

KABAK ÇEKİRDEĞİ KABUĞU ATIKLARI KULLANILARAK SULU ÇÖZELTİLERDEN REAKTİF BOYA GİDERİMİ

Kimyager Umut ALTINKILIÇ¹/ Dr. Öğr. Üye. Hülya SİLAH²

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gülümbe Kampüsü/BİLECİK, Kimya,
3207054@ogrenci.bilecik.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0006-3197-4352>

²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü/Kimya Ana Bilim Dalı, Gülümbe
Kampüsü/BİLECİK, Kimya, hulya.mercan@bilecik.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-9763-2925>

Özet

Su yeryüzü üzerinde tüm canlılar için hayati öneme sahip doğal kaynaklardan biridir. Ancak son yüzyılda gerçekleşen hızlı sanayileşme ve kentleşme faaliyetleri çok farklı tür ve yapıdaki kirleticileri içeren atık suların büyük miktarlarda oluşumuna neden olmaktadır. Özellikle tekstil, plastik, deri, kozmetik, gıda işleme, kağıt, baskı ve ilaç gibi çeşitli endüstrilerden kaynaklı ortaya çıkan atık sularda çok çeşitli boya atıkları ve bunların parçalanma ürünleri bulunmaktadır. Sanayi faaliyetlerinde kullanılan boyalar genellikle sentetik ve karmaşık kimyasal yapıya sahip olmalarından dolayı ışık, yükseltgenme ve biyolojik bozunmaya karşı dirençlidirler. Kullanılabilir temiz suyun dünya çapında azalması sonucu ortaya çıkan su problemi yeşil kimya faaliyetlerinin su arıtımına yönelmesini zorunlu kılmaktadır. Tekstil atık sularından kirleticilerin gideriminde kullanılan en yaygın proses adsorpsiyondur. Ancak, literatür çalışmaları göstermektedir ki, yöntemin en büyük dezavantajı kullanılan adsorbent yüksek maliyetli oluşudur. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada tekstil atık sularında bulunan ve ülkemiz tekstil sanayinde yaygın bir şekilde kullanılan reaktif Remazol Brilliant Blue R boyasının giderimi araştırılmıştır. Çalışmada adsorbent olarak bitkisel bir atık olan ve ucuz bir şekilde kolayca elde edilebilecek kabak çekirdeği kabuğunun uygunluğu incelenmiştir. Remazol Brilliant Blue R'nin önerilen adsorbent ile adsorpsiyonunda; pH, Remazol Brilliant Blue R başlangıç konsantrasyonu, adsorbent miktarı, karıştırma süresi gibi adsorpsiyon parametreleri incelenmiş ve optimum deneysel koşullar saptanmıştır. Elde edilen bulgular Remazol Brilliant Blue R boyasının tekstil atık suyundan arıtılmasında kabak kabuğu çekirdeği atığının uygun, düşük maliyetli ve çevre dostu bir adsorbent olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Remazol Brilliant Blue R, adsorpsiyon, reaktif boya

REMOVAL OF REACTIVE DYE FROM AQUEOUS SOLUTIONS USING PUMPKIN SEED SHELL WASTE

Abstract

Water is one of the natural resources that is vital for all living things on earth. However, rapid industrialization and urbanization activities that have taken place in the last century have caused the formation of large amounts of wastewater containing pollutants of very different types and structures. In particular, wastewater originating from various industries such as textile, plastic, leather, cosmetics, food processing, paper, printing and pharmaceuticals contains a wide variety of dye wastes and their degradation products. Dyes used in industrial activities are generally resistant to light, oxidation and biological degradation due to their synthetic and complex chemical structure. The water problem that has emerged as a result of the decrease in usable clean water worldwide necessitates the orientation of green chemistry activities towards water treatment. The most common process used in the removal of pollutants from textile wastewater is adsorption. However, literature studies show that the biggest disadvantage of the method is the high cost of the adsorbent used. In the experimental study conducted, the removal of the reactive Remazol Brilliant Blue R dye, which is found in textile wastewater and is widely used in our country's textile industry, was investigated. In the study, the suitability of pumpkin seed shell, which is a plant waste and can be easily obtained cheaply, as an adsorbent was investigated. In the adsorption of Remazol Brilliant Blue R with the proposed adsorbent; adsorption parameters such as pH, Remazol Brilliant Blue R initial concentration, adsorbent amount, mixing time were investigated and optimum experimental conditions were determined. The findings showed that pumpkin seed shell waste is a suitable, low-cost and environmentally friendly adsorbent in the treatment of Remazol Brilliant Blue R dye from textile wastewater.

