

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

REACTIVE BLACK 5 BİYOREMEDİASYONUNDA ZİRAİ ATIKTA
GELİŞTİRİLEN *Saccharomyces cerevisiae* KULLANIMI

Benazir BAYYAR

BİYOLOJİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2025

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

REACTIVE BLACK 5 BİYOREMEDİASYONUNDA ZİRAİ ATIKTA GELİŞTİRİLEN *Saccharomyces cerevisiae* KULLANIMI

Benazir BAYYAR

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sevgi Ertuğrul KARATAY

Tekstil endüstrisinin atık sularının içerisinde bulunana boyalar insan ve çevre sağlığı için önemli ölçüde tehdit oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında, tekstil atık sularının neden olduğu kirliliğe karşı çevre dostu ve sürdürülebilir bir biyolojik çözüm olarak *Saccharomyces cerevisiae* mayasının biyoremediasyon potansiyeli araştırılmıştır. Tekstil endüstrisinde önemli bir kullanım alanına sahip olan azo yapılı reaktif boyalardan biri olan Reaktif Black 5 (RB5) boyasının gideriminde, çay atığı, balkabağı posası ve havuç posası gibi farklı zirai atıklarda geliştirilmiş *S. cerevisiae* mayasının biyoakümülyasyon kapasitesi incelenmiştir. En yüksek RB5 giderim verimini elde etmek için biyoakümülyasyonu etkileyen pH değeri (4-7) başlangıç RB5 konsantrasyonu (50-600 mg/L) ve biyoakümülyasyon zamanı (0-168 saat) gibi önemli parametreler optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek boya giderimi 50 g/L havuç posası atığında pH 5'te 50 mg/L RB5 boya konsantrasyonunda %99.07±0.26 olarak saptanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışma ile tekstil atık sularında RB5 gibi toksik ve biyolojik olarak zor parçalanabilen boyaların gideriminde havuç posasında geliştirilen *S. cerevisiae* biyokütlesinin umut vadeden, düşük maliyetli ve çevre dostu bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, tekstil atık sularının biyolojik arıtımında tarımsal atıkların değerlendirilmesi ile çevre kirliliğini azaltmada ve ekonomik fayda sağlayabileceği gösterilmiştir.

Temmuz 2025, 90 sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyoremediasyon, *Saccharomyces cerevisiae*, tekstil boyaları, Reactive Black 5, atık su arıtımı, havuç posası

ABSTRACT

Master Thesis

USE OF *Saccharomyces cerevisiae* GROWN IN AGRICULTURAL WASTE FOR REACTIVE BLACK 5 BIOREMEDIATION

Benazir BAYYAR

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Biology

Supervisor: Prof. Dr. Sevgi ERTUĞRUL KARATAY

Textile industry wastewater pose a significant threat to both environment and human health because of containing dyes. In this thesis study, the bioremediation potential of *Saccharomyces cerevisiae* yeast was investigated as an environmentally friendly and sustainable biological solution to the pollution caused by textile wastewater. The study focused on the bioaccumulation capacity of *S. cerevisiae* developed on various agricultural wastes such as tea waste, pumpkin pomace, and carrot pomace, for the removal of Reactive Black 5 (RB5), an azo-based reactive dye commonly used in the textile industry. To achieve the highest RB5 removal efficiency, important parameters affecting bioaccumulation such as, including pH values (4–7), initial RB5 concentrations (50–600 mg/L), and bioaccumulation time (0–168 hours) were optimized. As a result of study, the highest dye removal efficiency was determined as $99.07 \pm 0.26\%$ at pH 5 with 50 mg/L RB5 concentration using *S. cerevisiae* biomass developed on 50 g/L carrot pomace.

This study demonstrates that *S. cerevisiae* biomass developed on carrot pomace could serve as a promising, cost-effective, and environmentally friendly alternative for the removal of toxic and biologically persistent dyes such as RB5 from textile wastewater. Furthermore, the use of agricultural wastes in the biological treatment of textile effluents offers potential benefits in reducing environmental pollution and promoting economic value.

July 2025, 90 pages

Key Words: Bioremediation, *Saccharomyces cerevisiae*, textile dyes, Reactive Black 5, wastewater treatment, carrot pulp

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans kararımın sonrasında her adımda bana göstermiş olduğu anlayış ve tez aşamasındaki önerileri ve tecrübesiyle her konuda bana destek olan, emeğini ve yardımını esirgemeyen kıymetli hocam, Sayın Prof. Dr. Sevgi ERTUĞRUL KARATAY (Ankara Üniversitesi Biyoloji Bölümü) içten bir şekilde teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın deney ve yazım aşamasında kıymetli zamanlarından ayırarak yardımlarını ve emeklerini esirgemeyen değerli Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Biyoteknoloji Laboratuvarı doktora öğrencileri Eda Açıklık ve Aybüke Kut Yılmaz'a teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite hayatımın ilk zamanlarından bu yana bana daima destek olan anlayış ve sevgisini esirgemeyen sevgili eşim Mustafa Bayyar' a ve bilimin ışığında yetiştirmeye çabaladığımız kızım Asya Bayyar ve oğlum Hikmet Aral Bayyar'a teşekkürümü sunarım.

Eğitim hayatımda bana cesaret veren, daima yanımda olan ve desteğini esirgemeyen sevgili annem Selma Gümüş ve babam Mahmut Gümüş'e teşekkürlerimi sunarım. Ders ve deney süreçlerimdeki yoğun çalışmalarında çocuklarıma yokluğumu hissettirmeyerek onlarla ilgilenen ve desteğini esirgemeyen sevgili rahmetli annem Türkan Bayyar'a teşekkürlerimi sunarım.

Yaşam telaşı içinde hayalimden vazgeçmemem gerektiğini sıklıkla hatırlatan sevgili teyzem Gülden Yuva' ya, ablam Letafet Çelik'e, arkadaşlarım Tuğçe Andaç'a ve Pınar Kurt'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, Cumhuriyetimizi kurarak yolumuzu aydınlatan Mustafa Kemal ATATÜRK'e minnet dolu saygılarımı sunar açtığı yolda gösterdiği hedefe durmadan yürüyeceğime and içerim.

Benazir BAYYAR
Ankara, Temmuz 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1 Tekstil Atık Suları	4
2.2 Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Boyaların Özellikleri	6
2.3 Boyaların Sınıflandırılması	7
2.3.1 Asidik boyalar.....	9
2.3.2 Bazik boyalar	9
2.3.3 Direkt boyalar.....	10
2.3.4 Dispers boyalar	11
2.3.5 Pigment boyalar.....	12
2.3.6 Vat boyalar.....	13
2.3.7 İndigo boyalar.....	14
2.3.8 Sülfür boyalar	14
2.3.9 Mordan boyalar.....	15
2.3.10 Reaktif boyalar	16
2.3.11 Azo boyalar	17
2.4 Tekstil Atık Sularının Arıtımı	19
2.4.1 Fiziko-kimyasal arıtım yöntemleri	20
2.4.1.1 İyon değişimi.....	21
2.4.1.2 Membran filtrasyonu	22
2.4.1.3 Adsorpsiyon	23
2.4.1.4 Koagülasyon ve Flokülasyon	24
2.4.2 Kimyasal yöntemler	25
2.4.2.1 Oksidasyon.....	25

2.4.2.2 Ozonlama	26
2.4.3 Elektrokimyasal yöntem	26
2.4.4 Fotokimyasal yöntem	28
2.4.5 Biyolojik yöntemler	29
2.4.5.1 Aerobik arıtım	32
2.4.5.2 Anaerobik arıtım	33
2.4.5.3 Biyoremediasyon	35
2.5 Tekstil Atık Sularının Arıtımında Mayaların Önemi	41
2.6 Maya Gelişiminde Zirai Atık Kullanılması	45
2.7 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	48
2.8 <i>Candida boidinii</i>	50
2.9 <i>Kluyveromyces marxianus</i>	51
3. MATERYAL ve YÖNTEM	54
3.1 Materyal	54
3.1.1 Mikroorganizmanın elde edilmesi ve saklanması	54
3.1.2 Boya stok solüsyonunun deneyler için hazırlanması	54
3.1.2.1 Reactive black 5	54
3.1.3 Zirai atıkların temini ve saklanması	55
3.2 Yöntem	55
3.2.1 Zirai atıkların ön-işlem yöntemi	55
3.2.2 Biyogiderim deneyleri	55
3.2.3 Başlangıç pH değerinin biyogiderim etkisinin araştırılması	56
3.2.4 Başlangıç boya konsantrasyonunun biyogiderime etkisinin belirlenmesi	56
3.3 Analitik Yöntemler	56
3.3.1 Spektrofotometrik ölçümler	56
3.3.2 Biyogiderim veriminin hesaplanması	57
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	58
4.1 Deneylerde Kullanılan Atıkların Başlangıç İndirgen Şeker Miktarlarının Belirlenmesi	58
4.2 Başlangıç Ham Maddenin Seçimi	58
4.3 Başlangıç pH Değerinin Biyogiderim Üzerine Etkileri	59
4.4 Farklı Başlangıç Boya Konsantrasyonlarının Zamana Bağlı Biyogiderim Üzerine Etkisi	60
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	64

5.1 Başlangıç pH Faktörünün Biyogiderime Etkileri	64
5.2 Başlangıç Boya Konsantrasyonun Biyogiderim Üzerine Etkileri.....	65
5.3 Zirai Atıkların <i>Saccharomyces cerevisiae</i> Gelişimine Etkisi	67
5.4 Sonuç	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	90



