

Lactarius deliciosus Katkılı Aljinat Mikroküreler ile Bezaktiv Black Boyarmaddesinin Biyosorpsiyonu

Biosorption of Bezaktiv Black Dye Using Lactarius deliciosus Enriched Alginate Microbeads

Esmagül IHLAMUR¹ , Aslı GÖÇENOĞLU SARIKAYA^{1*} 

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Bursa, Türkiye

Article Info

Research Article

DOI:10.29048/makufebed.1862172

Corresponding Author

Aslı GÖÇENOĞLU SARIKAYA

Email: agocenoglu@uludag.edu.tr

Article History

Received: 13.01.2026

Revised: 26.02.2026

Accepted: 13.03.2026

Available Online: 30.06.2026

To Cite

Ihlamur, E., & Göçenoğlu Sarıkaya, A. (2026). *Lactarius deliciosus* katkı aljinat mikroküreler ile bezaktiv black boyarmaddesinin biyosorpsiyonu. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 17(1), 01–13. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1862172>

Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FHIZ-2021-590 ve FLO-2024-1821 numaralı projeler ile desteklenmiştir.

ÖZ: Sentetik boyar maddeler, doğada doğal olarak bulunmayan ve kimyasal yollarla, genellikle petrol türevlerinden üretilen renkli bileşiklerdir. Ancak sentetik boyar maddeler endüstriyel atık suların kirlenmesine neden olarak hem insan sağlığı hem de çevre açısından ciddi tehlikeler oluşturmaktadır. Bu tür atık suların arıtılmasında geleneksel yöntemlerin pahalı olması ve işlem süresinin uzun olması gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, atık su arıtımında biyosorpsiyon yöntemi alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, sulu çözeltilerden Bezaktiv Black boyar maddesinin gideriminde *Lactarius deliciosus* katkı aljinat mikrokürelerin alternatif bir biyosorbent olarak kullanımı araştırılmıştır. Biyosorbentin karakterizasyonunun ardından, biyosorbent miktarı, ortam pH'ı, başlangıç Bezaktiv Black derişimi, sıcaklık ve süre parametreleri optimize edilmiştir. Ayrıca biyosorpsiyonun doğasını aydınlatmak için kinetik, izotermal ve termodinamik parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi pH 2,0'da 200 mg/L başlangıç Bezaktiv Black derişimi için 25 °C'de 28,859 ± 0,03 mg/g olarak bulunmuştur. Biyosorpsiyonun yalnızca ikinci dereceden kinetik modele ve Freundlich izoterm modeline uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak, desorpsiyon ajanı olarak etanolün kullanılmasıyla biyosorbentin 5 döngü boyunca yeniden kullanılabilceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Lactarius deliciosus*, aljinat, Bezaktiv Black, biyosorpsiyon

ABSTRACT: Synthetic dyes are coloured compounds that do not occur naturally in nature and produced chemically, usually from petroleum derivatives. However, synthetic dyes pose serious risks to both human health and the environment by causing contamination of industrial wastewater. Traditional methods for treating such wastewater have certain disadvantages, like costly and time-consuming. Therefore, the biosorption method has become an attractive alternative for wastewater treatment. In this study, the application of alginate microbeads with *Lactarius deliciosus* biomass as an alternative biosorbent for the removal of Bezaktiv Black dye from aqueous solutions was investigated. After characterisation of the biosorbent, biosorbent amount, medium pH, initial Bezaktiv Black concentration, temperature, and time were optimized. Furthermore, kinetic, isothermal, and thermodynamic parameters were calculated to clarify the nature of biosorption. According to the results, the highest biosorption capacity was found to occur at pH 2.0, 25 °C, and 200 mg/L initial Bezaktiv Black concentration, with a biosorption capacity of 28.859 ± 0.03 mg/g. The biosorption was found to be consistent with the pseudo-second-order kinetic model and the Freundlich isotherm model. Finally, it was observed that the biosorbent could be reused for five cycles using ethanol as a desorption agent.

Keywords: *Lactarius deliciosus*, alginate, Bezaktiv Black, biosorption

1. GİRİŞ

Günümüzde, madencilik, metal kaplama, baskı ve boyama gibi endüstriler tarafından üretilen artan sayıda tehlikeli bileşik su ortamına deşarj edilmektedir. Kirleticiler organik ve inorganik olmak üzere iki geniş sınıf altında toplanmaktadır. Organik su kirleticileri arasında endüstriyel çözücüler, uçucu organik bileşikler, böcek ilaçları, pestisitler ve boyalar yer alır (Wang vd., 2016).

Tekstil, baskı ve boyama endüstrilerinin hızla gelişmesiyle birlikte, ilgili amaçlar için 100.000'den fazla ticari boyar madde üretilmektedir (Zhao vd., 2001). Ancak kullanılan boyar maddelerin yaklaşık %10-15'i, üretim ve kullanım sırasında uygun bir arıtma işleminden geçirilmeden doğrudan atılmaktadır; bu da çevreye büyük kirlilik yaratmakta ve önemli sağlık riskleri doğurmaktadır (Mostafa vd., 2019). Her yıl 700.000 tondan fazla boyar madde içeren atık su açığa çıkmaktadır ve bu atık su çeşitli boyalar ve bazı diğer organik/inorganik kimyasallar içermektedir. Atık tekstil boyaları, bitki fizyolojisini olumsuz etkileyerek fitotoksik bir etki yaratmakta ve bu durum tohumların çimlenme oranında belirgin bir azalmaya yol açmaktadır. Boya atık sularının neden olduğu fizyolojik stres, bitkinin kuru madde birikimini engelleyerek toplam biyokütlenin kontrol grubuna kıyasla daha düşük kalmasına neden olmaktadır (Zhao vd., 2021). Bunun yanı sıra, alerjik, toksik ve kanserojen olmaları nedeniyle atık sularındaki boyar maddelerin insan sağlığı üzerinde ciddi riskleri mevcuttur (Avcı ve Erkan, 2024; Söğüt ve Çelebi, 2024). Özellikle sentetik boyaların degradasyon ürünleri genotoksik özellik sergileyerek hücre yapısını bozmakta, ayrıca bağışıklık sistemini baskılayarak çeşitli alerjik reaksiyonlara ve organ yetmezliklerine zemin hazırlamaktadır. Bu durum, boya içeren atık suların çevreye salınmadan önce etkin bir şekilde arıtılmasını zorunlu kılmaktadır (Chakraborty vd., 2013).

Endüstriyel atık sulardan boyaların giderilmesi amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu tür atık suların arıtılmasında kullanılan geleneksel yöntemler arasında çöktürme, filtrasyon ve ozonlama yer almaktadır (Kütük vd., 2023; Duranoğlu ve Yılmaz, 2024). Fakat bu yöntemlerin pahalı olması ve işlem süresinin uzun olması gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır (Göçenoğlu Sarıkaya vd., 2024). Ayrıca sentetik boyar maddelerin yapısındaki bağların yüksek stabilitesi nedeniyle ışık, kimyasallar veya aktif çamur içeren geleneksel atık su arıtma süreçleriyle tam olarak parçalanamamaktadır (Mostafa vd., 2019). Bu nedenle, atık su arıtımında sorpsiyon yöntemi alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda ise bakteri, mantar, alg ve bitki gibi organizmaların kullanıldığı biyolojik arıtma teknikleri düşük maliyetli, çevre dostu ve uygulanabilir alternatifler olarak geliştirilmektedir (Mironczuk-Chodakowska ve Witkowska, 2020; Göçenoğlu Sarıkaya vd., 2024).

Biyosorpsiyon, çözeltideki kirlenici maddeler ile biyosorbent yüzeyindeki fonksiyonel gruplar arasında

bağlanma içeren fiziko-kimyasal bir süreç olarak tanımlanır. Biyosorpsiyon süreci düşük işletme maliyeti, biyokütlenin yüksek bulunabilirliği ve minimum düzeyde ikincil atık üretimi gibi operasyonel avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, kirleticilerin geri kazanımına olanak tanınması ve biyosorbentın rejenerasyon kabiliyeti sayesinde döngüsel ekonomi prensipleriyle uyumlu, sürdürülebilir bir arıtma teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Biyosorpsiyon deney tasarımlarının çoğu, başlangıç pH'ı, temas süresi, biyosorbentın parçacık boyutu, biyosorbentın dozu ve sıcaklık gibi fiziksel ve kimyasal faktörlerin etkisi altında biyosorpsiyon performansına ilişkin temel bilgiler sağlar (Tay vd., 2016).

Aljinat, mannuronik asit ve guluronik asitten oluşur ve her iki tarafta farklı biyopolimer zincirleri ile metalin iki değerli iyonlarına bağlanan karboksilik asit içeren fonksiyonel gruba sahiptir. Bu düzenleme, biyopolimerin inotropik jelleşmesi için kullanılan yumurta kutusu benzeri bir yapı oluşturur ve biyopolimer-metal kompozit malzemeye mukavemet kazandırır (Morris vd., 1980; Davis vd., 2003). Yüksek biyoyuyluluk, biyobozunurluk ve yenilenebilirlik özellikleri sodyum aljinatı iyi bir biyosorbent yapar; ancak düşük ısı direnci, stabilitesi ve mekanik mukavemeti nedeniyle (Wang vd., 2018; Ates vd., 2020), mekanik mukavemetin artırılmasıyla birlikte seçiciliği ve metal alım kapasitesini artıran yüzey aşılama ve çapraz bağlama ile bazı katkı maddeleriyle karıştırılır (He ve Chen, 2014; Thakur vd., 2018). Birçok araştırmacı, stabiliteyi ve gözenekliliği artıran ve biyosorbentların verimliliğini artıran kömür gangü, bentonit ve zeolit gibi diğer minerallerle birleştirilerek aljinat kompozitleri hazırlamıştır (Mourpichai vd., 2018; Mohammadi vd., 2019; Rocha vd., 2023).