Keywords: Remazol Brilliant Blue R, adsorption, reactive dye

1. GİRİŞ

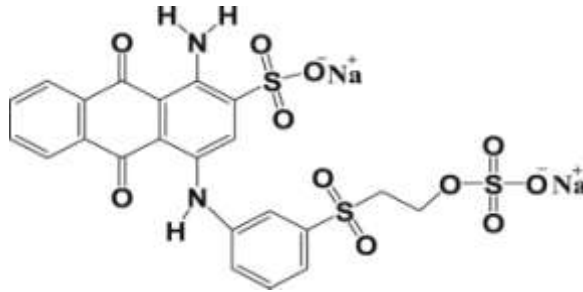
Arıtılmamış atık suların nehir, göl ve deniz gibi su ortamlarına deşarj edilmesi bu ekosistemlerde yaşayan tüm canlıları olumsuz etkiler. Atık sular; ağır metaller, boyalar, pestisitler, plastikler, uçucu organik bileşikler, ilaçlar ve çeşitli mikroorganizmalar dahil olmak üzere farklı toksik maddeleri içerirler. Bu kirletici türlerin tehlikesi, toksisitelerine ve zaman içinde çevrede birikme derecelerine bağlıdır. Bu kirleticilerin birçoğunun kimyasal veya biyolojik bozunmaya karşı dirençli olmasının yanı sıra, besin zincirinde yüksek çevresel akışkanlığa ve biyolojik birikime sahip olması, içme suyu ve yaşam suyu kıtlığının birçok bölgeyi ilgilendiren acil bir sorun haline gelmesine neden olmuştur. 4 milyar insanın su kıtlığı bölgelerinde yaşadığı ve bu nedenle 500 milyondan fazla insanın yıl boyunca ciddi şekilde etkilendiği tahmin edilmektedir. Sonuç olarak, temiz ve güvenli bir çevre sağlamak için bu kirletici türleri içeren atık suları deşarj etmeden önce yerinde arıtmak amacıyla etkili yöntemler tasarlamak ve uygulamak zorunludur (Dehghani vd., 2024; Jiao vd., 2024).

Günümüzde atık suların arıtılması için kimyasal çöktürme, sedimantasyon, flokülasyon, koagülasyon, iyon değişimi, membran filtrasyonu, ultrafiltrasyon, ozonlama, fotokataliz, elektrokimyasal iyileştirme, biyoremediasyon, elektrokoagülasyon, fotokimyasal bozunma, adsorpsiyon (Mosaffa vd., 2024; Khezami vd., 2024) vb. çeşitli yaklaşımlar ve yöntemler uygulanmıştır. Tüm bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları değerlendirildiğinde adsorpsiyon prosesi çok etkili, düşük maliyetli, yüksek giderim kapasiteli ve kolay olarak uygulanabilen bir teknik olarak kabul edilmektedir (Pavithra vd., 2019). En önemli avantajı ise, adsorpsiyonun bazı durumlarda geri dönüşümlü bir işlem olmasıdır. Bu şekilde adsorbentler geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir. Aktif karbon, zeolitler, silika, aktifleştirilmiş alüminyum gibi farklı adsorbentler, atık sulardan ağır metalleri, boyaları ve diğer kirleticileri gidermek için su arıtma uygulanabilirlikleri açısından literatürde araştırılmış ve raporlanmıştır. Ancak bu adsorbentlerin bazılarının senteziyle ilişkili yüksek maliyet ve geri dönüşümünün zorluğu, su arıtımında kullanımlarını sınırlamaktadır (Youness vd., 2024). Son yıllarda karbon bazlı malzemelerin ve özellikle biyokütle bazlı adsorbentlerin kullanılmaya başlanması ile birlikte bu sorun ortadan kalkmaktadır (Aragaw ve Bogale, 2021).

Kumaşların ve yüzeylerin rengini vermek veya değiştirmek için kullanılan organik bileşiklere boyalar denir (Yagub vd., 2014). Bunlar, gerekli rengi oluşturmak için fiziksel ve kimyasal yollarla metal iyonları veya tuzlarıyla birleşme yeteneğine sahip kimyasal bileşiklerdir (Vishnu vd., 2022). Boyalar doğal ürünlerden elde edilebileceği gibi sentetik kökenli de olabilir. Su kütlelerine muazzam miktarda boya atığının deşarjı önemli

çevre ve sağlık sorunlarının oluşumuna neden olur. Tekstil endüstrisi (%54), boyama endüstrisi (%21), kağıt hamuru ve kağıt endüstrisi (%10), tabaklama ve boya endüstrisi (%8) ve boya imalat endüstrisi (%7), çevreye boya içeren atıkların yayılmasına neden olan endüstriler arasında sayılabilir (Katheresan vd., 2018). Sentetik boyalar organik moleküllerden üretilir. Bunlar sentetik kaynaklardan, yani kimyasallardan, toprak minerallerinden ve petrol yan ürünlerinden üretilir. Boyaya renk veren kromoforlardan ve rengi yoğunlaştıran okzokromlardan oluşurlar (Cai vd., 2017). Bunlar boyalara karmaşık bir yapı ve kararlı bir konformasyon kazandırır. Bu nedenle bozunmaya karşı dirençlidirler ve çevrede birikme eğilimi gösterirler (Bhatt vd., 2012). Boyalar kimyasal yapılarına göre azo boya, antrakinon boya, indigoid boya, ftalosiyanın, nitro/nitrozo boya ve kükürt boya olarak sınıflandırılabilir. Substratlara uygulanma şekline göre boyalar genel olarak asidik boya, bazik boya, reaktif boya, vat boya, dispers boya ve direkt boya olarak sınıflandırılır (Gürses vd., 2016; Athira ve Sumi, 2024).

Sentetik boyalar tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılır ve Remazol Brilliant Blue R en sık kullanılan sentetik boyalardan biridir. Remazol Brilliant Blue R, kumaşlarda canlı ve uzun ömürlü mavi renk üretme yeteneği nedeniyle seçilen sentetik bir boyadır. Ancak, su ekosistemleri için toksik olduğu bilinen, canlı organizmalar için tehdit oluşturan, cilt hastalıklarına neden olabilen ve ayrıca kanserojen ve mutajenik özelliklere sahip reaktif boyalar kategorisine girer (Kurnia vd., 2023; Yaacoubi ve Songlin, 2019). Remazol Brilliant Blue R boyasının kimyasal yapısı **Şekil 1**'de verilmektedir.