SİMGELER DİZİNİ

C_{ad}	Adsorpsiyon durumunda rastgele bir anda adsorplanmış boya konsantrasyonu (mg/L)
C_{den}	Biyoakümülyasyon koşullarında dengedeyken adsorplanmamış komponent konsantrasyonu (mg/L)
C_o	Biyoakümülyasyon koşullarına ilave edilen başlangıç komponent konsantrasyonu (mg/L)
$C_{o,RB5}$	Reactive Black 5 boyasının başlangıç konsantrasyonu (mg/L)
q_m	Kurutulmuş bir gram hücredeki maksimum boya miktarı (g g ⁻¹) Adsorpsiyon durumunda adsorbentin rastgele bir anda adsorpladığı komponent konsantrasyonu (mg/l)
C_f	Herhangi bir anda biyoakümülyasyon ortamında kalan boya derişimi (mg/L) ifade etmektedir.
RB5	Reactive Black 5

Kısaltmalar

t	Zaman (dakika)
T	Sıcaklık (°C)
X	Adsorbentin çözeltide bulunan konsantrasyonu (g/L)
X_o	Adsorbentin çözeltide bulunan başlangıç konsantrasyonu (g/L)
X_m	Maksimum kurutulmuş hücre kütlesi (g l ⁻¹)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kromojen ve oksokrom boya maddelerinin kimyasal yapıları	7
Şekil 3.1 Reactive Black 5 boyasının kimyasal yapısı.....	54
Şekil 4.1 Farklı Başlangıç RB5 boya konsantrasyonlarının mikrobiyal gelişime etkisi.....	62



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Reactive Black 5'in kimyasal özellikleri	55
Çizelge 4.1 Farklı zirai atıklarında geliştirilen <i>S. cerevisiae</i> RB5 boya giderimine etkisi	59
Çizelge 4.2 Farklı pH değerlerinin biyogiderime etkisi	60
Çizelge 4.3 Farklı başlangıç RB5 boya konsantrasyonlarının biyogiderime etkisi	61
Çizelge 4.4 Farklı başlangıç RB5 boya konsantrasyonlarının biyogideriminde C_f (mg/L), q_m (mg/g) ve X_m (g/L) değerleri	63



1. GİRİŞ

Nüfus artışına ve endüstriyellemeye bağlı olarak, başta su kirliliği olmak üzere çevre kirliliği gün geçtikçe artış göstermektedir. Özellikle atık sulardaki kirlilik oranı insan sağlığı ve ekoloji açısından tehlikeli boyutlarda olduğu gözlenmektedir. Yüksek tuzluluk oranı, yüksek sıcaklık, pH değişimi vb. gibi değişimler tekstil atık sularında görülmektedir. Ek olarak boyaların canlı renkleri, atık suların rengini ve gaz çözünürlüğünü olumsuz etkilediği için sucul yaşam formları açısından tehlike oluşturmaktadır. (Holkar vd. 2016).

Dünya’da yaklaşık olarak yılda 75000 tondan fazla boya maddesi üretilmekte ve bunların 100.000 tondan fazlası ticari amaçla kullanılmaktadır (Chandanshive vd. 2020). Azo boyalar ticari anlamda kullanılan sentetik boyaların en büyük grubunu temsil eder ve 3000’den fazla farklı çeşidi ile tekstil, kağıt, gıda, kozmetik, ilaç endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Maximo ve ark, 2003). Özellikle yapısında sülf-, nitro- grupları ve halojenler bulunmayan azo boyalar yağlarda çözünme özellikleri bakımından aerobik çevre koşulları altında kalıcı olma eğilimindedirler (Kurbanova ve ark. 1998; Reiger ve ark. 2002). Bu süreçlerden kaynaklanan atık su, Toplam Organik Karbon (TOC), Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOD), Kimyasal Oksijen İhtiyacı (COD), askıda katı maddeler, tuzluluk, renk, geniş bir Ph aralığı (5-12) ve azo boyalar gibi organik bileşiklerin inatçılığı açısından olumsuz etkiler yaratır.(Savin II vd. 2008) BOD/COD oranı 0.2 ile 0.5 arasında değişmektedir ve bu, atık suların büyük oranda biyolojik olarak parçalanamayan organik madde içerdiğini göstermektedir (Faryal R.ve ark. vd.2005, Kuberan T. ve ark. vd. 2011) Örneğin, reaktif boyalarla 1 kg pamuk boyamak için 0,6–0,8 kg NaCl, 30–60 g boya ve 70–150 L su gereklidir; üretilen atık su, uygulanan reaktif boyaların %20–30’unu bağlanmamış halde içerir, ortalama 2000 ppm konsantrasyona, yüksek tuz içeriğine ve boyama yardımcı maddelerine sahiptir.(Babu BR. ve ark. vd. 2007)

Tekstiller günlük hayatımızın bir parçasıdır; gündelik giyimden ev tekstillerine, tıbbi uygulamalarda kullanılan daha ileri düzeydeki malzemelere ve endüstriyel ürünlere kadar geniş bir yelpazede yer alırlar. Tekstiller bir amacı yerine getirmek üzere tasarlanır;

yüksek performanslı liflerin bir sonraki nesli, teknik uygulamalar için karmaşık işlevler sunacaktır. Tekstiller binlerce yıldır insan faaliyetleriyle eş anlamlı olmuştur ve yıllar ilerledikçe kullanımları daha geniş ve çeşitli hale gelmiştir (McCloughlin ve Hayes, Jones & Stylios, vd.2013) .

Sentetik boyalar; doğal boyalara nazaran kullanım kolaylığı ve düşük maliyet sebebiyle sıklıkla tercih edilen boyalardır. (Silva vd. 2021). Moleküler yapıları karmaşık olan sentetik boyalar, renk giderimi sürecinde çeşitli zorluklar çıkarabilen türler arasındadır. Sentetik boyaların büyük bir grubunu oluşturan reaktif bazlı azo boyalar; renk çeşitliliği, renklerin kalıcı olması, düşük maliyet ve uygulama kolaylığı gibi sebeplerden dolayı sıklıkla kullanılmaktadır. (Patil vd. 2022). Atık sulardan boyaların uzaklaştırılması için çeşitli fizikokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin uygulanmasının, ekonomik olarak daha fazla enerji ve kimyasal gerektirmesi, inatçı azo boyaları veya organik metabolitlerini tamamen ortadan kaldıramaması ve önemli miktarda çamur oluşturması gibi doğal dezavantajları vardır. Ayrıca bu yöntemler ikincil kirlilik sorunlarına da neden olur ve karmaşık prosedürler içerir (Forgacs ve ark. 2004). Yapılarından dolayı reaktif boyalar, biyolojik bozunmaya dirençli ve kanserojen etkisi olan boyalardır (Mudhoo vd. 2020). Bu nedenle reaktif boyaların arıtımı hayati önem taşımaktadır.

Fiziko-kimyasal metot tekstil atık suyunda oldukça sık rastlanan reaktif boya grubunun renk giderim sürecinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak uygulanan fiziko-kimyasal yöntemler, yüksek maliyet ve sınırlı uygulanabilirlik nedeniyle günümüzde tercih edilmemektedir. Biyolojik yöntemler; tekstil atık sularından kirleticilerin uzaklaştırılmasında, çevre dostu olması sebebiyle son zamanlarda oldukça sık tercih edilmektedir (Fazal vd. 2018).

Mikroorganizmalar, ekosistemin çeşitli alanlarında bulunmakta ve kontamine alanların iyileştirilmesinde geçmişten günümüze kullanımı sıklıkla tercih edilmektedir. (Premaratne vd. 2021). Algler, maya, ipliksi mantarlar ve bakterilerden elde edilen biyokütle, boyaların biyosorpsiyon yoluyla giderilmesinde kullanılmıştır (Bhatnagar A, Sillanpää M. vd. 2010). Biyosorpsiyon yöntemi; mikroorganizmaların kullanıldığı

biyolojik yöntemler arasında etkili bir yöntem olarak uygulanmaktadır. Ortamda bulunan kirletici maddelerin aktif veya pasif durum çeşitleri ile uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem, diğer yöntemlere kıyasla oldukça etkili, düşük maliyetli ve uygulaması kolay olan çevre dostu bir yöntemdir (Cheng vd. 2019, Lebron vd. 2018). Bir mikroorganizmanın biyosorpsiyon kapasitesi, hücre duvarının heteropolisakkarit ve lipid bileşenlerine atfedilir. Bu bileşenler, amino, karboksil, hidroksil, fosfat ve diğer yüklü gruplar dahil olmak üzere çeşitli fonksiyonel gruplar içerir ve bu gruplar azo boya ile hücre duvarı arasında güçlü çekim kuvvetleri oluşturur (Srinivasan A, Viraraghavan T. vd. 2010 - Aksu Z, Dönmez G. vd. 2003).

Maya suşları, farklı azo boyalarının renk gideriminde kullanılmıştır çünkü biyoremediasyon uygulamalarında birçok avantaja sahiptirler. Bunlar arasında boyaları ve Pb(II) ile Cd(II) gibi ağır metalleri yüksek kapasitede biriktirme yetenekleri bulunmaktadır (Fairhead M, Thöny-Meyer L. vd. 2012 - Ertugrul S, Bakır M, Dönmez G. vd. 2008). Hızlı büyüme, ipliksi mantarlardan daha hızlı renk giderimi ve elverişsiz ortamlarda hayatta kalabilme yeteneği gibi özellikleri açısından tercih edilmektedir. (Martorell MM, Pajot HF vd. 2012) Atık su arıtma çamuru, diğer ortamlara kıyasla bol ve çeşitli maya suşlarını barındırır, ancak bununla birlikte mayalar aktif çamurdaki mikroorganizmaların küçük bir kısmını oluşturur. (Yang Q ve ark. vd. 2011) Mikroalglerde olduğu gibi, mayalar tarafından renk giderim mekanizmaları adsorpsiyon, enzimatik bozunma veya her ikisinin kombinasyonunu içerebilmektedir. (Safarik I ve ark. vd. 2007).