Lactarius, Russulaceae familyasına ait, ılıman, subtropikal ve tropikal ormanlarda yaygın olarak bulunan bir ektomikorizal gruptur. Bugüne kadar dünya çapında yaklaşık 500 *Lactarius* türü keşfedilmiştir. Bunlardan biri olan *Lactarius deliciosus* (L.) Gray yenilebilir yabani bir türdür. Turuncu renkte olan *L. deliciosus*, antimikrobiyal ve antikanser gibi güçlü biyolojik aktivitelere sahip seskiterpenoidleri içermektedir (Verbeken ve Nuytinck, 2013; Tala vd., 2017). İspanya, Çin, Portekiz, Yunanistan gibi ülkelerin yanı sıra Türkiye'de de yayılım gösteren *L. deliciosus* özellikle Batı Karadeniz, Batı Ege ve Trakya bölgesinde meşe ve çam ormanlarında sonbahar aylarında yetişmektedir (Göçenoğlu Sarıkaya vd., 2024).

Bu çalışmada, Russulaceae ailesinden yenilebilir bir yabani mantar türü olan *L. deliciosus* katkılı aljinat mikroküreler elde edilerek, sulu çözeltilerden sentetik boyar madde gideriminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ortam pH'ı, biyosorbent miktarı, sıcaklık, başlangıç sentetik boyar madde derişimi ve sürenin optimize edilmesinin ardından izoterm ve kinetik parametreleri hesaplanmış ve biyosorbent karakterize edilmiştir. Bunun yanı sıra, desorpsiyon ajanı olarak etanol kullanılarak desorpsiyon-biyosorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve biyosorbentın yeniden kullanım potansiyeli

değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. *L. deliciosus* Katkılı Aljinat Mikrokürelerin Hazırlanması

Biyosorbent olarak kullanılan *L. deliciosus* mantarı Ekim-Aralık ayları (2022) arasında Turgutlu ilçesi, Manisa ili, Türkiye’den (38.471319, 27.672362) toplanmış ve tür tanımlaması Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü’nde yapılmıştır. Biyosorbentin hazırlanması aşamasında *L. deliciosus* distile su ile üç kere yıkanmış ve etüvde 353 K sıcaklıkta kurutulmuştur. Kurutulan biyokütle el tipi homojenizatörde daha küçük parçalara bölündükten sonra eleklerden geçirilerek farklı boyutlarda elde edilmiş (212-710 µm) ve biyosorpsiyon çalışmalarında kullanılmak üzere cam kavanozlarda muhafaza edilmiştir (Göçenoğlu Sarıkaya vd., 2023). Biyosorpsiyon çalışmalarında 212-300 µm boyut aralığındaki biyosorbent kullanılmıştır.

L. deliciosus katkı aljinat mikrokürelerin sentezi için, %1-5 (w/v) oranında sodyum aljinat çözeltisi 100 mL deiyonize suda çözüldükten sonra, 0,5 g *L. deliciosus* biyokütlesi sodyum aljinat çözeltisine katılarak homojen bir karışım olana kadar manyetik karıştırıcıda 2 saat boyunca karıştırılmıştır. Homojen bir karışım elde edildikten sonra, bu karışım 0,1 M CaCl₂ çözeltisine (çapraz bağlayıcı) damla damla ilave edilmiş ve dengeye ulaşana kadar oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Çapraz bağlayıcının uzaklaştırılması için sentezlenen mikroküreler çapraz bağlayıcı ortamdan süzülerek deiyonize su ile yıkanmıştır. *L. deliciosus* katkı aljinat mikroküreler, temiz Petri kaplarına alınarak oda sıcaklığında kurutulmuş ve biyosorpsiyon çalışmalarında kullanılmak üzere cam şişelerde muhafaza edilmiştir.

2.2. *L. deliciosus* Katkılı Aljinat Mikrokürelerin Karakterizasyonu

Fonksiyonel grupların belirlenebilmesi, kimyasal yapının aydınlatılabilmesi ve yüzey morfolojisinin belirlenebilmesi için aljinat mikroküre ve *L. deliciosus* katkı aljinat mikrokürelerin Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi (PerkinElmer FT-IR Spectrometer Spectrum Two) ile FTIR analizi gerçekleştirilmiş ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır.

Farklı formülasyonlarda hazırlanan mikrokürelerin jel fraksiyonu (F_{jel}) Denklem 1’e göre hesaplanmıştır (Wang vd., 2022; Bayrak vd., 2023):

$$F_{jel} = \frac{W_e}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

Farklı formülasyonlarda hazırlanan mikrokürelerin jel fraksiyonunun (F_{jel}) hesaplanabilmesi için mikroküreler 4 saat boyunca 40 °C’de kurutulmuştur. (W_0) daha sonra deiyonize su içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Su tutan

mikroküreler tekrar 4 saat boyunca 40 °C’de kurutulmuş, W_e değeri alınmıştır.

Mikrokürelerin su içeriği (C_w) Denklem 2’ye göre hesaplanmıştır:

$$C_w = \frac{W_{islak} - W_{kuru}}{W_{kuru}} \quad (2)$$

Su içeriğinin belirlenebilmesi için hazırlanan mikroküreler deiyonize suda tutulmuş (W_{islak}), sabit bir ağırlığa ulaşıncaya kadar (W_{kuru}) 40 °C’de kurutulmuştur (Tagyan vd., 2023).

Farklı formülasyonlarda hazırlanan mikrokürelerin şişme yüzdesi (% Şişme) Denklem 3’e göre hesaplanmıştır (Bayrak vd., 2023; Göçenoğlu Sarıkaya vd., 2024):

$$\%Şişme = \frac{W_{islak} - W_{kuru}}{W_{kuru}} \times 100 \quad (3)$$

2.3. *L. deliciosus* Katkılı Aljinat Mikroküreleri ile Sulu Çözeltilerden Bezaktiv Black Giderimi

L. deliciosus katkı aljinat mikrokürelerin sulu çözeltilerden boyar madde gideriminde biyosorbent olarak kullanımının araştırılması için giderim çalışması yapılmıştır. Bu amaçla hedef kirlenici olarak Bezaktiv Black (BB) boyar maddesi seçilmiştir. BB boyar maddesi Karesi Polyester ve Petrokimya Sanayi A.Ş.’den temin edilmiştir. Hazırlanan mikrokürelerin BB giderimindeki etkinliğinin araştırılabilmesi için ilk parametre olarak biyosorbent miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda 0,1-1,0 g biyosorbent miktarı ile biyosorpsiyon gerçekleştirilmiştir. Uygun biyosorbent miktarı belirlendikten sonra pH 2,0-8,0 aralığında biyosorpsiyon gerçekleştirilmiş ve biyosorpsiyonun gerçekleştiği en uygun pH değeri belirlenmiştir. Uygun pH değeri belirlendikten sonra başlangıç BB derişiminin biyosorpsiyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 50-200 mg/L başlangıç BB derişim aralığında biyosorpsiyon gerçekleştirilmiştir. Uygun biyosorpsiyon sıcaklığının belirlenebilmesi için kesikli sistem çalışmaları, çalkalama hızı 150 rpm olacak şekilde orbital çalkalayıcı inkübatörde 25-45 °C aralığında gerçekleştirilmiştir. Uygun sıcaklık değeri belirlendikten sonra, en son biyosorpsiyon parametresi olarak süre çalışmaları 5-120 dk aralığında gerçekleştirilmiştir. Denge halindeki biyosorpsiyon kapasitesi (q_e) Denklem 4’e göre belirlenmiştir (Göçenoğlu Sarıkaya, 2025):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (4)$$

Denklemden yer alan C_0 ve C_e sırasıyla başlangıç ve denge durumundaki boyar madde derişimi (mg/L), V boyar madde çözeltisinin toplam hacmi (L) ve m kullanılan biyosorbentin miktarını (g) vermektedir. Renk ölçümleri UV-görünür bölge spektrofotometresi ile gerçekleştirilmiştir (λ_{max} : 613 nm).

2.4. Biyosorpsiyon İzotermi

Biyosorbent yüzeyinde oluşan biyosorpsiyon olayının aydınlatılabilmesi için Langmuir (Langmuir, 1918), Freundlich (Freundlich, 1906) ve Dubinin-Radushkevich (D-R) (Dubinin ve Radushkevich, 1947) izoterm modellerinden yararlanılmıştır. Langmuir izoterm modeli Denklem 5'teki gibi ifade edilmektedir (Langmuir, 1918):

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{Q_L K_L} + \frac{c_e}{Q_L} \quad (5)$$

q_e biyosorbe olan boya miktarını (mg/g), C_e biyosorpsiyon sonrası dengedeki çözeltide bulunan boya derişimini (mg/L), K_L Langmuir sabitini ve Q_L en yüksek biyosorpsiyon kapasitesini (mg/g) vermektedir. Deneyisel sonuçlar ile C_e 'ye karşı çizilen C_e/q_e grafiğı ve Denklem 5 kullanılarak Q_L ve K_L değerleri hesaplanmıştır.

