Yuksel, A. Y. (2024). A novel biosorbent material from waste fish scales (Cyprinus carpio) for biosorption of toxic dyes in aquatic environments. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05900-y>
- Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. *Environmental Pollution*, 252, 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>