Gerçekleştirilen tez çalışmasında; havuç posası içeren ortamda geliştirilen *Saccaromyces cerevisiae* mayasının biyosorbent olarak kullanılarak tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan reaktif azo boyalardan Reactive Black 5'in giderimi hedeflenmiştir. Bu bağlamda Reactive Black 5 boyalarının biyosorpsiyonu üzerine pH, başlangıç boya konsantrasyonu, başlangıç biyosorbent konsantrasyonu, biyosorpsiyon süresi vb. parametrelerin etkisi incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Tekstil Atık Suları

Son yıllarda, sentetik boyaların su sistemlerine boşaltılmasıyla ilgili artan çevresel endişeler, atık su arıtımı için çevre dostu ve maliyet etkin yaklaşımlar üzerine kapsamlı araştırmalara yol açmıştır. Sentetik boyalar, önemli çevresel tehditler oluşturmanın yanı sıra, insan popülasyonları üzerinde ciddi sağlık riskleri de oluşturmaktadır. Bu boyalara maruz kalmanın kanser, tümörler, mutasyonlar ve kalp hastalıkları dahil olmak üzere çeşitli sağlık sorunlarıyla bağlantılı olduğu görülmüştür.(Hamommochi vd. 2024)

Her geçen gün atık sulardaki kirlilik yüksek oranda artış göstermektedir. Su kaynaklarımızdaki kirliliğin başlıca nedenleri asitler, alkaliler, tuzlar, yüzey aktif maddeleri, ağır metaller, pestisitler, dezanfektanlar, ilaçlar, boyalar vb. gibi birçok farklı kimyasal maddeler olarak sıralanabilmektedir. Günümüzde sanayileşmenin artması ile birlikte tekstil endüstrisinden gelen atık boyalar su kirliliğinin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır (Olisah vd. 2021).

Atık sudaki bu boyalar, bitkilerde fotosentetik fonksiyonu ciddi şekilde etkilemektedir. Ayrıca düşük ışık penetrasyonu ve oksijen tüketimi nedeniyle sucul yaşam üzerinde de etkili olmaktadır. İçerdikleri metal bileşenler ve klor nedeniyle bazı deniz canlıları için öldürücü olabilmekte ve askıda bulunan partiküller, balıkların solungaçlarını tıkayarak ölmelerine neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra, alglerin besin ve oksijen üretme kapasitesini azaltmaktadır. Aynı zamanda ultraviyole dezenfeksiyonu gibi bazı belediye atık su arıtma işlemlerine engel olduğu da tespit edilmiştir. (Mazumber, 2011)

Çok yüksek miktarlardaki suyun tüketiminden ve yeteri derecede, hatta neredeyse hiç arıtım yapılmadan doğaya atık su salınımından sorumlu olan tekstil endüstrisi, en önemli endüstrilerdendir. Tekstil endüstrilerinde boya işleme amaçlı olarak su kullanımı yaklaşık %90-94 oranına varmaktadır. Bu durum tekstil endüstrisinde su kullanımının ne denli yüksek olduğunu açıkça göstermektedir. Kullanılan boyaların yaklaşık %15-20'si direkt

olarak sulara karışırken, yaklaşık %12'si üretim ve renklendirme sürecinde sulara karışmaktadır (Carmen ve Daniela 2012, Rubeena vd. 2018). Dünya Bankası tahminine göre, kumaşa uygulanan tekstil boyama ve bitim işlemleri, endüstriyel atık suyun yaklaşık %17 ila %20'sini oluşturmaktadır (Kant vd 2012).

Tekstil endüstrilerinde dünya genelinde kullanılan boya çeşidi 100.000'nin üzerinde olmakta ve bununla birlikte yaklaşık 280.000 ton boya atık sulara karışmaktadır. Tekstil endüstrisinde 1 kg kumaş üretmek için farklı boyalar ve kimyasallar kullanılmasının yanı sıra, yaklaşık 200 litre su harcanmaktadır. Boyama sürecinde kullanılan tüm boya kumaşa tutunmamaktadır. Bu nedenle tekstil atık sularında daima boya kalıntıları gözlemlenmektedir. Özellikle reaktif boyalar, pamuklu kumaşlarda yaygın olarak kullanılmakta olup, bu boyaların yaklaşık %50-90 'ı tekstil atık sularında mevcuttur. (Raman ve Kanmani 2016, Premaratne vd. 2021).

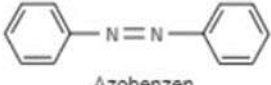
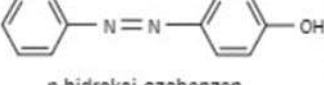
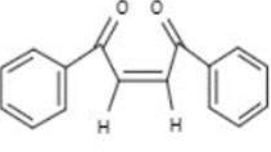
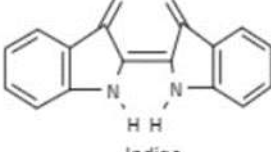
Biyolojik bozunma, daha az çamur üretme özelliğine sahiptir. Günümüzde, kirlenmiş sudaki boyaları gidermek için en ucuz ve en uygun mikrobiyal biyokütleyi bulmaya yönelik kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır (Ayed ve ark. 2017). Esfandiari ve ark. (2014), tekstil yaş işlemlerinin her aşamasında, ön işlemde ağartmaya, boyamadan bitim işlemlerine ve hatta atık su arıtımına kadar enzimleri uygulamayı denemiştir. Renk, genellikle atık suda fark edilen ilk kirletici olup, sudaki çok küçük miktarda boya (10–20 mg/l) bile oldukça görünürdür ve suyun şeffaflığını ve gaz çözünürlüğünü etkiler (Ayed ve ark. 2017).

Tekstil endüstrilerinde; yumuşatma, haşılama, haşıl sökme, parlaticı ve apre maddeleri gibi prosesin çeşitli aşamalarında yüksek derecede toksik kimyasallar uygulanmaktadır. Tekstil atık sularında bulunan boyaların, 1 mg/L konsantrasyonu dahi insan sağlığına yüksek seviyede zarar vermektedir (Ayed vd. 2020). Tekstil atık sularında bulunan boyalar yapılarından dolayı kanserojen ve mutajen etkiye sahiptir (Lellis vd. 2019). Bu doğrultuda çevresel unsurların en önemlilerinden olan su kaynaklarımızı temiz tutmak ve uygun bir şekilde arıtım yapmak büyük önem arz etmektedir (Holkar vd. 2016, Kishor vd. 2021).

Tekstil atık sularının arıtımı için biyoremediasyon süreçlerinin geliştirilmesine yönelik boyaların biyolojik bozunmasında mikroorganizmaların kullanımı sıklıkla tercih edilen bir alternatiftir. Biyolojik yöntemler çevre dostudur, fiziksel ve kimyasal sistemlere göre daha az çamur üretir ve işletim maliyetinin düşük olması nedeniyle nispeten ucuzdur. Mikrobiyal renk giderimi, biyosorpsiyon, enzimatik bozunma veya her ikisinin kombinasyonu yoluyla gerçekleştirilir.(Wu, Y. Li, T. ve Yang, L. vd. 2012) Mayanın, çözültülerden ağır metalleri biyobirikim yoluyla uzaklaştırma yeteneğine sahip olduğu uzun zamandır bilinmekle birlikte, son zamanlarda boyaların birikimiyle ilgili bazı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, mayanın özellikle hasat edilmiş hücreler kullanılarak tekstil boyaları için biyokatalizör olarak kullanılma yeteneğini araştıran çalışmalar sınırlıdır.

2.2 Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Boyaların Özellikleri

Tekstil atık sularının içerisinde bulunan kirleticiler arasında, solventler ve sentetik boyaların çokluğu dikkati çekmektedir. (Al-Tohamy vd. 2020a, 2020b). Ayrıca doğal boyalara kıyasla bu boyalar daha düşük maliyetli ve kullanımı kolay olmaktadır (Al-Tohamy vd. 2021, 2022). Boya molekülleri; rengi oluşturan kromoforlar ve moeküllerin suda çözünmesini sağlayan, liflere karşı afinite oluşturan oksokromlar olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Wawrzkievicz ve Hubicki 2015). Kromofor yapı doymamış karakterde olup ve boyaya rengini veren yapıdır. Bir veya birden çok bağdan oluşmaktadır. Bu bağlar değişken olup, ışığı absorplayarak, boyanın parlak renkli görünmesini sağlamaktadırlar. Azo grubu, boyalarda en yaygın kullanılan kromofor grubudur. Fonksiyonel gruplar (oksokromlar) kromojene bağlanıp elektronları aktive etmektedir ve böylece daha uzun dalga boyundaki ışınları soğurabilme özelliği kazandırmış olmakta ve kırmızı, mavi, sarı renkleri oluşmaktadır. Bununla birlikte, fonksiyonel grup, boyanın pamuk ya da yün ipliğine bağlanıp ve suda çözünmesini sağlamaktadır (Kaykıoğlu ve Debik, 2006; Kurbanova ve ark. 1998; Sağlam, 2008). Boyaların yapısı Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Kromofor gruplar; azo ($—N=N—$), nitro ($—N=O$) ve karbonil ($—C=O$) gruplarından oluşurken, oksokromlar karboksil, sülfat ve hidroksil gibi gruplardan oluşmaktadır (Aksu vd. 2007, Holkar vd. 2016).