Şekil 1. Remazol Brilliant Blue R boyasının kimyasal yapısı

Bu çalışmanın amacı yaygın olarak karşılaşılan ve büyük miktarlarda elde edilen kabak çekirdeği kabuğu tozunun tekstil uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Remazol Brilliant Blue R boyasının adsorpsiyon tekniği ile giderilmesinde adsorbent olarak uygulanabilirliğinin incelenmesidir. Konu kapsamında

gerçekleştirilen literatür araştırmaları sonucunda Remazol Brilliant Blue R boyasının adsorpsiyonu ile ilgili olarak kabak çekirdeği kabuğu tozunun adsorbent olarak kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda kabak çekirdeği kabukları toplanarak sıcak su ile yıkanmış, ardından etüvde 90 °C’de 3 saat boyunca kurutulmuştur. Kurumuş kabak çekirdeği kabukları ise parçacık boyutunun küçülmesi ve homojenliğin sağlanması için öğütölmüştür.

2.2. Remazol Brilliant Blue R Çözeltisinin Hazırlanması

Deneysel çalışma kapsamında sulu ortamdan giderimi araştırılan ve suda çözünen bir boya olan Remazol Brilliant Blue R; Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Remazol Brilliant Blue R’nin 5000 ppm’lik stok çözeltisi saf suda günlük olarak taze hazırlanmıştır. Remazol Brilliant Blue R çözeltilerinin pH’ları ise 0.1 M HCl ve 0.1 M NaOH kullanılarak ayarlanmıştır.

2.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar

Hassas terazi: Deneysel çalışmalarda kullanılan analitik terazi Shimadzu markadır. Remazol Brilliant Blue R ve kabak çekirdeği kabuğu adsorbentinin tartım işlemlerinde kullanılmıştır.

UV-Vis Spektrofotometre: Sulu çözeltilerdeki Remazol Brilliant Blue R miktarı T80 UV/VIS Spectrometer PG Instruments marka spektrofotometre kullanılarak ölçölmüştür.

pH metre: pH ölçümleri Hanna instruments HI 2211 pH / ORP model dijital pH metre kullanılarak yapılmıştır.

Santrifüj: Adsorpsiyon süresi sonunda alınan numunelerdeki kabak çekirdeği kabuğu tozunun çöktürölmesi amacıyla kullanılmıştır.

Çok noktalı manyetik karıştırıcı: Adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan manyetik karıştırıcı 8 noktalı Daihan marka MS-MP8 modeldir.

2.4. Deneysel Yöntem

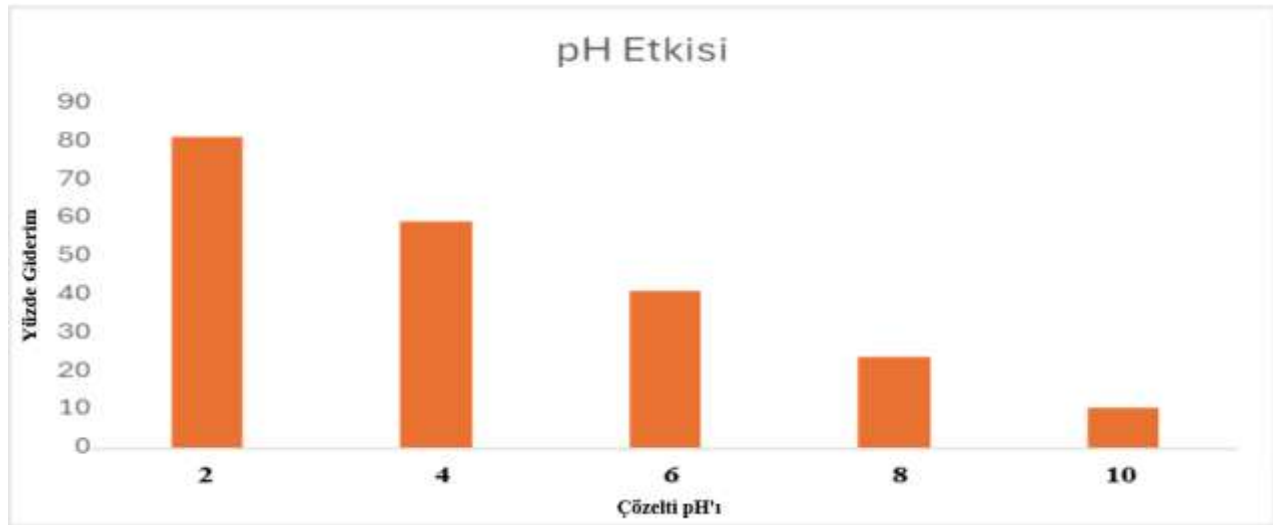
Yapılan deneysel çalışmada ilk olarak stok Remazol Brilliant Blue R çözeltisi hazırlanmıştır. Adsorpsiyon deneyleri belirli derişimlerde 100 mL’lik Remazol Brilliant Blue R çözeltisinin 0.1 g kabak çekirdeği kabuğu

tozunun kullanılmasıyla farklı pH ve belirli temas sürelerinde karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon süreci sonunda çözelti 4000 rpm'de 5 dakika santrifüjlenmiş, çözelti fazından mikro pipet yardımı ile alınan örnekler değişik oranlarda saf su ile seyreltikten sonra çözeltideki Remazol Brilliant Blue R miktarı 590 nm dalga boyunda absorbans değeri ölçülerek hesaplanmıştır. Her deney sonunda Remazol Brilliant Blue R'nin yüzde giderimi, adsorpsiyon prosesinden önce ve sonra okunan absorbans değerlerinden hesaplanmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Çözelti pH'ının Remazol Brilliant Blue R giderimine etkisi