Freundlich izoterm modeli Denklem 6'ya göre hesaplanmıştır (Freundlich, 1906):

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln c_e \quad (6)$$

K_F biyosorpsiyon kapasitesini (mg/g), q_e denge anındaki biyosorbent üzerine biyosorbe olan boya miktarını (mg/g), C_e denge halinde çözelti ortamında kalan boya derişimini (mg/L), n Freundlich izoterm sabitini ifade etmektedir.

Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modeli Denklem 7'de verilmiştir (Dubinin ve Radushkevich, 1947):

$$\ln Q_e = \ln Q_{D-R} - K_{D-R} \varepsilon^2 \quad (7)$$

q_e biyosorplanan madde miktarı, Q_{D-R} maksimum biyosorpsiyon kapasitesi (mg/g), K_{D-R} D-R sabitidir. ε Polanyi potansiyelini (J/mol) ifade eder ve Denklem 8'de verildiğı gibi hesaplanır:

$$\varepsilon = RT \ln\left(1 + \frac{1}{C_e}\right) \quad (8)$$

T sıcaklık (K), R evrensel gaz sabiti (J/mol K), C_e adsorbatın denge derişimidir (mg/L). Biyosorpsiyonun serbest enerjisi (E_{fe}) K_{D-R} değerinden hesaplanır (Denklem 9):

$$E_{fe} = \frac{1}{\sqrt{-2K_{D-R}}} \quad (9)$$

2.5. Biyosorpsiyon Kinetiğı

Biyosorpsiyon kinetiğinin aydınlatılabilmesi için yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve partikül için difüzyon kinetik modelleri uygulanmıştır. Yalancı birinci kinetik model, biyosorpsiyon hızının biyosorbent yüzeyindeki boş alanların sayısına doğru orantılı olduğunu varsaymaktadır (Lagergren, 1898). Yalancı birinci derece kinetik modeli Denklem 10'a göre hesaplanmıştır.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (10)$$

k_1 yalancı birinci derece kinetik modelinde hız sabittir (Lagergren, 1898).

Öte yandan, yalancı ikinci derece kinetik model hız sınırlayıcı adımın kimyasal biyosorpsiyon olduğunu varsaymaktadır. Bu süreçte, boyar madde ile biyokütle arasında elektron değişimi ya da paylaşımı gibi valans kuvvetleri etkili olur (Ho ve McKay, 1999). Yalancı ikinci derece kinetik model Denklem 11'e göre hesaplanmıştır.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (11)$$

Denklemde yer alan k_2 (g/mg dk), denge durumundaki hız sabiti; q_e (mg/g) ise denge durumundaki biyosorpsiyon kapasitesini ifade etmektedir (Ho ve McKay, 1999).

Partikül içi difüzyon kinetik modeli, boyar madde moleküllerinin biyosorbent yüzeyine ilk hareketi, yüzeyden gözeneklere difüzyonu ve aktif merkezlerde iyonların tutulmasını ifade eden bir kinetik modeldir. Bu modelde, boyar madde difüzyon miktarı temas süresinin karekökü ile orantılıdır (Denklem 12) (Wang vd., 2018; Nuzi vd., 2025).

$$q_t = k_{id} t^{1/2} \quad (12)$$

Denklemde yer alan k_{id} hız sabiti, t (dk) süreyi, q_t (mg/g) ise t anındaki biyosorpsiyon miktarını vermektedir.

2.6. Biyosorpsiyonun Termodinamiğı

Serbest enerji değişimi (ΔG°), entalpi değişimi (ΔH°) ve entropi değişimi (ΔS°) gibi termodinamik parametreler, her üç sıcaklık değeri için Van't Hoff eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır (Denklem 13; Lima vd., 2020).

$$\ln K_L = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (13)$$

T mutlak sıcaklığı (K), K_L Langmuir sabitini, R ise evrensel gaz sabitini (8,314 J/mol K) ifade etmektedir. ΔH° ve ΔS° , $\ln K_L$ 'ye karşı çizilen $1/T$ grafiğinden elde edilen doğrunun eğiminden ve kesim noktasından bulunabilir.

2.7. Desorpsiyon ve Tekrar Kullanım

Kullanılan biyosorbentlerin desorpsiyonu ve yeniden kullanımı sürdürülebilir biyosorpsiyon prosesleri için oldukça önemlidir. Bu nedenle kullanılan biyosorbentinin biyosorpsiyon sonrası etanol ile desorpsiyonu gerçekleştirilmiş, ardından tekrar kullanımı araştırılmıştır. Desorpsiyon verimi Denklem 14'e göre hesaplanmıştır (Göçenoğlu Sarıkaya, 2025).

$$\text{Desorpsiyon verimi} = \frac{C_d}{C_b} \times 100 \quad (14)$$

Eşitlikte yer alan C_d (mg/L) desorbe edilen BB derişimini, C_b

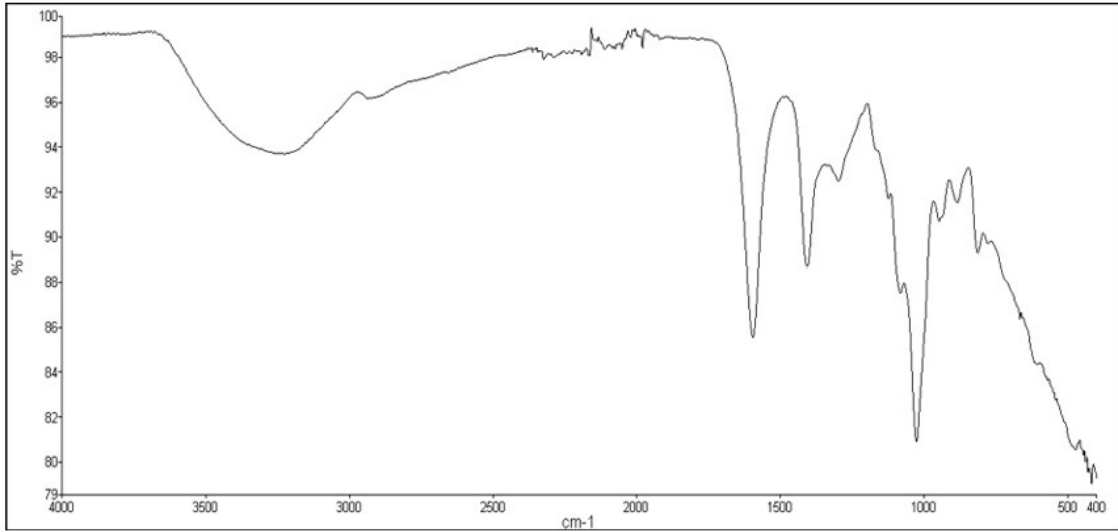
(mg/L) ise biyosorben edilen BB derişimini ifade etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

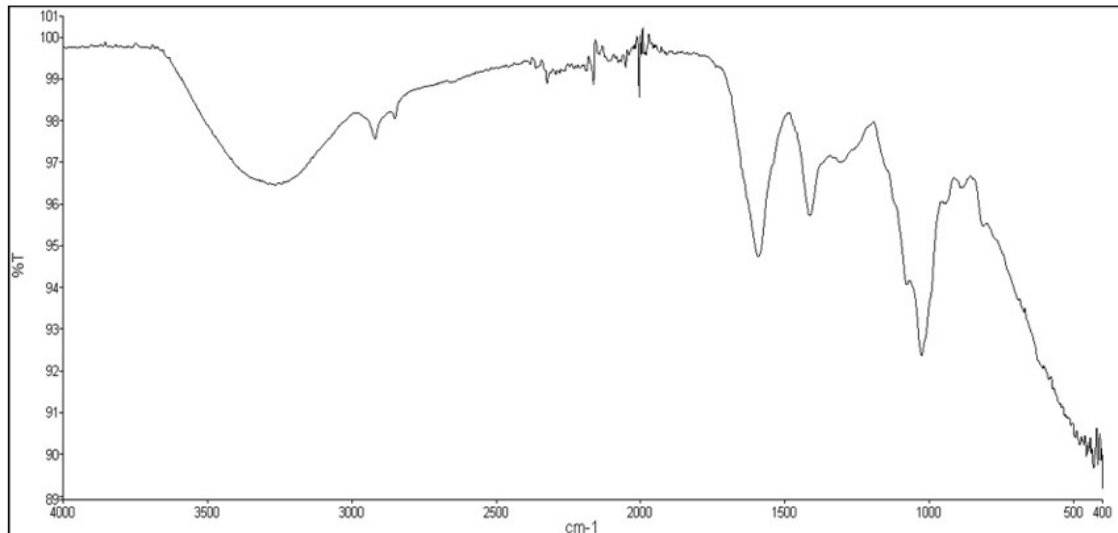
3.1. Biyosorbentin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

L. deliciosus katkı aljinat mikrokürelerin kimyasal yapısının aydınlatılabilmesi ve fonksiyonel gruplarının belirlenebilmesi için aljinat mikrokürelerin (*L. deliciosus* eklenmemiş boş aljinat mikroküreler) ve *L. deliciosus* katkı mikrokürelerin Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi ile FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Elde