Kromojen	Oksokrom	Boyarmadde
 Azobenzen	- OH	 p-hidroksi-azobenzen
 Dibenzoil-etilen	- N -	 Indigo

Şekil 2.1 Kromojen ve oksokrom boya maddelerinin kimyasal yapıları (Erdoğan 2008)

Boyalar; çözünürlükleri, kimyasal özellikleri ve lif türüne uygulanmalarına göre asidik, bazik, reaktif boyalar, metal kompleksi boyalar, azo boyalar vb. çeşitli sınıflara ayrılmaktadır (Hagan ve Poulin 2021). Azo boyalar, azo bağları ve diğer elektron çekici grupları nedeniyle elektron bakımından eksik ksenobiyotik bileşenlerdir. Bu gruplar, elektron eksikliği oluşturarak boyayı biyolojik olarak bozunmaya karşı daha az duyarlı hale getirir (Hsueh vd. 2009)

Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddeler aşağıda belirtilen dört özelliğe sahip olmalıdır (Kuruloğlu, 2006);

- * Boyama işleminin gerçekleşmesi için suda çözünmeli,
- * Boyarmadde ile elyaf arasında affinite (=substantivite) olmalı, yani boyama işlemi sonucunda elyaf ile boyarmadde molekülleri birbirine bağlanmalı,
- * Boyama işlemi sonunda elyaf üzerinde renkli bir madde olarak kalabilmeli,
- * Boyanmış materyal üzerindeki boyarmadde, dış etkilere karşı dirençli olabilmelidir, yani iyi bir renk özelliğine sahip olmalıdır.

2.3 Boyaların Sınıflandırılması

Ticari boyalar için birkaç sınıflandırma yöntemi bulunmaktadır. Boyalar, yapısına, rengine ve uygulama yöntemine göre sınıflandırılabilir. Ancak, kimyasal yapı

sistemindeki renk adlandırmalarının karmaşıklığı nedeniyle, uygulamaya dayalı sınıflandırma genellikle tercih edilmektedir. Bunun dışında, boyalar genellikle sulu bir uygulama ortamında çözündüklerinde sahip oldukları parçacık yüküne göre de sınıflandırılır. Bu sınıflandırma; katyonik (tüm bazik boyalar), anyonik (direkt, asit ve reaktif boyalar) ve non-iyonik (dispers boyalar) olmak üzere üç grubu içerir (Mustafa vd. 2014)

Boyaların kimyasal yapıya göre sınıflandırılması kromofor gruplarının doğasına göre yapılmaktadır (Holkar vd. 2016). Kromoforlar, boyaların ışık emme özelliklerinden sorumlu temel kimyasal yapılardır (Hunger 2007). Kromoforlar, ışık absorpsiyonu sırasında elektronik geçişleri kolaylaştıran konjüge π -elektron sistemleri içerir. Farklı kromoforlar, belirli dalga boylarındaki ışığı emerek boyalara özgün renkler kazandırır ve tamamlayıcı renklerin algılanmasını sağlar.(C.J. Cooksey 2016). Bu sınıflar metil, azo, ftalosiyanın, azin, nitro, okzazin vb. içermektedir (Akpomie ve Conradie 2020). Birçok sentetik boya türü bulunmaktadır. Bunlar: asit boyalar, bazik boyalar, direkt boyalar, dispers boyalar, reaktif boyalar ve vat boyalardır.

- **Asit boyalar:** Yün, ipek ve naylon için kullanılır.
- **Bazik boyalar:** Akrilik ve katyonik kumaşlar için uygundur.
- **Direkt boyalar:** Pamuk, yün ve ipek boyamada tercih edilir.
- **Dispers boyalar:** Polyester ve asetat kumaşlar için kullanılır.
- **Reaktif boyalar:** Pamuk gibi selülozik lifler için idealdir.
- **Vat boyalar:** Pamuk ve yün boyamada yaygın olarak kullanılmaktadır. (Hunger 2007).

Bu boyalar genellikle sulu ortamlarda çözünme sonrasındaki partikül yüküne göre sınıflandırılabilir (Amalina vd. 2022).

2.3.1 Asidik boyalar

Asidik boyalar, suda çözünebilen ve anyonik yapıda olan boyalardır; bu boyalar yapılarında sülfonik asit gruplarını barındırmaktadır. Asidik boyalar protonize -NH₂ fiber grubu ve asit grubu boyası arasında iyonik bağ kurmaktadır (Chakraborty 2014). Asidik boyalar, protein lifleri için özelleştirilmiş anyonik boyar maddeler olarak nitelendirilmiştir. Asidik boyalar, suda kolay çözünebilmekte ve ayrıca, çözündüklerinde suya negatif yüklü iyon verebilmektedir. Asidik özellikleri sebebiyle suda parlak renkler oluşturan maddelerdir. Asidik (2-6) koşullarda uygulanan boyama işlemi, katyonik grup içeren selüloz yapıya bağlanarak oluşturulmaktadır (Clark 2011, Kabadayı 2018).

Nitro, ksanten, azo (nitroso, premetallize edilen boyalar), trifenilmetan ve antrokinonlar bu boyalardan ticari olarak önem sahibi olan gruplardır (Wen vd. 2011, Hakro vd. 2018). Endüstride kullanılan asidik boya türleri içinde en yargın olanları; Acid scarlet, acid turquoise blue ve indigo carmine'dir. Genellikle yün ve naylon materyallerini boyamak için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra gıda, kağıt, deri ve tekstil gibi farklı endüstri alanlarında geniş kullanım alanına sahiptir. Kimyasal yapılarında sülfonik asit bulunması nedeniyle insan sağlığına oldukça zararlıdır (Esvandi vd. 2020, Yao vd. 2020).

2.3.2 Bazik boyalar

Moleküllerinde pozitif yük taşıyan boyar maddelere katyonik boyar maddeler veya bazik boyar maddeler denmektedir. (M. Celebi ve ark. 2013). Bazik boyar maddeler genellikle asetik asit veya tannik asit desteğiyle 80-90 °C'de akrilik elyafını hızlıca boyarlar ve kumaşa güçlü bir şekilde bağlanma gerçekleştirirler. Tekstil endüstrisinde özellikle akrilik elyafların boyanmasında bazik boyar maddeler kullanılmaktadır. (M. Çelebi vd. 2013)

Bazik boyalar, yapısı anyonik olan kumaş türlerine bağlanarak bazik tepki gösteren boya çeşitleridir. Suda çözünebilen bazik boya tipleri, çözünme sırasında renk veren katyonların salınımını sağlamaktadır. Yapılarındaki S ve/veya N atomları ile pozitif yük taşımakta olup elektrostatik anlamda negatif bir yük aracılığı ile salınan katyonların daha

alt tabakalara çekilmesi sağlanmaktadır. Bazik boyaların giderimi için 9-12 aralığındaki pH değerleri uygun görülmektedir (Iwuozor vd. 2021, Iwuozor vd. 2022). Sentetik liflerin (nylon, akrilik ve polyester gibi), mürekkep ve kağıtların üretiminde, özellikle kristal viyole, metil menekşe, metilen mavisi gibi sıklıkla kullanılan boyaların ait olduğu katyonik gruptur. (Pashaei- Fakhri 2021).

2.3.3 Direkt boyalar

Direkt boyalar suda çözünebilen ve anyonik boyalardır. Yapıları sülfonik ya da karboksilik asitlerin sodyum tuzlarından oluşmaktadır. Yıkama dayanıklılığı suda çözünürlüklerinden dolayı zayıf olmakla birlikte eklenmiş elektrolit içeren nötr veya az alkali banyoda uygulanmaktadır. Bu boyalar, kumaşlara hidrojen bağları ve Van der Waals kuvveti ile bağlanmaktadır. Boyama sırasında kumaşa zarar vermemesi nedeniyle ticari olarak çok tercih edilen bir boya türüdür. Direkt boyalar genel olarak selülozik elyaf kumaşlarda ya da deri, kâğıt, suni ipek, nylon ve basit elyafların boyama işlemlerinde kullanılmaktadır (Chakraborty 2014)

Direkt boyalar doğal olarak pamuğa ve diğer selülozik substratlara yüksek bir afiniteye sahiptir. Sulu çözeltileri, genellikle sodyum klorür veya sodyum sülfat gibi bir elektrolit varlığında pamuğu boyar. Tarihsel olarak, bu boyalar doğal mordant boyaların yerini almıştır. Direkt boyalar, basit kullanımları nedeniyle pamuk için en önemli boya sınıfıdır. Optimum koşullar değişiklik göstermekle birlikte, boyama genellikle kaynama noktasında veya buna yakın bir sıcaklıkta, sodyum klorür veya sodyum sülfat gibi bir elektrolit eşliğinde gerçekleştirilir. Direkt boyalar nispeten ucuzdur. Geniş bir renk yelpazesi sunarlar ancak yüksek renk parlaklığına sahip değildirler. Yıkamaya karşı dayanıklılıkları zayıf ila orta düzeydedir, bu nedenle genellikle yüksek dayanıklılığın birincil öneme sahip olmadığı malzemelerde kullanılırlar (N.Sekar 2011)

2.3.4 Dispers boyalar

Dispers boyalar, çözünebilirlik sağlayan grupların yokluğu ve düşük moleküler ağırlıkları ile karakterize edilir. Kimyasal açıdan bakıldığında, dispers boyaların %50'den fazlası basit azo bileşikleri, yaklaşık %25'i antrakinonlar ve geri kalanı ise metin, nitro veya naftokinon boyalarından oluşur.