Olası adsorpsiyon mekanizması hakkında ilgili bilgi sağlamanın yanı sıra, adsorpsiyon verimi çözültideki pH değişimlerine karşı özellikle hassastır (Saied vd., 2022). Şekil 2'de çözelti pH'ının Remazol Brilliant Blue R adsorpsiyonu üzerine etkisi görülmektedir. Şekil 2'den de görülebileceği gibi Remazol Brilliant Blue R'nin adsorpsiyonu, çözelti pH'ına belirgin bir bağımlılık göstermiştir; bu durumda adsorpsiyon işlemi sırasında elektrostatik çekimin yaygınlığını göstermektedir (Chakhtouna vd., 2021).



Şekil 2. Çözelti pH'ının Remazol Brilliant Blue R giderimine etkisi

Remazol Brilliant Blue R boyası için en yüksek giderim yüzdesi pH 2.0'de görülmektedir. Kabak çekirdeği kabuğu tozu üzerindeki giderim yüzdesi ve adsorpsiyon kapasitesi, pH arttıkça pH 2.0'den (% 81.32) pH 10.0'a (% 10.56) kadar bir azalma göstermektedir. Asidik ortamda, artan H^+ iyon konsantrasyonu, adsorbent yüzeyindeki fonksiyonel grupların daha yüksek derecede protonlanmasına yol açarak, pozitif yüklü kabak

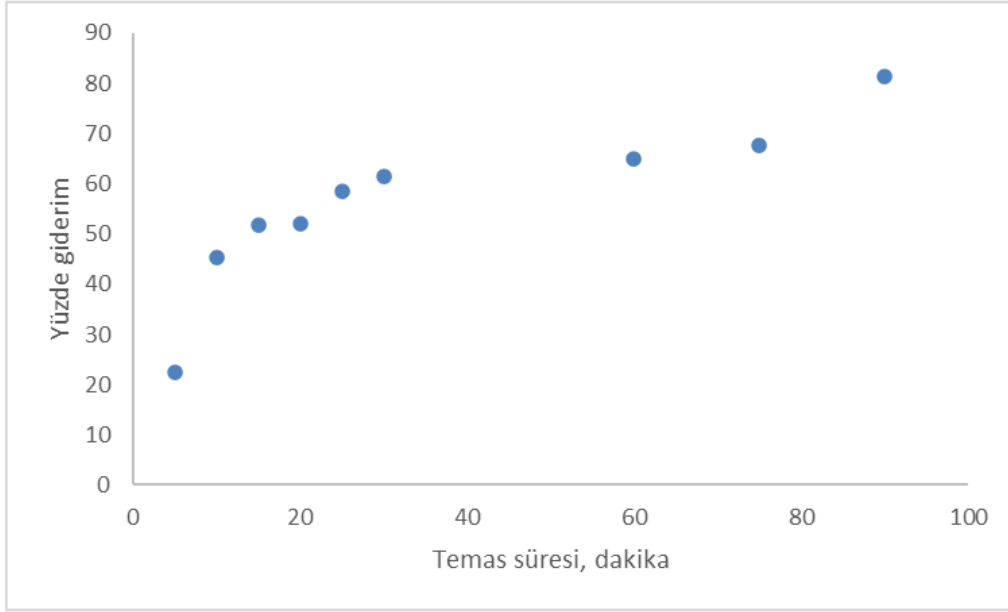
çekirdeği kabuğu tozu ile negatif yüklü Remazol Brilliant Blue R molekülleri arasında artan elektrostatik etkileşime ve dolayısıyla boya tutulumuna yol açar. Bununla birlikte, bazik çözeltiler daha fazla OH⁻ iyonu içermekte ve bu da kabak çekirdeği kabuğu üzerindeki bazı fonksiyonel grupların deprotonasyonunun artmasına neden olmaktadır. Bu değişiklik, kabak çekirdeği kabuğu tozu ve Remazol Brilliant Blue R molekülleri arasındaki elektrostatik çekimin ve dolayısıyla adsorpsiyon performansının azalmasına neden olur (Wong vd., 2020).