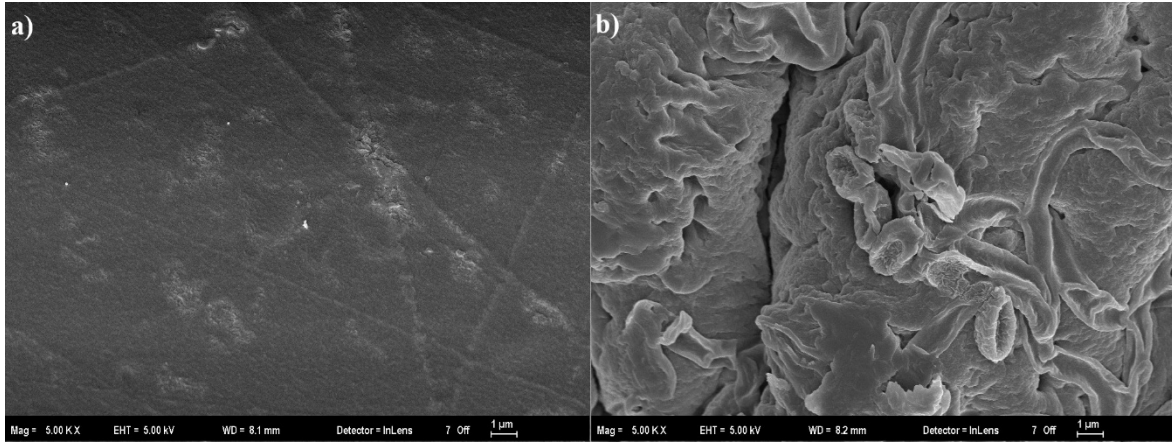
edilen FTIR spektrumları Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir. Buna göre, 3400 cm^{-1} civarında hidroksil gruplarının karakteristik absorpsiyon bantları, 1600 cm^{-1} ve 1400 cm^{-1} civarı olan keskin bantlar karboksil gruplarının asimetrik ve simetrik gerilme titreşimleri, 1000 cm^{-1} civarında olan bant ise C-O gruplarından kaynaklanmaktadır. Yapıya mantar dahil edildiğinde 2900 cm^{-1} civarında iki keskin pik çıkması mantarın yapıya dahil edildiğini göstermektedir. $2000\text{--}2500\text{ cm}^{-1}$ aralığında görülen piklerin ise atmosferik (CO_2) girişimden kaynaklandığı düşünülmektedir (Mohammed vd., 2022).



Şekil 1. Aljinat mikrokürenin FTIR spektrumu



Şekil 2. *L. deliciosus* katkı aljinat mikrokürenin FTIR spektrumu



Şekil 3. a) Aljinat mikroküre ve b) *L. deliciosus* katkı aljinat mikrokürelerin SEM görüntüleri

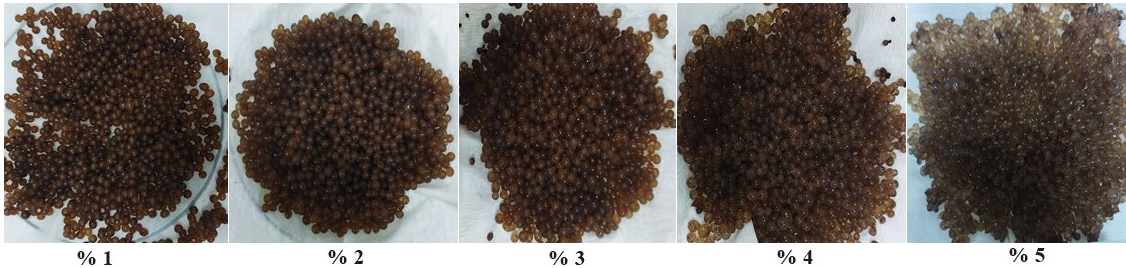
Aljinat mikroküre ve *L. deliciosus* katkı aljinat mikrokürelerin yüzey morfolojilerinin belirlenebilmesi için SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 3). Elde edilen sonuçlara göre, aljinat mikrokürelerin yüzeyi daha düz ve pürüzsüzken, *L. deliciosus*'un eklenmesiyle yüzey daha pürüzlü ve heterojen hale gelmiştir.

Farklı formülasyonlarda hazırlanan mikrokürelerin (Şekil 4) su içeriği, % şişme oranı ve jel fraksiyonu (F_{jel}) Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 0,5 g *L. deliciosus*'un eklendiği farklı oranlardaki aljinat mikrokürelerin F_{jel} değerleri birbirine yakın çıkarken, su içeriği en yüksek %3 (w/v) aljinat mikrokürede bulunmuştur. % şişme oranları karşılaştırıldığında en yüksek değer %3 (w/v) aljinatın kullanıldığı mikroküreler için %89,97 olarak bulunmuştur. Biyosorpsiyon çalışmalarında şişme yüzdesinin yüksek

olması nedeniyle %3'lük (w/v) aljinat mikrokürelerle devam edilmiştir.

Tablo 1. Farklı formülasyonlarda hazırlanan mikrokürelerin su içeriği, % şişme oranları ve jel fraksiyonu

	0,5 g <i>L. deliciosus</i>				
	Aljinat Miktarı (w/v)				
	%1	%2	%3	%4	%5
Su içeriği	7,52	7,77	8,25	7,12	7,56
% Şişme	85,15	87,74	89,97	83,58	84,57
F_{jel}	99,60	99,71	99,89	99,47	99,29



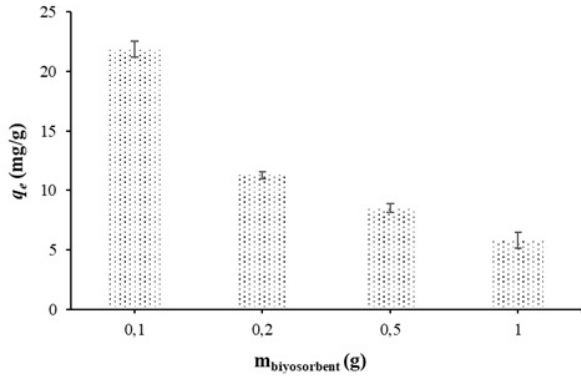
Şekil 4. Farklı oranlardaki mikrokürelerin optik görüntüleri

3.2 Biyosorpsiyon Çalışmaları

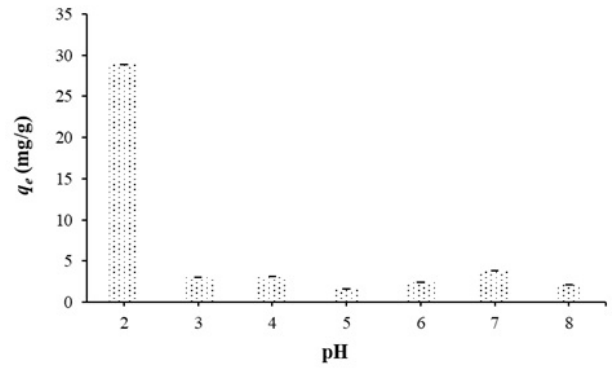
3.2.1 Biyosorbent miktarının biyosorpsiyon üzerine etkisi

Biyosorbent miktarının BB biyosorpsiyonu üzerindeki etkisinin incelenmesi için *L. deliciosus* katkı aljinat mikroküre biyokütlesi 0,1, 0,2, 0,5 ve 1,0 g kullanılmıştır. Başlangıç BB derişimi 50 mg/L, toplam hacim 50 mL olacak şekilde kesikli sistemde oda sıcaklığında 150 rpm karıştırma hızında 2 saat boyunca biyosorpsiyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Biyosorbent miktarının artmasıyla q_e değerinde azalma gözlenmiştir. Biyosorbent yüzeyinde bulunan bağlanmadan sorumlu aktif bölgelerin yeterli doygunluğa ulaşamaması nedeniyle q_e değerinde düşüş gözlenmektedir (Göçenoğlu Sarıkaya, 2022). Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek biyosorpsiyon

kapasitesi (q_e) 0,1 g biyosorbent kullanıldığı koşullarda belirlenmiştir ($21,845 \pm 0,652$ mg/g). Elde edilen verilere göre ilerleyen çalışmalarda biyosorpsiyon kapasitesinin en yüksek olduğu 0,1 g biyosorbent miktarı kullanılmıştır. Benzer şekilde *Trametes trogii* Berk. Biyokütlesinin biyosorbent olarak kullanıldığı kristal viyole boyar maddesinin biyosorpsiyon çalışmasında biyosorbent miktarı arttıkça q_e değerinin ters orantılı olarak azaldığı gözlemlenmiştir (Göçenoğlu Sarıkaya, 2025).