Dispers boyalar esas olarak polyester için kullanılır, ancak ayrıca selüloz asetat ve triasetat, poliamid ve akrilik lifler için de uygundur. Bu boyalar toz ve sıvı ürünler olarak tedarik edilir. Toz boyalar, %40–60 oranında dağıtıcı madde içerirken, sıvı formülasyonlarda bu maddelerin içeriği %10–30 arasındadır. Formaldehit yoğunlaşma ürünleri ve lignin sülfonatlar bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır.(R.B. Chavan, 2011)

Dağılma boyaları, su içinde çözünmeyen ve iyonik olmayan boyalardır. İnsan yapımı liflerin boyanmasında, özellikle polyester boyamak için kullanılan asidik banyolara uygun şekilde tasarlanmıştır. Bu boyalar, ince bir dağılım içinde boyayı muhafaza etmek için dağıtıcı madde ile birlikte uygulanır. Parçacık boyutunu kontrol etmek için öğütme işlemi önemli bir süreçtir; bu, boyanın difüzyon ve göç kolaylığı sağlaması açısından kritik öneme sahiptir.

Genellikle yüksek sıcaklıklarda uygulandıkları için, boyanın bir kısmı süblimleşebilir. Bu durum, boyaların süblimasyona karşı stabilitelerine göre sınıflandırılmasını gerektirir. Boyalar, lif tarafından fiziksel kuvvetlerle tutulur. Polyester üzerindeki haslık özellikleri genellikle mükemmeldir; ancak bazı durumlarda istisnalar görülebilir.(J.N. Chakraborty,2010)

Dispers boyama, $-COOH$ veya $-NH_2$ gruplarına bakılmaksızın gerçekleşir; boyalar, lif tarafından van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağları ile tutulur. Bu nedenle, boyanan naylonda tipik bir sorun olan boyama düzensizlikleri (barriness), boyanın göç etmesi

sonucu ortaya çıkmaz; ayrıca, oryantasyondaki veya fiziksel ya da kimyasal yapısal düzensizlikler bile eşit renk tonlarının oluşmasını engellemez.

Boyama banyosu, boya, dağıtıcı madde (1–2 g/l) ve pH 4–5 seviyesinde asetik asit ile hazırlanır. Boyama 60°C'de başlar, sıcaklık yavaşça kaynama noktasına kadar artırılır ve boyama 1 saat daha devam eder. Bunu sabunlama ve yıkama işlemleri izler.(J.N. Chakraborty, 2010)

2.3.5 Pigment boyalar

Doğal renklendiriciler, kökenlerine göre organik ve inorganik renklendiriciler olarak sınıflandırılabilir. İnorganik renklendiriciler pigmentlerden oluşurken, organik renklendiriciler ise boyalar ve pigmentler olarak ikiye ayrılır. İnorganik doğal renklendiriciler, toplam doğal renklendiricilerin %84'ünü oluştururken, organik kökenli renklendiriciler %16'sını oluşturur. Organik renklendiriciler kendi içinde boyalar (%75) ve pigmentler (%25) olarak alt gruplara ayrılır. Bu nedenle, doğal boyaların çoğunluğu organik kökenden elde edilirken, pigmentler hem organik (%5) hem de inorganik (%95) kökenlidir. Boyaların kimyasal yapıları da sınıflandırma için bir temeldir. Kimyasal yapılara göre boyalar şu şekilde gruplandırılır: İndigoid, Piridin Tabanlı Boyalar, Karotenoidler, Kinonoidler, Flavonoidler, Dihidropiran Tabanlı Boyalar, Betalainler, Tanenler. (Shailendra Yadav vd. 2023)

Renklendiriciler genellikle hem pigmentleri hem de boyar maddeleri kapsayan bir terim olarak anlaşılır. Pigmentler, çoğunlukla demir ve krom oksitleri gibi inorganik tuzlar ve oksitlerdir ve genellikle kristal veya toz formunda bir uygulama ortamına dağıtılır. Pigment dispersiyonunun renk özellikleri, pigmentin parçacık boyutuna ve formuna bağlıdır.

Pigment renklendiriciler yüksek dayanıklılığa, ısı stabilitesine, çözücü direncine, ışık haslığına ve göç direncine sahiptir. Ancak, işlenmeleri genellikle zor olup, renk parlaklığı ve renk gücü açısından zayıf olabilirler. Öte yandan, boyalar (boyar maddeler olarak da

adlandırılır), uygulama ortamında moleküler kromoforlar olarak çözünen organik moleküllerdir. Azo boyaları, kumarin boyaları ve perilene boyaları bu gruba örnek olarak verilebilir. (Zhang Q vd. 2010)

2.3.6 Vat boyalar

Vat boyama (Vat dyeing), özellikle pamuklu kumaşlar için canlı renkler ve mükemmel renk haslığı sağlaması nedeniyle en popüler tekstil boyama yöntemlerinden biridir. Vat boyalar, indigoid boyalar, antrakinonoid boyalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Boyama süreci, suda çözünmeyen boyanın indirgenme yoluyla suya çözünür hâle getirilmesi, liflere nüfuz ederek boyama işleminin gerçekleştirilmesi ve ardından oksidasyonla tekrar suda çözünmez hâline dönüştürülmesini içerir. İndirgen ajan (reduktan), vat boyaların indirgenmesini sağlayarak onları boyama süreci için aktif hâle getiren önemli bir bileşendir. En yaygın indirgen ajanlardan biri sodyum ditiyonit (Hydrose) olarak bilinir. Ancak, bu madde sülfite, sülfat, tiyosülfat ve toksik kükürt bileşikleri içeren atıklar ürettiğinden çevre dostu ve sürdürülebilir bir seçenek değildir. Vat boyama atıklarının arıtılması için aşırı miktarda hidrojen peroksit ve alkali kullanılması gerekir ki bu çevresel olarak zararlı ve maliyetli bir işlemdir. (Shrwardi vd. 2023)

Vat boyalar, sülfür boyalar gibi suda çözünmez, ancak alkaline koşullarda indirgenme (vatlama) ile suya çözünebilir ve liflere bağlanabilir hale gelir. Daha sonra oksidasyon ile tekrar suda çözünmez hâline dönüştürülerek lif üzerinde sabitlenir. Vat boyalar, genellikle pamuk ve diğer selüloz liflerini boyamak için kullanılır. Ayrıca selüloz içeren karışımlarda da uygulanabilir. İndirgen ajanlar (reduktanlar) arasında en yaygın kullanılanı sodyum hidrojen sülfite (sodyum ditiyonit) olsa da, bazı sınırlamaları vardır. Boyama sürecinde ayrıca aşağıdaki kimyasallar ve yardımcı maddeler bulunabilir:

İndirgen ajanlar: Sodyum hidrojen sülfite, tiyüre dioksit, sülfoksilik asit türevleri, Alkaliler: Sud kostik (sodyum hidroksit), Diğer tuzlar: Sodyum sülfat, Göç önleyici ajanlar: Poliakrilatlar, aljinatlar, Dispersiyon ajanları: Formaldehit kondenzasyon ürünleri, naftalin sülfonik asit, lignin sülfonatlar, Yüzey aktif maddeler: Etiloksilatlı yağ

aminleri, betainler, polialkilen aminler, Düzgünleştirici ajanlar: Polivinilpirolidon, Oksidanlar: Hidrojen peroksit, sodyum perborat, 3-nitrobenzen sülfonik asit, Sabunlar

Oksidasyondan sonra suda çözünmez hâle gelen vat boyalar, atık su arıtma tesislerinde aktif çamur tarafından adsorbe edilerek büyük ölçüde giderilebilir. Ancak, vat boyalar üretim sürecinde kullanılan bakır (Cu), demir (Fe), kurşun (Pb), baryum (Ba) ve mangan (Mn) gibi ağır metal safsızlıkları içerebilir. (R.B. Chavan, 2011)

2.3.7 İndigo boyalar

İndigo, vat-indigoid boyalar sınıfına ait organik bir boyadır ve karakteristik mavi renge sahiptir. Günümüzde üretilen indigo boyasının büyük çoğunluğu sentetik kökenli olmasına rağmen, hala bitkilerden doğal olarak üretilen türleri de bulunmaktadır. İndigo boyası en çok pamuk gibi selülozik liflerin boyanmasında kullanılır. Alkali boya banyosunda indirgenerek lökoya dönüştürüldükten sonra tekstil liflerine uygulanır. Küresel çapta en yaygın kullanımı denim üretiminde olup, ayrıca Batı Afrika'da geleneksel kumaş boyama tekniklerinde (örneğin “adire” ve “gara”) yaygın olarak kullanılmaktadır.

İndigo boyası, tekstil endüstrisinde büyük bir öneme sahip olsa da, çevresel ve sağlık etkileri nedeniyle dikkatli yönetilmesi gereken bir boyadır. Atık su arıtma sistemlerinin geliştirilmesi ve çevre dostu alternatiflerin teşvik edilmesi, indigo boyasının çevresel etkilerini azaltmada kritik bir rol oynayacaktır. (Bankole vd. 2017)

2.3.8 Sülfür boyalar

Sülfür boyaları, yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerden oluşur ve genellikle sülfür veya sülfidin aminler ve fenollerle tepkimesi sonucu elde edilir. Bu boyalar suda çözünmez, ancak alkali ortamda indirgenerek lökoya dönüşür. Lökoya formu suyla çözünür ve tekstil liflerine yüksek afiniteyle bağlanır. Lifler boyayı emdikten sonra oksidasyonla tekrar suda çözünmeyen orijinal haline döner ve böylece liflere kalıcı olarak tutunur.

Sülfür boyları en çok pamuk ve viskon boyamada kullanılır. Ayrıca, selüloz içeren sentetik lif karışımlarının (örneğin, poliamid ve polyester karışımları) boyanmasında da uygulanabilir.