3.2. Adsorbent Miktarının Remazol Brilliant Blue R Adsorpsiyona Etkisi

Remazol Brilliant Blue R adsorpsiyon etkinliği kabak çekirdeği kabuğu dozundan etkilenmiştir. Beklendiği gibi, daha yüksek dozda adsorbent kullanımı daha yüksek Remazol Brilliant Blue R giderimine yol açmıştır. Kabak çekirdeği kabuğu tozunun miktarı 0.25 g/L'den 1.0 g/L'ye çıktıkça, Remazol Brilliant Blue R'nin adsorpsiyon etkinliği % 41.26'dan % 81.32'ye yükselmiştir. Kabak çekirdeği kabuğu tozunun dozundaki artış daha fazla adsorpsiyon bölgesinin oluşmasına neden olmuştur (Nhi et al., 2024). Daha yüksek kabak çekirdeği kabuğu tozu miktarlarında yüzde giderim değerlerinde önemli bir değişim görülmemiştir. Bu durum adsorbent dozu arttığında çözelti ortamında adsorpsiyonu etkileyecek düzeyde agglomerasyon olmadığını göstermektedir. Bunun sonucu olarak kabak çekirdeği kabuğu adsorbentinin kullanıldığı giderim deneylerinde adsorbent miktarı 1.00 g/L olarak seçilmiş ve kullanılmıştır.

3.3. Temas Süresinin Remazol Brilliant Blue R Adsorpsiyona Etkisi

Remazol Brilliant Blue R boyasının kabak çekirdeği kabuğu tozu yüzeyine adsorpsiyonu üzerindeki temas süresinin etkisi **Şekil 3**'de gösterilmiştir. Remazol Brilliant Blue R boyasının giderimi için başlangıçtaki hızlı adsorpsiyon fazı, bir platoya ulaşılan kadar daha yavaş bir adsorpsiyon fazına ilerlemiştir. Maksimum boya giderim yüzdesi 90 dakikalık temas süresi sonunda % 81.32 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Remazol Brilliant Blue R'nin kabak çekirdeği kabuğu yüzeyine adsorpsiyonunda yüzde giderim değerlerinin temas süresi ile değişimi (C0: 100 ppm; t: 20 °C, m: 0.05 g, V: 0.05 L, pH 2.0).

Başlangıç aşamasında hızlı adsorpsiyon fazının meydana gelmesi, çözeltideki boya molekülleriyle etkileşime girmek için mevcut olan kabak çekirdeği kabuğu tozunun üzerindeki yüksek miktardaki adsorpsiyon alanıyla ilgilidir. Adsorpsiyon sürecinin ilerlemesini takiben, adsorpsiyon süreci için mevcut aktif alanların sayısı azalmış ve bu da adsorpsiyon oranında daha yavaş bir artışa yol açmıştır.

3.4. Adsorpsiyon izotermi

DeneySEL çalışma kapsamında Remazol Brilliant Blue R boyasının gideriminde adsorbent olarak kullanılan kabak çekirdeği kabuğu tozuna ait adsorpsiyon sürecinin mekanizmasını incelemek için izoterm çalışmaları yürütülmüştür. Bu amaçla literatürde yaygın olarak kullanılan Freundlich, Langmuir ve Temkin izoterm modelleri kullanılmıştır. Kabak çekirdeği kabuğu tozu kullanılarak Remazol Brilliant Blue R boyasının adsorpsiyon ile giderimine ait adsorpsiyon izoterm incelemeleri 293 K sıcaklıkta, pH 2.0'de 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 ppm'lik başlangıç Remazol Brilliant Blue R derişimleri ile elde edilen adsorpsiyon çalışmalarına ait veriler kullanılarak araştırılmıştır. Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modelleri için kullanılan matematiksel eşitlikler aşağıda sırası ile verilmektedir.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (\text{Eşitlik 1})$$

$$\ln q_e = \ln K_F + (1/n) \ln C_e \quad (\text{Eşitlik 2})$$

$$q_e = \left(\frac{RT}{b} \right) \ln A + \left(\frac{RT}{b} \right) \ln C_e \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Verilen bu eşitliklerde

q_e ; Birim adsorbent üzerine adsorplanan madde miktarını (mg/g)

C_e ; Adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan maddenin derişimini (mg/L, ppm)

K_L ; Langmuir izoterm sabitini,

n : Adsorpsiyon yoğunluğu,

K_F : Freundlich adsorpsiyon kapasitesini,

A = Temkin izotermi denge bağlama sabitini (L/g)

b = Temkin izoterm sabitini

R = İdeal gaz sabitini (8,314 J/mol K)