Şekil 5. Biyosorbent miktarının biyosorpsiyon üzerine etkisi



Şekil 6. pH'nın biyosorpsiyon üzerine etkisi

3.2.2. Ortam pH değerinin biyosorpsiyon üzerine etkisi

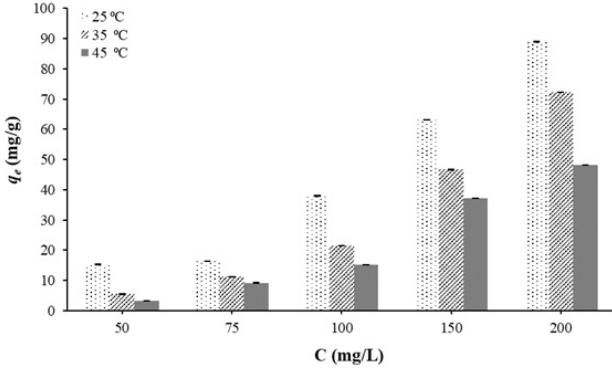
Biyosorpsiyon işlemlerinde, giderimi yapılacak kirleticilerin sulu çözeltilerindeki iyon yükü ve biyosorbentin fonksiyonel gruplarının yükü, ortamın pH değerinden kolayca etkilenmektedir. Bu nedenle bu tür proseslerde pH değeri oldukça önemlidir (Davis vd., 2003). Bu yüzden optimum pH değerinin belirlenebilmesi amacıyla biyosorpsiyon çalışmaları pH 2,0, 3,0, 4,0, 5,0, 6,0, 7,0 ve 8,0 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma koşulları: başlangıç BB derişimi 100 mg/L, 100 mL'lik erlenlerde toplam çözelti hacmi 50 mL olacak şekilde ayarlanmıştır. Biyosorbent miktarı 0,1 g, biyosorpsiyon sıcaklığı 25 °C, karıştırma hızı 150 rpm ve biyosorpsiyon süresi 2 saat olarak ayarlanmıştır. Elde edilen veriler Şekil 6'da gösterilmiştir. BB için q_e pH 2,0'da $28,859 \pm 0,03$ mg/g bulunmuştur. pH 2,0'da maksimum biyosorpsiyon kapasitesine ulaşmış; artan pH değerine bağlı olarak q_e değeri azalmıştır. Bu durum, biyosorpsiyon mekanizmasının temel olarak elektrostatik etkileşimler ile kontrol edildiğini göstermektedir. Düşük pH koşullarında, ortamdaki yüksek proton (H^+) derişimi, mantar biyokütlesindeki amino ($-NH_2$) ve aljinat yapısındaki karboksil ($-COOH$) gruplarının protonlanarak pozitif yük kazanmasına neden olmuştur. Pozitif yüklü biyosorbent yüzeyi ile anyonik karakterli boyar madde molekülleri arasında oluşan güçlü elektrostatik çekim, pH 2,0'da gözlenen yüksek adsorpsiyon kapasitesinin temel nedenini açıklamaktadır. Benzer şekilde, ay çiçeği küspesinin biyosorbent olarak kullanıldığı Remazol Red boyar maddesinin biyosorpsiyon çalışmasında en uygun boyar madde çözeltisinin pH değeri 2,0 olarak bulunmuştur (Gözükızıl ve Özbay, 2024).

3.2.3. Başlangıç BB derişiminin ve ortam sıcaklığının biyosorpsiyon üzerine etkisi

Biyosorpsiyon üzerine başlangıç BB derişiminin etkisinin araştırılması amacıyla 50-200 mg/L başlangıç BB derişimleri kullanılmıştır. Biyosorpsiyon koşulları 0,1 g biyosorbent miktarı, toplam çalışma hacmi 50 mL, 150 rpm karıştırma hızı ve 2 saatlik biyosorpsiyon süresi olarak ayarlanmıştır. Biyosorpsiyon prosesi 25 °C, 35 °C ve 45 °C'de gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve derişim arttıkça biyosorpsiyon kapasitesinin arttığı gözlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 7'de gösterilmiştir. Sıcaklık ve derişim arasındaki etkileşim incelendiğinde, artan sıcaklıklarda biyosorpsiyon kapasitesinin daha düşük çıktığı, derişim arttıkça ise biyosorpsiyon kapasitesinin tam tersi etkiyle arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 200 mg/L başlangıç BB derişimi için 25 °C'de q_e değeri $88,985 \pm 0,120$ mg/g bulunurken, bu değer 35 °C ve 45 °C için q_e değerleri sırasıyla $72,169 \pm 0,034$ mg/g ve $48,217 \pm 0,046$ mg/g olarak bulunmuştur. Benzer şekilde çevre dostu *Gracilaria corticata* (J.Agardh) J.Agardh deniz yosunu aktif karbon/Zn/aljinat polimerik kompozit mikroküreler kullanılarak sulu çözeltilerden kristal viyole boyasının giderilmesine yönelik deneysel ve modelleme çalışmalarında düşük sıcaklıklarda boya gideriminin daha yüksek olduğu gözlemlenmiş ve bu durum daha düşük sıcaklıklarda polimerik türler ve boya arasındaki daha yoğun elektrostatik etkileşimlere bağlanmıştır (Duraipandian vd., 2017). Daha yüksek sıcaklıklarda adsorpsiyonun azalması, desorpsiyon sürecinin artmasına bağlanabilir. Ayrıca yüksek sıcaklıklar adsorbentin aktif bölgeleri ile boya molekülleri arasındaki ve adsorpsiyon yüzeyindeki bitişik boya molekülleri arasındaki fiziksel çekim kuvvetlerinin zayıflamasına yol açar (Kumar ve Tamilarasan, 2013).

Başlangıç boyar madde derişiminin artması, biyosorpsiyon kapasitesinde doğrusal bir artış sağlamıştır. Bu durum, yüksek derişimlerde sıvı ve katı faz arasındaki derişim farkının artmasıyla açıklanabilir. Artan derişim farkı, kütle aktarım direncini yenmek için gereken itici gücü artırmış, böylece biyosorbent yüzeyindeki aktif bölgelerin daha verimli bir şekilde doyurulmasını sağlamıştır. 25 °C'de 50 mg/L başlangıç BB derişimi için q_e değeri $15,293 \pm 0,071$ mg/g bulunurken, 200 mg/L derişimde $88,985 \pm 0,120$ mg/g değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde 35 °C'de başlangıç

BB derişimi 50 mg/L'den 200 mg/L'ye çıkarken q_e değeri de $5,484 \pm 0,029$ mg/g'den $72,169 \pm 0,034$ mg/g'a çıkmıştır. *Metarhizium anisopliae* (Metschn.) Sorokin ile şeker kamışı küspesinin katı faz fermentasyonu sonucu oluşan atığın biyosorbent olarak kullanıldığı kristal viyole boyar maddesinin biyosorpsiyon çalışmasında da derişim arttıkça biyosorpsiyon kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir (Grassi vd., 2020). Benzer şekilde, kalsiyum aljinat mikrokürelerinin biyosorbent olarak kullanıldığı Basic Black boyar maddesinin biyosorpsiyon çalışmasında derişim arttıkça biyosorpsiyon kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir (Aravindhan vd., 2007).

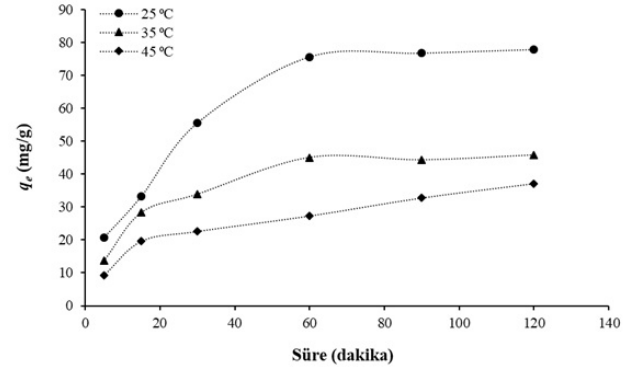


Şekil 7. Başlangıç boyar madde derişiminin ve sıcaklığın biyosorpsiyon üzerine etkisi

3.2.4. Temas süresinin biyosorpsiyon üzerine etkisi

Temas süresinin biyosorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, kinetik çalışmalar 5-120 dakika zaman aralığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 0,1 g biyosorbent miktarı, 50 mL çözelti hacmi ve 150 rpm karıştırma hızında sabit koşullar altında yürütülmüştür. Ayrıca, sıcaklığın biyosorpsiyon prosesine etkisini gözlemlemek amacıyla deney setleri 25 °C, 35 °C ve 45 °C arasındaki farklı sıcaklık değerlerinde tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir. q_e değeri 25 °C'de 5. dk'da 20,778 mg/g'ken, 120. dk'da 77,78 mg/g'a yükselmiştir. İlk 60 dk'da q_e değerinde artış gözlenirken, daha sonra doygunluğa ulaşmış ve doğrusal bir şekilde ilerlemiştir. 35 °C ve 45 °C'de ilk 5 dakikada q_e değeri sırasıyla 13,704 mg/g ve 9,334 mg/g olarak bulunmuş; biyosorpsiyon süresinin artmasıyla bu değerler 45,741 mg/g ve 37,037 mg/g'a yükselmiştir. Temas süresinin biyosorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkisi incelendiğinde, sürenin artışına paralel olarak biyosorpsiyon kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış eğilimi, adsorpsiyon kinetiğinin karakteristik davranışı ile uyumludur ve iki aşamalı bir mekanizma ile açıklanabilir. Sürecin başlangıç aşamasında, biyosorbent yüzeyindeki aktif bağlanma bölgelerinin tamamen boş olması ve çözelti ile katı yüzey arasındaki yüksek derişim farkı, boyar madde moleküllerinin yüzeye hızla tutunmasını sağlamıştır. Temas süresi ilerledikçe, boyar madde molekülleri mikrokürelerin iç yapısındaki gözeneklere difüze olmaya başlamış ve daha iç kısımdaki aktif bölgelere erişim sağlanmıştır. Bu durum, kapasitenin zamanla artmaya devam etmesinin temel nedenidir. Süreç, tüm aktif bölgelerin doygunluğa

ulaşmasıyla maksimum kapasiteye erişmiş ve bu noktadan sonra sabit bir biyosorpsiyon kapasitesi gözlenmiştir. Benzer şekilde, sulu çözeltiden fenolün giderilmesi için potansiyel adsorban olarak nanopartikül yüklü aljinat mikrokürelerin kullanıldığı çalışmada da süre arttıkça adsorpsiyon kapasitesinin arttığı, belirli bir süre sonra doygunluğa ulaştığı gözlemlenmiştir (Tiwari vd., 2012).