En yaygın kullanılan sülfür boyası, düşük maliyetli siyah tonları üretmek için kullanılan sülfür siyahıdır. Sülfür boyları oksidasyondan sonra suda çözünmez hale geldiği için atık su arıtma tesislerinde aktif çamur adsorpsiyonu ile büyük ölçüde uzaklaştırılabilir. Ancak, biyolojik olarak parçalanamayan dispersanlar içerebilir, bu da çevre için önemli bir sorun teşkil eder. Son yıllarda, biyolojik olarak daha kolay bozunabilen (> %70 biyolojik eliminasyon oranına sahip) yeni formaldehit kondensasyon ürünleri geliştirilmiştir, böylece çevresel etkiler azaltılmaya çalışılmaktadır. Sülfür boyları, ekonomik olması ve güçlü renk haslığı sunması nedeniyle tekstil endüstrisinde önemli bir yer tutar. Ancak, geleneksel indirgeme ve oksidasyon ajanlarının çevresel etkileri nedeniyle, daha çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesi önemlidir (R.B. Chavan vd. 2011).

Bu boylar genellikle parlaklık açısından zayıftır ama modifiye edilerek üretilmekte olan renk tonları, parlak kırmızı, sarı ve turuncudur. Boyanmış selülozdaki fazla miktardaki serbest sülfür, depolama sırasında yayılıp atmosfere zarar vermekte ve havanın kirlenmesine sebep olmaktadır. Bunun yanında, sodyum sülfür atık suyunu da kirlenmesine sebep olmaktadır (Chakraborty 2014).

2.3.9 Mordan boylar

Mordan boylar, Colour Index'e göre bu isimle sınıflandırılır, ancak endüstride genellikle chrome boyları olarak adlandırılır. Bunun sebebi, bu boyların sabitlenmesi için neredeyse evrensel olarak krom kullanılmasıdır. Kimyasal açıdan bakıldığında, mordan boylar asidik boylar sınıfına girer ve krom ile metal kompleksleri oluşturabilen fonksiyonel gruplar içerir. Ancak, moleküllerinde krom içermezler. Bunun yerine, boyama sırasında veya sonrasında dikromat veya kromat tuzları eklenerek krom kompleksleri oluşturulur ve boyanın lifi sabitlemesi sağlanır. Mordan boylar genellikle protein bazlı lifler olan yün ve ipek boyamalarında kullanılır.

Mordan boyalar, özellikle krom bileşikleri içerdiği için çevresel açıdan ciddi sorunlara yol açabilir: Potasyum dikromat gibi Cr (VI) içeren bileşikler toksik ve karsinojeniktir.

Boya işlemi sırasında ciltle temas, solunum veya yutma yoluyla ciddi sağlık riskleri oluşturabilir. Boyama sonrası atık sulara toksik krom (VI) bileşikleri karışabilir. Kromun Cr (III) formuna indirgenerek daha az toksik hale getirilmesi için ek kimyasal işlemler gereklidir (R.B. Chavan vd. 2011).

2.3.10 Reaktif boyalar

Reaktif boyalar, güçlü bir parlaklık, geniş bir renk yelpazesi, kolay uygulama ve pamuk ile kovalent bağ oluşturma gibi özellikleriyle pamuk için tercih edilen bir seçenek olarak öne çıkar. Bu sayede kumaşlar yüksek ıslak haslık özelliği kazanır (Wensheng Zou ve ark. 2024). Reaktif boyalar; selüloz fiberlerini boyamak amacıyla kullanılan, içeriğindeki okzasin, azo, triarilmetan, antraknon, gibi farklı kromofor gruplarıyla liflerdeki proteinlerin amin veya sülfidril grupları ile kovalent bağ yapma özelliği olan anyonik boyalardır (Benkhaya vd. 2017).

Mevcut reaktif boya çeşitliliği oldukça geniş olup, birçok farklı boyama tekniğinin uygulanmasına olanak tanımaktadır. Reaktif boyalarla selüloz liflerini boyarken aşağıdaki kimyasallar ve yardımcı maddeler kullanılır:

- Alkali (sodyum karbonat, bikarbonat ve kostik soda)
- Tuz (özellikle sodyum klorür ve sülfat)
- Sürekli proseslerde dolgu solüsyonuna üre eklenebilir.
- Soğuk ped-batch yönteminde sodyum silikat eklenebilir.

Reaktif boyalarda, özellikle selüloz liflerinin parti boyamasında zayıf boya fiksasyonu uzun süredir devam eden bir sorundur. Normalde, boya çekimini (ve dolayısıyla boya fiksasyonunu) iyileştirmek için önemli miktarda tuz eklenir. Bu nedenle, atık sudaki renk ve tuz, reaktif boyaların çevresel açıdan en büyük sorunlarından biridir. Hem

bağlanmamış reaktif boya hem de hidrolize olmuş formu suda çözünür olduğu için, biyolojik atık su arıtma tesislerinde bunları gidermek oldukça zordur (R.B Chavan 2011).

2.3.11 Azo boyalar

Boyalar, kromoforlar (delokalize elektron sistemlerine sahip, konjuge çift bağlar içeren yapılar) ve auksokromlar (elektron çeken veya elektron veren gruplar) içerir. Auksokromlar, elektron sisteminin enerjisini değiştirerek kromoforun rengini oluşturur veya yoğunlaştırır. Yaygın kromofor grupları; azo ($-N=N-$), karbonyl ($-C=O-$), metin ($-CH=$), nitro ($-NO_2$), kinonoid halkalar olarak sıralanmaktadır. Sık kullanılan auksokromlar ise amin ($-NH_2$), karboksil ($-COOH$), sülfonat ($-SO_3H$), hidroksil ($-OH$), azo boyalar ve yapısal özellikleri şeklinde ayrılmaktadır (Dos Santos vd. 2007)

Azo boyalar, bir veya daha fazla azo grubuna ($-N=N-$) sahip olmalarıyla karakterize edilir. Bu azo grupları genellikle bir benzen veya naftalin halkasına bağlıdır. Ancak, bazı durumlarda heterosiklik aromatik moleküllere veya enolize olabilen alifatik gruplara da bağlanabilirler. Boya molekülü, uygulama sürecinin gereksinimlerine göre modifiye edilir ve en iyi performansı sağlamak için farklı türlerde üretilebilir. Bu nedenle azo boyalar; asidik boyalar, doğrudan boyalar, reaktif boyalar, dispers boyalar, bazik boyalar, metal kompleks boyalar olarak sınıflandırılmaktadır (O'Neill vd. 1999).

Azo-fonksiyonlu bileşikler ($-N=N-$), benzersiz kimyasal ve elektronik özellikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalara sahip önemli bir boya sınıfıdır. Tekstil boyamacılığında, lazer teknolojisinde, mürekkep püskürtmeli baskıda, optik veri depolamada, fotoanahtarlama, boya duyarlı güneş pillerinde ve non-lineer optikte (NLO) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca biyolojik sistemlerde de yer almaktadır. Belirli azo boyalar, kozmetik, farmasötik ve gıda ürünlerinde kullanım için onaylanmıştır ve bu da onların geniş endüstriyel önemini göstermektedir. Azo boyalar, yalnızca renklendirici olarak değil, aynı zamanda indikatör, sensör ve optoelektronik ile optik depolama cihazlarının bileşeni olarak da işlev görmektedir. Azo boyaların stabilitesi ve düzlemselliği, sp-hibritleşmiş azot atomunun p-orbitali ile bitişik sp² hibritleşmiş karbon

atomları arasındaki rezonans etkileşiminden kaynaklanır. Bu durum, molekül boyunca elektron delokalizasyonunu sağlayarak kromatik özelliklerini ve ışıkla etkileşimini artırır ve çeşitli kullanım alanlarına katkıda bulunur (Patil, P.S, & Sekar, N. , 2025).

Azo boya molekülleri; sarı, turuncu ve kırmızı renk oluşumu için, kumaşların (naylon, pamuk, ipek, yün) içerisindeki -OH, -NH veya -SH gruplarına kovalent olarak bağlanmaktadır. Reaktif boya sınıfında bulunan azo boyalar, tekstil endüstrisinde çok sık kullanılmaktadır ve üretilen tüm boyaların yaklaşık %65-70'ni oluşturmaktadır. (Muniyasamy vd. 2020, Thangaraj vd. 2021).

Azo boyaların mikrobiyal bozunma mekanizması, anaerobik, anoksik ve aerobik koşullar altında gerçekleşmektedir. Mikroorganizmalar, anaerobik ortamda azoredüktaz enzimi ile azo bağı (-N=N-) parçalayarak renk kaybına ve renksiz bileşiklerin oluşmasına neden olur. Bu süreç iki aşamalıdır ve her aşamada azo boyaya iki elektron aktarılır. Normal koşullarda, oksijen varlığı, aerobik solunumun NADH kullanımını kontrol etmesi nedeniyle azo bağlarının indirgenmesini engeller. Aerobik solunum, NADH'den azo bağlarına elektron transferini durdurarak bu süreci engeller (Prasad vd. 2017).

Yüksek oranda mutajenik ve kanserojen faktörlerinin bulunduğu azo boyalar ayrıca, biyolojik parçalanabilirliklerinin düşük olmasından dolayı tehlikeli maddeler olarak nitelendirilmektedir (Gupta ve Suhas 2009, Bhardwaj ve Bharadvaja 2021). Evrensel boya imalatının çoğunluğunu oluşturan reaktif azo boya grubu, kumaşlara hızlıca tutunabilmesi, renk parlaklığı, uygulama kolaylığı ve reaktif birimleri dolayısıyla sıkça tercih edilmektedir (Elgarahy vd. 2021).