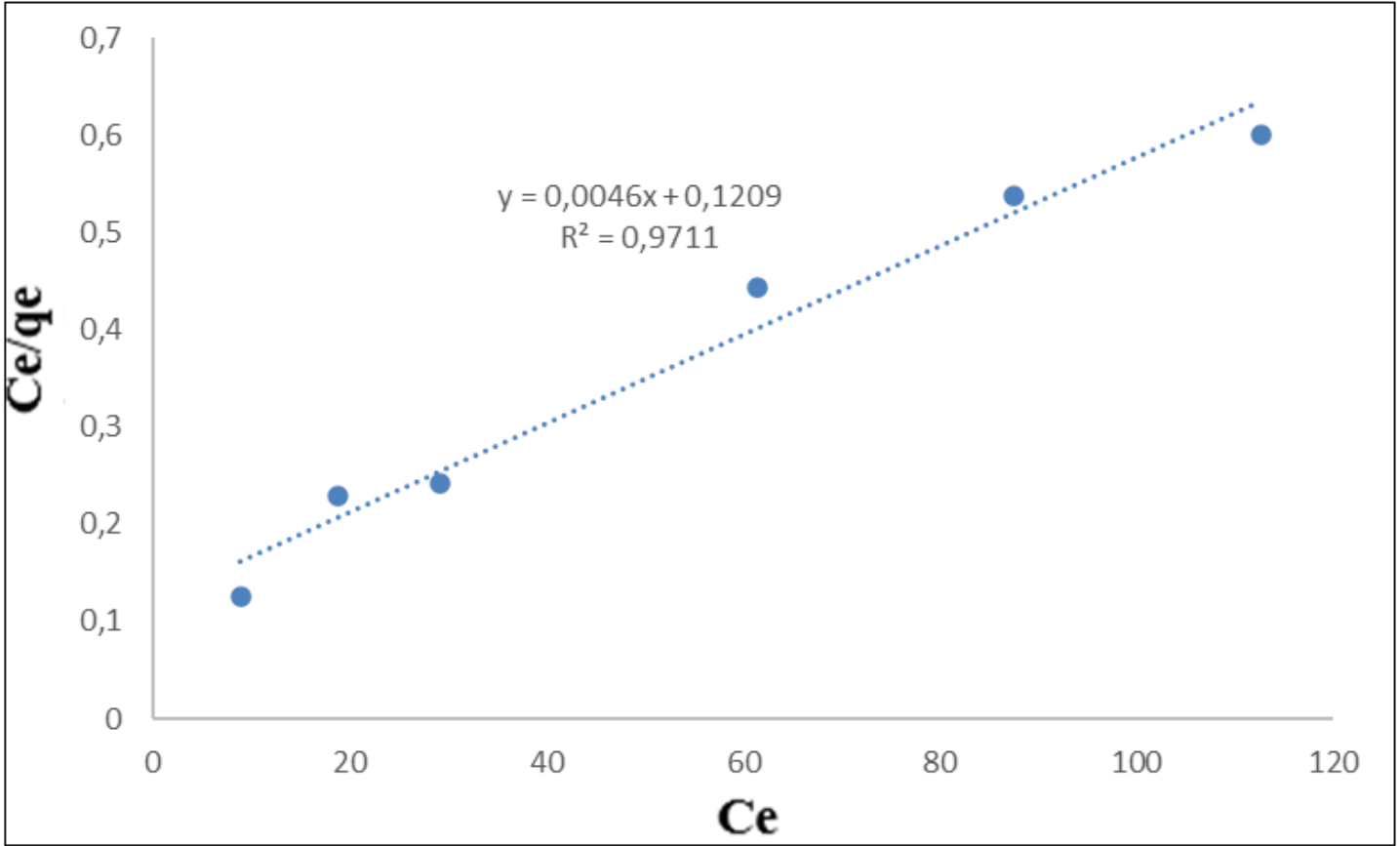
T = Sıcaklığı

$B = RT/b$ Adsorpsiyon ısısına bağlı sabitini (J/mol) ifade etmektedir.

Yürütölen deneysel çalışmada yüzde giderim değerlerinin Remazol Brilliant Blue R'nin 50 ppm'den 300 ppm'e kadar artan başlangıç derişimi ile birlikte %99.90'dan %37.52'e kadar azaldığı görölmüşür. Bunun nedeni olarak kabak çekirdeği kabuğu tozu yüzeyindeki aktif adsorpsiyon birimlerinin doyması ve van der Waals itme kuvvetlerinin adsorbentlerin yüzeyindeki aktif birimlere Remazol Brilliant Blue R'nin kütle taşınımını yenmesi ile açıklanabilir (Rapo vd., 2021; Soltani vd., 2020).

Remazol Brilliant Blue R boyasına için adsorpsiyon denge verilerine ait Langmuir izoterm eşitliğine ait korelasyon katsayısının diğer izoterm eşitliklerine ait korelasyon katsayılarından oldukça yüksek olması kabak çekirdeği kabuğu tozu yüzeyinde Remazol Brilliant Blue R adsorpsiyonunun Langmuir izoterm modeline uyduğunu göstermektedir. Kabak çekirdeği kabuğu tozu yüzeyine Remazol Brilliant Blue R boyasının

adsorpsiyonu için elde edilen Langmuir izoterm eşitliği ve grafiği Şekil 4’de, hesaplanan izoterm sabitleri ise **Tablo 1**’de verilmektedir.



Şekil 4. Kabak çekirdeği kabuğu tozu yüzeyine Remazol Brilliant Blue R boyasının adsorpsiyonu için elde edilen Langmuir izoterm eşitliği ve grafiği

Tablo 1. Remazol Brilliant Blue R'nin kabak çekirdeği kabuğu üzerine adsorpsiyonu için elde edilen Langmuir izoterm sabitleri.

Langmuir İzoterm Eşitliği	R ²	K _L	q _m , mg/g
y = 0.0046x + 0.1209	0.9711	0.038	217.39

Langmuir izoterm modeli adsorpsiyon süreci boyunca adsorplanan boya molekülleri (Remazol Brilliant Blue R) arasında herhangi bir etkileşim olmadan tek tabakalı bir adsorpsiyon ile homojen yüzey üzerinde (kabak çekirdeği kabuğu tozu) boya alımının gerçekleştiğini açıklamaktadır. Langmuir izotermi adsorplanan moleküllerinin tümü için adsorbent yüzeyindeki aktif bağlayıcı birimlerin özdeş afiniteye sahip olduğunu ve adsorbent yüzeyine bağlanmanın temel olarak fiziksel kuvvetler ile gerçekleştiğini ifade etmektedir.