Şekil 8. Sürenin biyosorpsiyon üzerine etkisi

Farklı *Lactarius* türlerinin biyosorbent olarak kullanıldığına dair literatür çalışmaları oldukça sınırlıdır. Karagöz vd. (2018) yılında yapılan çalışmada, manyetik özellik kazandırılmış *L. salmonicolor* biyokütlesinin Reaktif Sarı 2 boyar maddesinin gideriminde q_e değerinin 115,23 mg/g olduğu rapor edilmiştir. Isık vd. (2021) yılında yapılan bir başka çalışmada ise *L. piperatus* biyokütlesi metilen mavisi gideriminde kullanılmış ve giderim miktarı %86,5 olarak rapor edilmiştir. Naeemullah vd. (2020) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise *L. accerrimus* biyokütlesinin Hg(II) gideriminde q_e değerinin 134,9 mg/g olduğu rapor edilmiştir. Göçenoğlu Sarıkaya (2022) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise *L. salmonicolor* için Remazol Marine Blue giderimi çalışılmış ve elde edilen sonuçlara göre q_e değeri 126,57 mg/g olarak rapor edilmiştir. Zhao vd. (2021) yılında yapılan bir başka çalışmada ise *L. salmonicolor* biyokütlesi Coomassie Brilliant Blue gideriminde kullanılmış ve giderim miktarının %99,19 olduğu rapor edilmiştir. Göçenoğlu Sarıkaya vd. (2023) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise oksitetrasiklin gideriminde *L. deliciosus* biyokütlesi kullanılmış ve q_e değeri $286,639 \pm 2,248$ mg/g olarak rapor edilmiştir. Göçenoğlu Sarıkaya vd. (2024) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise *L. deliciosus* biyokütlesinin tetrasiklin, doksisisiklin ve klortetrasiklin gideriminde etkinliği araştırılmış ve q_e değerlerinin sırasıyla $23,2 \pm 2,1$ mg/g, $121,2 \pm 6,2$ mg/g ve $216,4 \pm 4,2$ mg/g olduğu rapor edilmiştir.

3.3. Biyosorpsiyon İzotermi

L. deliciosus katkı aljinat mikrokürelerinin biyosorbent olarak kullanıldığı biyosorpsiyon çalışmalarında, boyarmaddelerin sulu çözeltilerdeki iyonlarıyla biyosorbent arasında gerçekleşen etkileşim mekanizmasının aydınlatılabilmesi için Langmuir, Freundlich ve D-R izoterm modellerine ait parametreler hesaplanmıştır. Langmuir izoterm modeli yüzey homojenliğini ve tek tabakalı biyosorpsiyonu açıklarken,

Freundlich izoterm modeli ise düzgün olmayan dağılıma sahip heterojen yüzeylere bağlanma için daha etkilidir (Langmuir, 1918; Freundlich, 1906). Freundlich izoterm modelinde biyosorbent yüzeyinde çok tabakalı bir biyosorpsiyon gözlenir. D-R izoterm modeli, biyosorpsiyonun hem homojen hem de heterojen yüzeylerde meydana geldiğini göstermektedir (Dubinin ve Radushkevich, 1947). Bu model ayrıca biyosorpsiyon enerjisinin ve biyosorpsiyonun fiziksel ya da kimyasal yapısının tahmin edilmesinde önemlidir (Chung vd., 2015; Avinash vd., 2025). Freundlich izoterm modelinde, n değeri 1'den küçük olduğunda, biyosorpsiyonun fiziksel olduğunu göstermektedir. Ayrıca D-R izoterm modeline göre, $E_{fe} < 8$ kJ/mol değeri biyosorpsiyonun fiziksel olduğunu göstermektedir (Çelik vd., 2024; Tran vd., 2016). Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir. Deneysel verilerin izoterm modellerine uyumu incelendiğinde, en yüksek korelasyon katsayılarına ($R^2 \geq 0,970$) Freundlich izoterm modelinde ulaşılmıştır. Ayrıca her üç sıcaklık için n değerlerinin 1'den küçük olması ve E_{fe} değerlerinin 8 kJ/mol'den düşük olması, biyosorpsiyonun fiziksel bir proses olduğunu göstermektedir. Bu durum, mantar dolgulu aljinat mikrokürelerin yüzeyinin heterojen bir yapıda olduğunu ve biyosorpsiyonun çok katmanlı bir mekanizma ile gerçekleştiğini göstermektedir. Langmuir modeline kıyasla Freundlich modelinin daha iyi sonuç vermesi, yüzeydeki aktif bölgelerin farklı enerji seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, *Bacillus subtilis* (Ehrenberg, 1835) Cohn, 1872'nin direkt biyokütle olarak kullanıldığı tekstil boyar maddesi Kongo kırmızısının biyosorpsiyon çalışmasında en uygun izoterm modelinin Freundlich modeli olduğu gözlenmiştir (Sarim vd., 2019).

Tablo 2. İzoterm modellerine ait parametreler

T (K)	298	308	318
q_e (deneysel)	88,985	72,169	48,217
Langmuir			
K_L (L/mg)	0,002	0,005	0,004
Q_L (mg/g)	0,302	0,097	0,099
R^2	0,964	0,968	0,89
Freundlich			
$K_F \times 10^{-3}$ (L/mg)	74,0	4,491	1,689
n	0,739	0,540	0,503
R^2	0,970	0,997	0,990
Dubinin-Radushkevich (D-R)			
$K_{D-R} \times 10^{-3}$ (mol ² /J ²)	0,600	0,900	1,0
Q_{D-R} (mg/g)	68,587	52,264	41,111
E_{fe} (kJ/mol)	0,029	0,024	0,022
R^2	0,772	0,845	0,910

Tablo 3. Kinetik modellere ait parametreler

T (K)	Yalancı birinci derece				Yalancı ikinci derece			Partikül içi difüzyon	
	q_e (deneysel)	q_e	k_1 (1/min)	R^2	q_e	k_2 (g/mg)/min	R^2	k_{id}	R^2
298	77,778	79,726	0,049	0,981	92,593	0,001	0,990	6,972	0,902
308	45,741	37,111	0,041	0,997	51,282	0,002	0,999	3,505	0,884
318	37,037	34,954	0,042	0,981	41,494	0,001	0,980	2,893	0,964

3.4. Biyosorpsiyon Kinetiği

Biyosorpsiyon kinetiğinin aydınlatılabilmesi için yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve partikül içi difüzyon kinetik modelleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir. Kinetik veriler değerlendirildiğinde, regresyon katsayılarının (R^2) yalancı ikinci derece kinetik modelinde daha yüksek olduğu ve modelden hesaplanan q_e değerlerinin deneysel q_e değerlerine daha yakın olduğu görülmüştür. Bu bulgu, biyosorpsiyon sürecinde hız kısıtlayıcı basamağın kimyasal sorpsiyon veya biyosorbent ile boyar madde arasındaki güçlü elektron etkileşimleri olduğunu doğrulamaktadır. Benzer şekilde, NaOH ile muamele edilmiş *Aspergillus niger* Tiegh dolgulu sodyum aljinat mikroküreleri kullanılarak metilen mavisi boyasının biyosorpsiyon çalışmasında korelasyon katsayıları yalancı ikinci derece kinetik modelinde daha yüksek bulunmuştur (Bilgi vd., 2023).

Biyosorpsiyon kinetiğinin mekanizmasını aydınlatmak amacıyla veriler partikül içi difüzyon modeline uyarlandığında, korelasyon katsayılarının (R^2) 0,884 ile 0,964 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Bu durum, adsorbatın adsorbanın gözeneklerine difüzyonunun hız belirleyici basamaklardan biri olduğunu, ancak sürecin tek kontrol edicisi olmadığını göstermektedir. Sıcaklığın 298 K'den 318 K'ye artırılmasıyla birlikte, partikül içi difüzyon hız sabiti (k_{id}) değerlerinin 6,972'den 2,893'e düştüğü tespit edilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla k_{id} değerlerinde gözlenen azalma, sistemde biyosorpsiyon hızının partikül içi difüzyonun hızı sınırlayan tek adım olmadığını göstermektedir. Ayrıca bu durum biyosorpsiyon prosesinde aktif difüzyon yerine daha çok fiziksel biyosorpsiyon ya da ekzotermik süreçlerin bir göstergesidir (Weber ve Moris, 1963; Ho ve McKay, 1999). Sıcaklık artışıyla birlikte deneysel q_e 'deki belirgin azalma dikkate alındığında, adsorpsiyonun ekzotermik doğasının ve azalan konsantrasyon farkı itici gücünün partikül içi kütle transfer hızını sınırladığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, adsorpsiyon hızının hem sınır tabaka difüzyonu hem de partikül içi difüzyon tarafından ortaklaşa kontrol edildiği değerlendirilmektedir.