Azo boyaların kromoforik (-N=N-) yapısı, kompleks aromatik yapıları sayesinde çok yönlü bir sınıf olup yüksek stabiliteye sahiptir ve mikrobiyal bozunmaya karşı dirençlidir (Dave ve ark., 2019). Azo boya içeren tekstil atık suyu, su ekosistemlerinin faaliyetlerini engeller; hatta sudaki minimum boya konsantrasyonu bile rengini değiştirerek oksijen eksikliğine neden olur ve fotosentez sürecini olumsuz etkiler. (Zablocka-Godlwska ve vd. 2018)

Reaktif azo boyalar, böbrek ve karaciğerdeki biyokimyasal reaksiyonları yüksek seviyelerde değiştirerek zarar verebilir. Anaerobik ortam şartlarında etkisini daha iyi göstererek boya arıtımını gerçekleştiren bu boyalar, aerobik ortam şartları oluşturulduğunda bozulmaya direnç gösterip arıtımı engellemektedir. Ayrıca, yapısı bozulmayan boya moleküllerine göre anaerobik indirgenerek bölünmesinden elde edilen aromatik aminler daha zaralıdır. Özellikle azo bağındaki indirgenmeler yardımıyla oluşturulan o-toluidinin, benzidin aromatik aminin ve fenilendiaminin insan sağlığını doğrudan etkileyen bileşiklerin içinde bulunmaktadır (Lourenço vd. 2001, Flores vd. 2008).

İndirgeme reaksiyonlarına dahil olan enzimler, mikroorganizmaların ürettiği azoreduktazın azo bağı ($-N=N-$) üzerinde indirgenme ile yıkım gerçekleştirdiğini ve metabolitler oluşturduğunu göstermektedir (Vitor, 2008). *Saccharomyces cerevisiae*'de, plazma membranı redoks sistemi (PMRS) ile ilişkili bir azoreduktazın rol aldığı bildirilmiş ve bu enzim bir ferrik redüktaz olarak tanımlanmıştır. Plazma membranı ferrik redüktaz sistemi, azo boyalarının hücre dışı indirgenmesinde rol oynar (Ramalho, 2005)

2.4 Tekstil Atık Sularının Arıtımı

Tekstil atık suyu arıtımı için kullanılan çeşitli yöntemler genel olarak üç ana kategoriye ayrılabilir: biyolojik, kimyasal ve fiziksel arıtma. Yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında adsorpsiyon, ileri oksidasyon prosesleri (AOP'ler), biyolojik arıtma, elektrokimyasal arıtma ve membran filtrasyonu bulunmaktadır. Ancak, hiçbir yöntem tek başına en uygun teknoloji olarak kabul edilemez, çünkü her yöntemin verimlilik, uygulanabilirlik ve çevresel etkileri farklıdır. Çeşitli endüstriyel süreçlerde ortaya çıkan farklı atık su bileşimleri nedeniyle, tek başına uygulanan yöntemler genellikle düzenleyici standartları karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, daha iyi su kalitesini maliyet etkin bir şekilde sağlamak için genellikle birden fazla arıtma yöntemi bir arada kullanılmakta ve uygulanmaktadır (Yáñez-Ángeles vd. 2025).

Tekstil atık suların arıtımı, hedef boya ve boyanın kimyasal yapılarına göre çeşitlendirilmektedir. Atıksu içerisindeki çözünmüş organik maddelerin

mikroorganizmaların faaliyetleri aracılığıyla giderilmesi için biyolojik arıtım yöntemleri, atıksularda çözünmüş veya askıda kalmış ve yerçekimi faktörü ile çökelmemiş materyallerin suda çökeltilerek uzaklaştırılması amacıyla kimyasal arıtım yöntemleri, suda bulunan kendiliğinden çökmüş katı maddelerin atıksulardan uzaklaştırılabilmesi için fiziksel arıtım yöntemleri kullanılmaktadır. Boyar madde yüklü tekstil atık sularının arıtımı için birçok fiziksel (adsorpsiyon, membran filtrasyonu, koagülasyon ve filtrasyon yöntemi), kimyasal (klorlama, ozonlama, ağartma gibi oksidasyon ve heterojen ile homojen katalizörler kullanılarak geliştirilen ileri oksidasyon yöntemleri) ve biyolojik (bakteri, mantar, maya, alg ve bitkiler kullanılarak) yöntem uygulanmıştır (Singh ve Singh 2017).

Tekstil atık sularının arıtımı için çeşitli stratejiler önerilmiştir. Bunlardan biri, pıhtılaştırma/flokülasyon yöntemleri ve adsorpsiyon süreçlerini içeren fizikokimyasal arıtma yöntemidir. Tekstil atık sularının biyolojik arıtımı da araştırılmış olup, çeşitli yazarlar renk giderimi, kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) ve toplam askıda katı madde miktarını azaltmak amacıyla sıralı kesikli reaktörlerin uygulanmasını önermiştir. Foto-Fenton, ozonlama ve fotokatalitik işlemler gibi oksidasyon süreçleri de boyar maddeleri ve çözünmüş katı maddeleri parçalamak amacıyla tekstil atık sularına uygulanabilir. Ancak, bu yöntemler bazı boyaların giderilmesinde etkili olsa da tüm boyar madde türlerine uygulanabilir değildir. Ayrıca, pahalı, zahmetli ve yüksek enerji tüketimine neden olabilen işlemler olabilirler (Sánchez-Arévalo vd. 2024).

2.4.1 Fiziko-kimyasal arıtım yöntemleri

Deşarj standartlarına uyumu sağlamak için, atık su arıtma tesisleri biyolojik arıtmadan önce veya sonra stratejik olarak fizikokimyasal üniteler kullanmaktadır. Fizikokimyasal ön arıtım, atık suyun biyolojik süreçler için daha uygun hale gelmesini sağlar (Patel vd. 2021).

Adsorpsiyon, oksidasyon veya çöktürme yoluyla toksik maddelerin giderilmesi, organik maddelerin verimli bir şekilde parçalanmasını sağlayan mikroorganizma dostu bir ortam oluşturur. Fizikokimyasal yöntemler, biyolojik sistemlerin zorlanmasına neden olan

büyük askıda katı maddelerin, organik bileşiklerin ve belirli inorganik kirleticilerin giderilmesinde oldukça etkilidir. Örneğin, koagülasyon ve flokülasyon, biyolojik filtreleri tıkayabilecek veya mikroorganizma aktivitesini engelleyebilecek partikülleri ve kolloidler etkili bir şekilde ortadan kaldırır. Ayrıca, biyolojik arıtmıdan sonra uygulanan fizikokimyasal yöntemler, atık suyun nihai kalitesini artırarak yüksek standartlara uygun hale getirilmesinde kritik bir rol oynar (Patel vd. 2021; Li vd. 2023).

Biyolojik ve fizikokimyasal yöntemlerin entegre kullanımı, kirleticilerin, iz organik bileşiklerin ve mikroplastiklerin etkin bir şekilde giderilmesini sağlar (Ahmed ve ark. 2024). Bu yaklaşım, su kalitesini en katı standartlara yükseltirken, aynı zamanda atık sudan değerli kaynakların geri kazanılmasına da katkıda bulunur.

Başlıca fiziko- kimyasal arıtım yöntemleri; İyon değişimi, filtrasyon, koagülasyon ve flokülasyon, biyolojik oksidasyon, adsorpsiyon ve kimyasal çökeltme gibi tekstil atık sularındaki boya arıtımı amacıyla kullanılmakta olan mevcut giderim yöntemleridir. (Katheresan vd. 2018, Pavithra vd. 2019). Ancak maliyetin fazlalığı ve uygulanabilirliğin sınırlandırılması gibi sebepler bu yöntemin tercih edilmesinin önüne geçmektedir. Ayrıca fiziko-kimyasal yöntemler sonucunda artık çamur oluşur ve meydana gelen artık çamurun uzaklaştırılması da ekstra bir maliyet gerektirmektedir (Bhuiyan vd. 2016, Fazal vd. 2018).

2.4.1.1 İyon değişimi

İyon değişimi yöntemi, çözünemeyen, değiştirme maddesine bağlı bulunan bir iyon türünün, çözeltinin kendisinde var olan aynı yükteki farklı bir iyonla yer değiştirme sürecidir. Boyaların geneli katyonik veya anyonik olduğu için bu metodla hem boya anyonları hem de boya katyonları giderilebilmektedir. İyon değişimi yöntemi, belirli bazı iyonları kısmen uzaklaştırabilmesi, dispers boyalarda yeteri kadar etkili olmaması ve yüksek maliyetli olması sebebiyle atıksu arıtımında genelde tercih edilmez (Hassan ve Carr 2018, Xiao vd. 2023, Joshi vd. 2004).

2.4.1.2 Membran filtrasyonu

Yüksek verimliliği, ileri oksidasyon süreçlerine kıyasla düşük maliyeti ve endüstriyel ölçekte kolay uygulanabilirliği nedeniyle membran teknolojileri kullanılmaktadır. Nano filtrasyon membranları, elektrostatik itme mekanizmasıyla çalıştıkları için boyar maddelerin uzaklaştırılmasında tercih edilir.

Son yıllarda, nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki ilerlemeler sayesinde membran teknolojisi alanında birçok gelişme kaydedilmiştir. Ancak, membran kirlenmesi (fouling) bu teknolojinin en büyük dezavantajlarından biri olarak görülmektedir. Membran kirlenmesi, kirlenici maddelerin membran yüzeyinde veya gözeneklerinde birikmesi olarak tanımlanır ve bu durum polimerik membranların seçiciliğini ve geçirgenliğini azaltır (J. Wang, 2017 ve A.K. An vd. 2016).