3.5. Adsorpsiyon Kinetik İncelemeleri

Kabak kabuğu çekirdeği tozu kullanılarak Remazol Brilliant Blue R'nin adsorpsiyon mekanizmasının açıklanabilmesi için kinetik modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Remazol Brilliant Blue R'nin kabak çekirdeği kabuğu tozu ile adsorpsiyonunun kinetikleri yalancı (pseudo) birinci dereceden ve yalancı (pseudo) ikinci dereceden modellerine göre incelenmiştir. Remazol Brilliant Blue R'nin sulu ortamdan gideriminde 100 ppm'lik başlangıç Remazol Brilliant Blue R deneylerine ait veriler kullanılmış ve elde edilen değerler aşağıda verilen matematiksel ifadeler kullanılarak modellenmiştir. Sonuçlar **Tablo 2**'de sunulmaktadır.

$$\log(q_e - q_t) = -k_1/2,303t + \log q_e \quad (\text{Eşitlik 4})$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (\text{Eşitlik 5})$$

Tablo 2. Kabak çekirdeği kabuğu tozu ile Remazol Brilliant Blue R'nin adsorpsiyonu için elde edilen kinetik eşitlikleri ve sabitleri (C_0 : 100 ppm, pH:2.0; m: 0.05 g, V: 0.05 L).

Yalancı birinci dereceden kinetik eşitliği	R^2	k_1	Teorik q_e (mg/g)	Deneysel q_e (mg/g)
$y = -0.00747x + 1.64003$	0.80290	0.0172	40.74	81.32
Yalancı ikinci dereceden kinetik eşitliği	R^2	k_2	Teorik q_e (mg/g)	Deneysel q_e (mg/g)
$y = 0.01181x + 0.14542$	0.97602	9.59×10^{-4}	84.67	81.32

Kabak çekirdeği kabuğu tozu ile yapılan çalışmalar sonucu elde edilen eşitliklerin korelasyon katsayısı yalancı ikinci dereceden kinetik model için 1.0'e yakın olarak bulunmuştur. **Tablo 2**'den de görüldüğü gibi doğru denklemlerine ait eşitliklerden 100 ppm için hesaplanan q_e değeri yalancı birinci dereceden kinetik model için 40.74 mg/g iken yalancı ikinci dereceden kinetik model için 84.67 mg/g'dır. Bu çalışma için hesaplanan

deneysel q_e değeri ise 81.32 mg/g olarak bulunmuştur. Deneysel q_e değerleri ile kinetik model eşitliklerinden hesaplanan q_e değerleri karşılaştırıldığında yalancı ikinci dereceden kinetik model için hesaplanan q_e değeri ile deneysel olarak bulunan q_e değerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum kabak çekirdeği kabuğu tozu ile Remazol Brilliant Blue R'nin adsorpsiyonun yalancı ikinci dereceden kinetik modeline uygun olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada anyonik bir boya olan Remazol Brilliant Blue R'nin tekstil atık suyundan gideriminde kabak çekirdeği kabuğu tozunun adsorbent olarak kullanımının uygunluğu incelenmiştir. Çalışmalar belirli deneysel şartlar altında adsorpsiyon parametrelerinin optimize ederek gerçekleştirilmiş ve adsorpsiyon mekanizması aydınlatılmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Adsorpsiyon prosesinde önerilen kabak çekirdeği kabuğu ile Remazol Brilliant Blue R arasındaki etkileşimin temel olarak fiziksel kuvvetler ile gerçekleştiği görülmektedir.
- Adsorbent yüzeyine Remazol Brilliant Blue R adsorpsiyonunun artan çözelti pH'ı ile azaldığı görülmektedir. Bu durum Remazol Brilliant Blue R boyasının anyonik bir yapıya sahip olması ile uyumlu bir bulgudur.
- Yapılan deneysel araştırmada temas süresinin adsorpsiyon prosesi için önemli bir parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Adsorpsiyon hızının araştırılan temas sürelerinde başlangıçta çok yüksek olduğu artan temas sürelerinde ise bu hızın giderek azaldığı gözlenmiştir.
- Düşük başlangıç Remazol Brilliant Blue R derişimlerinde önerilen adsorbentin yüzeyinde adsorpsiyon değerlerinin yüksek olduğu ve adsorpsiyon dengesine kısa sürede varıldığı görülmüştür. Deneyler yüksek Remazol Brilliant Blue R derişimleri için tekrarlandığında düşük yüzde giderimler ve uzun denge süreleri elde edilmiştir.
- Yapılan deneysel çalışmalarda artan kabak çekirdeği kabuğu tozu miktarıyla Remazol Brilliant Blue R'nin yüzde giderim değerlerinin arttığı görülmüştür.
- Önerilen adsorbentin Remazol Brilliant Blue R arıtımında uygunluğu görülmektedir. Kabak çekirdeği kabuğu atığının geri dönüşümden elde edilmesi, ekonomik oluşu, adsorpsiyon sonunda bertarafının kolay olması sebebi ile farklı kirletici türleri için çevreci bir adsorbent olarak kullanılabilceği açıktır.

- Kabak çekirdeği kabuğundan elde edilen tozun farklı kimyasal maddeler ve işlemler ile modifikasyonu sonucu adsorbent yüzeyine yeni fonksiyonel grupların eklenmesi; giderim yüzdelelerini arttırırken prosesin dengeye gelme süresini kısaltabilir.