3.5. Biyosorpsiyonun Termodinamiği

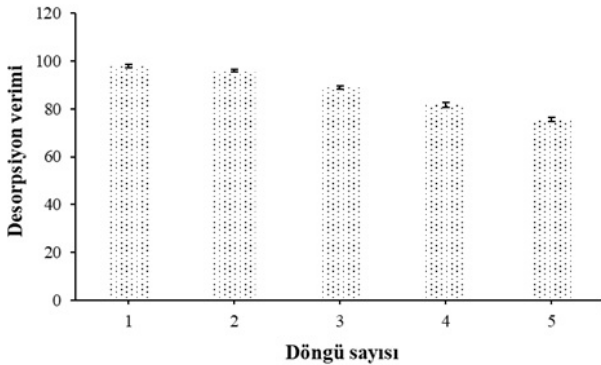
Termodinamik analizler 25 °C, 35 °C ve 45 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta hesaplanmıştır. Entalpi değişimi (ΔH°), standart serbest enerji değişimi (ΔG°) ve entropi değişimine (ΔS°) ait termodinamik parametreler Tablo 4'te verilmiştir. Hesaplanan negatif ΔG° değerleri, biyosorpsiyon sürecinin tüm sıcaklıklarda kendiliğinden gerçekleştiğini ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. ΔH° değerinin negatif (-23,225 kJ/mol) olması, sürecin ekzotermik doğasını ve fiziksel sorpsiyonun baskınlığını işaret ederken, pozitif ΔS° değeri (80,785 J/mol K) adsorpsiyon sırasında yüzeydeki su moleküllerinin serbest kalmasıyla katı-sıvı arayüzünde düzensizliğin arttığını ortaya koymaktadır (Shanti ve Equeenuddin, 2019).

Tablo 4. Termodinamik parametreler

T (K)	298	308	318
ΔG° (kJ/mol)	-47,299	-48,107	-48,915
ΔS° (J/mol K)		80,785	
ΔH° (kJ/mol)		-23,225	

3.6. Desorpsiyon ve Tekrar Kullanım

Desorpsiyon ajanı olarak etanolün kullanıldığı tekrar kullanım çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre desorpsiyon verimi beş döngü sonunda %97,789 $\pm$ 0,627'den %75,513 $\pm$ 0,951'e düşmektedir (Şekil 9). Buna göre, *L. deliciosus* katkılı aljinat mikrokürelerin BB gideriminde etkili ve tekrar kullanımı açısından verimli olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Biyosorbentin tekrar kullanımı

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yabani yenilebilir bir mantar türü olan *L. deliciosus* katkılı aljinat mikroküreler hazırlanmış ve sulu çözeltilerden Bezaktiv Black boyar maddesinin giderimi incelenmiştir. Biyosorbentin karakterizasyonunun ardından boyar madde gideriminde optimum koşullar belirlenmiş; elde edilen sonuçlara göre en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi 25 °C'de, 200 mg/L başlangıç boyar madde derişimi için pH 2,0'da 28,859 $\pm$ 0,03 mg/g olarak bulunmuştur. Kinetik, izoterm ve termodinamik parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, biyosorpsiyonun her üç sıcaklık değeri için de Freundlich

izoterm modeline ve yalancı ikinci derece kinetik modele uygun olduğu belirlenmiştir. Termodinamik parametrelere göre, biyosorpsiyon ekzotermik ($\Delta H^\circ = -23,225$ kJ/mol) ve kendiliğinden ($\Delta G^\circ < 0$) gerçekleşmektedir. Etanolün desorpsiyon ajanı olarak kullanıldığı tekrar kullanım çalışmalarında biyosorbentin yeniden kullanımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre desorpsiyon verimi beş döngü sonunda %97,789 $\pm$ 0,627'den %75,513 $\pm$ 0,951'e düşmüştür. Bu çalışmada, ilk kez *L. deliciosus* biyokütlesi aljinat mikrokürelere dahil edilerek sulu çözeltilerden boyar madde giderimini sağladığı ve biyosorbentin 5 tekrara kadar kullanımına olanak vermesiyle sürdürülebilir biyosorpsiyon çalışmalarında etkin kullanım potansiyeline sahip olabileceği rapor edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda farklı kirleticilerin arıtımında biyosorbent olarak kullanımı ve proses büyütme gibi farklı deney tasarımlarının yapılması hedeflenmektedir.

Yazar Katkıları

Esmagül IHLAMUR: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntem, (c) Literatür Taraması, (f) Veri Toplama, (h) Metin Yazma

Aslı GÖÇENOĞLU SARIKAYA: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntem, (d) Danışmanlık, (e) Malzeme, Kaynak Sağlama, (g) Veri Analizi, Yorumlama, (i) Eleştirel İnceleme

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gereken tüm kurallara uyulduğunu ve bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Teşekkür

Projeye verdiği destekten ötürü BUÜ BAP Birimine teşekkürlerimizi sunarız. Boya temini için Karesi Polyester ve Petrokimya Sanayi A.Ş. ve Yüksek Kimyager Gizem Bayaçalı Uygun'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Aravindhan, R., Fathima, N. N., Rao, J. R., & Nair, B. U. (2007). Equilibrium and thermodynamic studies on the removal of basic black dye using calcium alginate beads. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 299(1-3), 232-238. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.11.045>
- Ates, B., Koytepe, S., Ulu, A., Gurses, C., & Thakur, V. K. (2020). Chemistry, structures, and advanced applications of nanocomposites from biorenewable resources. *Chemical Reviews*, 120(17), 9304-9362. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00553>
- Avcı B. B., & Erkan G. (2024). The investigation of the possible use of olive oil production wastes in polyamide (6.6) dyeing. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(3), 1673-1692. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2023257505>
- Avinash, G. P., Namasivayam, S. K. R., Prakash, P., & Shree, S. K. (2025). Effectiveness of pre-treated *Lemna minor* biomass in removing methyl orange dye from aqueous solutions: adsorption efficacy, kinetics, and ecotoxicity analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 20569-20588. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06610-9>
- Bayrak, G., İdil, N., & Perçin, I. (2023). *Penicillium chrysogenum*-loaded hybrid cryogel discs for heavy metal removal. *Chemical Papers*, 77, 3921-3936. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02752-0>
- Bilgi, M., Ugraskan, V., & Isik, B. (2023). Biosorption studies of methylene blue dye using NaOH-treated *Aspergillus niger*-filled sodium alginate microbeads. *Chemical Engineering Communications*, 210(9), 1405-1419. <https://doi.org/10.1080/00986445.2022.2103685>
- Chakraborty, S., Basak, B., Dutta, S., Bhunia, B., & Dey, A. (2013). Decolorization and biodegradation of congo red dye by a novel white rot fungus *Alternaria alternata* CMERI F6. *Bioresource Technology*, 147, 662-666.
- Chung, H. K., Kim, W. H., Park, J., Cho, J., Jeong, T. Y., & Park, P. K. (2015). Application of Langmuir and Freundlich isotherms to predict adsorbate removal efficiency or required amount of adsorbent. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 28, 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.02.021>
- Çelik, M. S., Kütük, N., Yenidünya, A. F., Çetinkaya, S., & Tüzün, B. (2024). Removal of safranin O from wastewater using *Streptomyces griseobrunneus* dead biomass and in silico calculations. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 25873-25884.
- Davis, T. A., Volesky, B., & Mucci, A. (2003). A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*, 37(18), 4311-4330. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00293-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00293-8)
- Dubinin, M. M. & Radushkevich, L. V. (1947). Equation of the characteristic curve of activated charcoal. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Physical Chemistry Section*, 55, 327-329.
- Duraipandian, J., Rengasamy, T., & Vadivelu, S. (2017). Experimental and modeling studies for the removal of crystal violet dye from aqueous solutions using eco-friendly *Gracilaria corticata* seaweed activated carbon/Zn/Alginate Polymeric composite beads. *Journal of polymers and the environment*, 25(4), 1062-1071. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0879-z>
- Duranoğlu, D., & Yılmaz, Y. (2024). Optimization of titanium dioxide production process for photocatalytic degradation of 2,4 dichlorophenoxyacetic acid. *Journal of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(1), 233-242. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1162306>
- Freundlich, H. M. (1906). Over the adsorption in solution. *Journal of Physical Chemistry A*, 57, 385-470.
- Göçenoğlu Sarıkaya, A. (2022). Biosorption of Remazol Marine Blue textile dye by *Lactarius salmonicolor* biomass: Kinetic, isothermal and thermodynamic parameters. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(2), 1121-1138. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.900425>
- Göçenoğlu Sarıkaya, A. (2025). Batch and ultrasonically assisted biosorption of Crystal violet dye by *Trametes trogii* biomass. *Journal of the Faculty of Architecture of Gazi Üniversitesi*, 40(4), 2249-2262. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1619448>
- Göçenoğlu Sarıkaya, A., Erden Kopar, E., & Osman, B. (2024). Congo red removal from aqueous solution via biosorption onto *Trametes trogii*-loaded poly(hydroxyethyl methacrylate) cryogel. *Journal of Polymer Science*, 62(18), 4302-4314. <https://doi.org/10.1002/pol.20240107>
- Göçenoğlu Sarıkaya, A., Osman, B., & Tümay Özer, E. (2023). *Lactarius deliciosus* biyokütlesi ile sulu çözümlerden oksitetrasiklin giderimi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1135-1152. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1300792>
- Göçenoğlu Sarıkaya, A., Osman, B., & Tümay Özer, E. (2024). Biosorption of tetracycline antibiotics by *Lactarius deliciosus* biomass. *Chemical Engineering Communications*, 211(4), 592-602. <https://doi.org/10.1080/00986445.2023.2266684>
- Gözükızıl, M. F., & Özbay, N. (2024). Ayçiçeği biyosorbenti kullanılarak Remazol Red RR boyar maddesi içeren tekstil atık sularından biyosorpsiyon yöntemiyle renk gideriminin optimizasyonu ve kinetik modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(5), 700-706. <https://doi.org/10.5505/pajes.2023.89657>
- Grassi, P., Drumm, F. C., Spannemberg, S. S., Georgin, J., Tonato, D., Mazutti, M. A., Gonçalves, J. O., Oliveira, M. L. S., Dotto, G. L., & Jahn, S. L. (2020). Solid wastes from the enzyme production as a potential biosorbent to treat colored effluents containing crystal violet dye. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(10), 10484-10494. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07664-0>
- He, J., & Chen, J. P. (2014). A comprehensive review on

- biosorption of heavy metals by algal biomass: materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresource technology*, 160, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.068>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second-order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34, 451.
- Isik, B., Ugraskan, V., & Cankurtaran, O. (2021). Effective biosorption of methylene blue dye from aqueous solution using wild macrofungus (*Lactarius piperatus*). *Separation Science and Technology*, 57(6), 854-871. <https://doi.org/10.1080/01496395.2021.1956540>
- Karagöz, R., Tunalı Akar, S., Turkyilmaz, S., Çelik, S., & Akar, T. (2018). Process design and potential use of a regenerable biomagsorbent for effective decolorization process. *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 93, 554-565. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.09.001>
- Kumar, M., & Tamilarasan, R. (2013). Modeling of experimental data for the adsorption of methyl orange from aqueous solution using a low-cost activated carbon prepared from *Prosopis juliflora*. *Polish Journal of Chemical Technology*, 15(2), 29-39. <https://doi.org/10.2478/pjct-2013-0021>
- Kütük, N., Boran, F., & Güner S. Ç. (2023). Reduction of graphene oxide using purple cabbage extract and investigation of photocatalytic activity by oxidation. *Journal of Engineering and Architecture of Gazi University*, 383, 1331-1343. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1062651>
- Lagergren, S. (1898). Zur theorie der sogenannten adsorption gel oster stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 25, 1-39.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403.
- Lima, E. C., Gomes, A. A., & Tran, H. N. (2020). Comparison of the nonlinear and linear forms of the van't Hoff equation for calculation of adsorption thermodynamic parameters (ΔS° and ΔH°). *Journal of Molecular Liquids*, 311, 113315. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113315>
- Mirończuk-Chodakowska, I., & Witkowska, A. M. (2020). Evaluation of Polish wild mushrooms as beta-glucan sources. *International journal of environmental research and public health*, 17(19), 7299. <https://doi.org/10.3390/ijerph17197299>
- Mohammadi, R., Azadmehr, A., & Maghsoudi, A. (2019). Fabrication of the alginate-combusted coal gangue composite for simultaneous and effective adsorption of Zn (II) and Mn (II). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(6), 103494. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103494>
- Mohammed, C., Lalgée, L., Kistow, M., Jalsa, N., & Ward, K. (2022). On the binding affinity and thermodynamics of sodium alginate-heavy metal ion interactions for efficient adsorption. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 3, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100203>
- Morris, E. R., Rees, D. A., & Thom, D. (1980). Characterisation of alginate composition and block-structure by circular dichroism. *Carbohydrate Research*, 81(2), 305-314. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)85661-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)85661-X)
- Mostafa, A. A. F., Elshikh, M. S., Al-Askar, A. A., Hadibarata, T., Yuniarto, A., & Syafiuddin, A. (2019). Decolorization and biotransformation pathway of textile dye by *Cylindrocephalum aurelium*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 42(9), 1483-1494. <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02144-3>
- Mourpichai, A., Jintakosol, T., & Nitayaphat, W. (2018). Adsorption of gold ion from a solution using montmorillonite/alginate composite. *Materials Today: Proceedings*, 5(7), 14786-14792. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.006>
- Naeemullah, Tüzen, M., Sarı, A., & Turkecul, I. (2020). Influential bio-removal of mercury using *Lactarius acerrimus* macrofungus as novel low-cost biosorbent from aqueous solution: Isotherm modeling, kinetic and thermodynamic investigation. *Materials Chemistry and Physics*, 249, 123168. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123168>
- Nuzi, W. N. A. W., Hanif, M. A., Ibrahim, N., Dahalan, F. A., Lutpi, N. A., Hasan, M., Ali, U. F., & Nazri, R. N. H. R. (2025). Sulfur dioxide removal using deep eutectic solvent-functionalized palm kernel shell-activated carbon. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 16591-16605. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06560-2>
- Pearce, C. I., Lloyd, J. R., & Guthrie, J. T. (2003). The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review. *Dyes and pigments*, 58(3), 179-196. [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(03\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(03)00064-0)
- Rocha, S. M., Molinas, E., Rodrigues, I. S., & Neto, I. E. L. (2023). Assessment of total evaporation rates and its surface distribution by tridimensional modeling and remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 327, 116846. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116846>
- Sarim, K. M., Kukreja, K., Shah, I., & Choudhary, C. K. (2019). Biosorption of direct textile dye Congo red by *Bacillus subtilis* HAU-KK01. *Bioremediation Journal*, 23(3), 185-195. <https://doi.org/10.1080/10889868.2019.1641466>
- Shanti, K., & Equeenuddin, S. M. (2019). Adsorption of hexavalent chromium using natural goethite: isotherm, thermodynamic and kinetic study. *Journal of Geological Society of India*, 93, 285-292. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1175-z>
- Söğüt, E. G. & Çelebi, M. (2024). Removal of Thioflavin T and Co(II) ions from aqueous solution using GO and GO-EDTA; adsorption parameters and mechanism. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 391, 371-383. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1091585>
- Tala, M. F., Qin, J., Ndongo, J. T., & Laatsch, H. (2017). New azulene-type sesquiterpenoids from the fruiting bodies of *Lactarius deliciosus*. *Natural Products and Bioprospecting*, 7, 269-273. <https://doi.org/10.1007/s13659-017-0130-1>
- Tay, C. C., Liew, H. H., Abdul-Talib, S., & Redzwan, G. (2016).

- Bi-metal biosorption using *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate (PSMS) as a biosorbent: isotherm, kinetic, thermodynamic studies and mechanism. *Desalination and Water Treatment*, 57(20), 9325-9331. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1027957>
- Tagyan, A. I., Yasser, M. M., Mousa, A. M., Alkhalifah, D. H. M., Hozzein, W. N., & Marzouk, M. A. (2023). Potential application of innovative *Aspergillus terreus*/sodium alginate composite beads as eco-friendly and sustainable adsorbents for Alizarin Red S dye: Isotherms and kinetics models, *Microorganisms*, 11(5), 1135. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051135>
- Thakur, S., Sharma, B., Verma, A., Chaudhary, J., Tamulevicius, S., & Thakur, V. K. (2018). Recent progress in sodium alginate based sustainable hydrogels for environmental applications. *Journal of cleaner production*, 198, 143-159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.259>
- Tiwari, A., Soni, A., & Bajpai, A. K. (2012). Nanoparticles loaded alginate beads as potential adsorbent for removal of phenol from aqueous solution. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 42(8), 1158-1166. <https://doi.org/10.1080/15533174.2012.682835>
- Tran, H. N., You, S. J., & Chao, H. P. (2016). Thermodynamic parameters of cadmium adsorption onto orange peel calculated from various methods: a comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(3), 2671-2682.
- Verbeken, A., & Nuytinck, J. (2013). Not every milkcap is a *Lactarius*. *Scripta Botanica Belgica*, 51, 162-168.
- Wang, H., Liu, J., Fan, X., Ren, J., Liu, Q. & Kong, B. (2022). Fabrication, characterisation, and application of green crosslinked sodium alginate hydrogel films by natural crab-shell powders to achieve drug sustained release. *LWT*, 171, 114147. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114147>
- Wang, X. S., Liu, X., Wen, L., Zhou, Y., Jiang, Y., & Li, Z. (2018). Comparison of basic dye Crystal Violet removal from aqueous solution by low-cost biosorbents. *Separation Science and Technology*, 43, 3712-3731. <https://doi.org/10.1080/01496390802222640>
- Wang, B., Zhou, K., Liu, H., & Tang, W. Z. (2016). Biosorption behavior and reuse potential of waste biomass of *Aspergillus fumigatus*, previously used in humic acid biosorption, in removal of reactive blue 49. *Environmental Processes*, 3, 843-856. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0188-5>
- Wang, S., Vincent, T., Faur, C., & Guibal, E. (2018). A comparison of palladium sorption using polyethylenimine impregnated alginate-based and carrageenan-based algal beads. *Applied Sciences*, 8(2), 264. <https://doi.org/10.3390/app8020264>
- Weber, W. J., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31-60.
- Zhao, J., Wu, Q. X., Cheng, X. D., Su, T., Wang, X. H., Zhang, W. N., Lu, Y. M., & Chen, Y. (2021). Biodegradation and detoxification of the triphenylmethane dye coomassie brilliant blue by the extracellular enzymes from mycelia of *Lactarius deliciosus*. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 15(2), 421-436. <https://doi.org/10.1007/s11705-020-1952-7>