KAYNAKLAR

- Aragaw, T. A., & Bogale, F. M. (2021b). Biomass-Based Adsorbents for removal of dyes from wastewater: a review. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.764958>
- Athira, T. M., & Sumi, S. (2024). Agro-based Adsorbents for Dye Removal from Aqueous Solutions: A Review. *Water Air & Soil Pollution*, 235(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06926-8>
- Bhatt, A. S., Sakaria, P. L., Vasudevan, M., Pawar, R. R., Sudheesh, N., Bajaj, H. C., & Mody, H. M. (2012). Adsorption of an anionic dye from aqueous medium by organoclays: equilibrium modeling, kinetic and thermodynamic exploration. *RSC Advances*, 2(23), 8663. <https://doi.org/10.1039/c2ra20347b>
- Cai, Z., Sun, Y., Liu, W., Pan, F., Sun, P., & Fu, J. (2017). An overview of nanomaterials applied for removing dyes from wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 15882–15904. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9003-8>
- Chakhtouna, H., Benzeid, H., Zari, N., Qaiss, A. E. K., & Bouhfid, R. (2021). Functional CoFe₂O₄-modified biochar derived from banana pseudostem as an efficient adsorbent for the removal of amoxicillin from water. *Separation and Purification Technology*, 266, 118592. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118592>
- Dehghani, M. H., Solangi, N. H., Mubarak, N. M., Rajamohan, N., Bosu, S., Othmani, A., Ahmaruzzaman, M., Mishra, S. R., Bhattacharjee, B., Gadore, V., Banglani, T. H., Waris, N., Hyder, A., Memon, A. A., Thebo, K. H., Joshi, P., Boczkaj, G., & Karri, R. R. (2024). Mxene-based materials as adsorbents, photocatalysts, membranes and sensors for detection and removal of emerging and gaseous pollutants: A comprehensive review. *Arabian Journal of Chemistry*, 18(1), 106052. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.106052>
- Gürses, A., Açıkyıldız, M., Güneş, K., & Gürses, M. S. (2016). Classification of dye and pigments. In *Springer briefs in molecular science* (pp. 31–45). https://doi.org/10.1007/978-3-319-33892-7_3
- Jiao, X., Jia, K., Yu, Y., Liu, D., Zhang, J., Zhang, K., Zheng, H., Sun, X., Tong, Y., Wei, Q., & Lv, P. (2024). Nanocellulose-based functional materials towards water treatment. *Carbohydrate Polymers*, 350, 122977. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122977>
- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676–4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>
- Khezami, L., Bessadok, A., Aissa, M. a. B., Ahmed, A. H., Modwi, A., Benhamadi, N., & Assadi, A. A. (2024). Revolutionizing dye removal: g-C₃N₄-Modified ZnO nanocomposite for exceptional adsorption of basic fuchsin dye. *Inorganic Chemistry Communications*, 164, 112413. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112413>
- Kurnia, M., Suprpto, S., & Ni'mah, Y. L. (2023). Bio-adsorbent for Remazol Brilliant Blue R (RBBR) dye. *South African Journal of Chemical Engineering*, 47, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.11.002>

- Mosaffa, E., Patel, R. I., Banerjee, A., Basak, B. B., & Oroujzadeh, M. (2024). Comprehensive analysis of cationic dye removal from synthetic and industrial wastewater using a semi-natural curcumin grafted biochar/poly acrylic acid composite hydrogel. *RSC Advances*, 14(11), 7745–7762. <https://doi.org/10.1039/d3ra08521j>
- Nhi, N. T. T., Tho, N. T. M., & Anh, N. T. H. (2024). An efficient adsorbent for the removal of dyes prepared by an in situ growth of ZIF-8 onto activated carbon. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2377555>
- Pavithra, K. G., P, S. K., V, J., & P, S. R. (2019). Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.02.011>
- Rápó, E., & Tonk, S. (2021). Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption; Desorption Studies: A Review of Results from the Last Five Years (2017–2021). *Molecules*, 26(17), 5419. <https://doi.org/10.3390/molecules26175419>
- Saied, M. E., Shaban, S. A., Mostafa, M. S., & Naga, A. O. a. E. (2022). Efficient adsorption of acetaminophen from the aqueous phase using low-cost and renewable adsorbent derived from orange peels. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(2), 2155–2172. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02541-x>
- Soltani, R., Marjani, A., Soltani, R., & Shirazian, S. (2020). Hierarchical multi-shell hollow micro–meso–macroporous silica for Cr(VI) adsorption. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66540-6>
- Vishnu, D., Dhandapani, B., Authilingam, S., & Sivakumar, S. V. (2022). A Comprehensive Review of Effective Adsorbents Used for the Removal of Dyes from Wastewater. *Current Analytical Chemistry*, 18(3), 255–268. <https://doi.org/10.2174/1573411016999200831111155>
- Wong, S., Ghafar, N. A., Ngadi, N., Razmi, F. A., Inuwa, I. M., Mat, R., & Amin, N. a. S. (2020). Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60021-6>
- Yaacoubi, H., & Songlin, Z. (2019). Effect of ammonia modification on activated carbons for the removal of acidic anthraquinone dyes. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 17(8). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2018-0216>
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. (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>
- Youness, F., Akhtiyar, S., Tehrani-Bagha, A., & Bilbeisi, R. A. (2024). Progress in modified electrospun PVC membranes: Toward sustainable solutions for environmental remediation. *Separation and Purification Technology*, 359, 130456. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130456>