İki tür kirlenme gözlemlenmektedir: organik kirlenme ve biyolojik kirlenme. Üç temel parametre kirlenmeye katkıda bulunur: besleme suyu kalitesi, işlem koşulları ve membran özellikleri. Organik kirlenmenin önlenmesine yönelik araştırmalar yapılmış olup, bir çalışmada membranların antibakteriyel aktivitesini artırmak amacıyla lizozim membranlarına gümüş ve bakır eklenmiştir (A.K. An vd. 2017).

Membran filtrasyonu, maddelerin moleküler büyüklüğüne ve filterelerin geçirgenlik oranlarına bakılarak filtrasyon, ultrafiltrasyon ve ters osmoz gibi çeşitli uygulamalara ayrılmaktadır. Filtrasyon, atık suların gideriminde çökelmeyen, sert materyallerin elek ya da filtreler aracılığıyla uzaklaştırılması sürecidir. Ultrafiltrasyon metodunda genellikle bileşiminde büyük boyutlu molekül veya kolloid içeren atık suların arıtımı için yarı geçirgen bir filtre tercih edilmektedir (Yakub vd. 2014, Xiang vd. 2022). Ters osmoz metodunda ise ultrafiltrasyon metodunda yapılan muamelelere ek olarak daha fazla basınç uygulanmaktadır. Oluşturulan ikili sistemin bir tarafında tatlı su, diğer tarafında ise atıksu bulunduran iki hücre, yarı geçirgen olan bir zar ile birbirinden ayrılmaktadır. Atık suyun olduğu bölüme belirlenen konsantrasyonda tuz ilave edilerek osmotik basınç oluşumu sağlanır. Ayrıca , aynı kısma osmotik basınca ek olarak yoğun bir basınç

uygulanarak, yarı geçirgen zarda bulunan suyun, tatlı suyun bulunduğu kısma aktarılması desteklenir (Chon vd. 2013).

2.4.1.3 Adsorpsiyon

Adsorpsiyon terimi, bir maddenin iki faz arasındaki arayüzde (sıvı-katı arayüzü veya gaz-katı arayüzü) birikmesini ifade eder. Arayüzde biriken maddeye adsorbat, adsorpsiyonun gerçekleştiği katı yüzeye ise adsorban denir (Dabrowski 2001).

Adsorpsiyon iki türe ayrılabilir: kimyasal adsorpsiyon ve fiziksel adsorpsiyon.

- Kimyasal adsorpsiyon veya kemisorpsiyon, adsorbat molekülleri veya iyonları ile adsorban yüzeyi arasında güçlü kimyasal bağların oluşmasıyla meydana gelir. Genellikle elektron alışverişine dayalıdır ve bu nedenle genellikle geri dönüşümsüzdür.
- Fiziksel adsorpsiyon veya fizisorpsiyon, adsorbat ve adsorban arasındaki zayıf Van der Waals bağları ile karakterize edilir ve bu nedenle çoğu durumda geri dönüşümlüdür. (Mustafa T. Yagub vd. 2014).

Tarım yan ürünleri de dâhil olmak üzere çoğu adsorbantdaki adsorpsiyon, bazı kemisorpsiyon istisnaları haricinde genellikle fiziksel kuvvetler tarafından kontrol edilir. Adsorpsiyonu kontrol eden başlıca fiziksel kuvvetler arasında Van der Waals kuvvetleri, hidrojen bağları, polarite, dipol-dipol etkileşimleri ve π - π etkileşimleri bulunur (Ali, H. vd. 2010) .

Bu süreç, özellikle adsorban ucuzsa ve uygulama öncesinde ek bir ön işleme gerektirmiyorsa, kirli suların arıtımı için cazip bir alternatif sunar. Çevresel iyileştirme amacıyla adsorpsiyon teknikleri, özellikle geleneksel biyolojik atık su arıtma yöntemlerinden etkilenmeyen belirli kimyasal kirleticileri sudan uzaklaştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Dabrowski 2001, Allen 2005).

Adsorpsiyon, esneklik, basit tasarım, düşük başlangıç maliyeti, toksik kirleticilere karşı duyarsızlık ve kolay işletme gibi avantajlarıyla diğer tekniklerden üstün bulunmuştur. Ayrıca, adsorpsiyon zararlı maddeler üretmez (Crini 2006).

Adsorpsiyon verimliliğini etkileyen faktörler arasında adsorbat-adsorban etkileşimi, adsorban yüzey alanı, adsorban-adsorbat oranı, adsorban partikül boyutu, sıcaklık, pH ve temas süresi gibi etkenler yer almaktadır (Allen 2005, Crini 2006).

2.4.1.4 Koagülasyon ve Flokülasyon

Koagülasyon/flokülasyon, atık su yönetiminde önemli bir rol oynayan ve biyolojik arıtma ünitelerinin öncesinde veya sonrasında gerçekleştirilebilen kritik süreçlerdir. Bu yöntemler; partiküllerin, mikroorganizmaların, organik maddelerin, dezenfeksiyon yan ürünlerinin öncüllerinin ve belirli inorganik iyonlar ile metallerin uzaklaştırılmasına yardımcı olur (Shahedi vd. 2020). Bu süreçler, askıda kalan partiküllerin bir araya gelmesini sağlayarak çökelmelerini teşvik eden özel kimyasalların eklenmesini içerir. Böylece, daha büyük ve çökmeye uygun parçacık kümeleri oluşur ve partiküllerin birleşmesi kolaylaşır. Oluşan floklar, sedimentasyon veya filtrasyon yoluyla suyun arıtılmasına yardımcı olur. Bu entegre fiziksel ve kimyasal yöntem, atık sudaki askıda katı maddeleri ve kirleticileri etkili bir şekilde azaltarak biyolojik arıtma aşamalarının verimliliğini artırır (Saritha, Srinivas ve Srikanth Vuppala, 2017; Shahedi vd. 2020).

Koagülasyon ve flokülasyon yöntemi, kolloidal türdeki veya askıda kalan atık maddelerin uzaklaştırılmasında görev almaktadır. Alimünyum sülfat, demir (II) sülfat, demir (III) klorür gibi koagülant maddeleri koagülasyon ve flokülasyon yönteminde ajan olarak kullanılmaktadır. Koagülantların yardımı ile flokların yüzeyine tutunan veya metal hidroksitlere bağlanan boya maddelerinin çöktürülmesi ile arıtım prosesi gerçekleştirilmektedir (Bazrafshan vd. 2019).

2.4.2 Kimyasal yöntemler

Tekstil atık suyunun gideriminde kullanılan bir başka yöntem ise kimyasal maddelerin aktif rol oynadığı kimyasal yöntemlerdir. Kimyasal yöntemler, kullanılan bileşiklere göre oksidasyon, ozonlama, elektrokimyasal ve fotokimyasal olarak ayrılmaktadır.

2.4.2.1 Oksidasyon

Gelişmiş oksidasyon prosesleri, atık su arıtımında geniş bir uygulama alanına sahip yenilikçi teknolojiler olup, organik kirleticilerin giderilmesi, biyolojik parçalanabilirliğin artırılması ve renk ile koku giderimi gibi konularda kritik bir rol oynamaktadır. Bu süreçler, yüksek moleküler ağırlıklı bileşikler, canlı organizmaların biyoenerjetik döngüsüne uyumlu daha basit ara ürünlere parçalayarak biyolojik arıtma yöntemleriyle uyumluluk sağlar (Ochando-Pulido vd. 2017).

Gelişmiş oksidasyon yöntemleri arasında öne çıkan Fenton prosesi, Fe katalizörleri aracılığıyla H_2O_2 'nin $\bullet OH$ radikallerine ayrışmasını içeren bir tekniktir ve atık su arıtma tesislerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Oluşan hidroksil radikalleri, organik bileşikler seçici olmaksızın oksitleyerek bozunmalarını sağlar. Bu sürecin etkinliğini artırmak amacıyla UV veya sonik ışınlama gibi ek tekniklerle entegrasyonu mümkündür. Bu yöntemler, ekstra $\bullet OH$ radikalleri üreterek Fe^{3+} iyonlarının tekrar Fe^{2+} formuna dönüşümüne katkı sağlar. Ayrıca, bu tekniklerin özel ekipman gerektirmeksizin uygulanabilir olması, mevcut su arıtma sistemleriyle — koagülasyon, filtrasyon ve biyolojik oksidasyon gibi süreçlerle — kolayca bütünleşmesini mümkün kılar (Ribeiro ve Nunes, 2021).

2.4.2.2 Ozonlama

Ozon, ağırlıklı olarak atık suyun renksizleştirilmesi için kullanılır. pH seviyesine bağlı olarak, işlem sırasında moleküler ozon ile doğrudan reaksiyon, hidroksil radikalleri ile dolaylı reaksiyon, her iki mekanizmanın aynı anda gerçekleşmesi olarak üç tür arıtma gerçekleşebilmektedir. Ayrıca, ozonun yüksek oksidasyon potansiyeli, organik bileşikler etkili bir şekilde parçalayabilmesini sağlar. Ozonlama, KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) ve TOC'yi (Toplam Organik Karbon) orta düzeyde giderir ve bu bozunma tamamen ozon dozajına bağlıdır.

Ozon, boya moleküllerine rengini veren çift bağlara saldırarak renksizleşme sağlar. Bunun yanı sıra, boya ve pigmentlerdeki aromatik moleküllerdeki doymamış bağları koparır, böylece moleküllerin rengi azalır. Suyla temas ettiğinde ozon, atık sudaki organik ve inorganik bileşiklerle reaksiyona girer.

Ozonun avantajları düşük işletme maliyeti (ilk yatırım maliyeti hariç), etkili bozunma, çamur veya ek atık üretmemesi olarak sıralanabilmektedir. Ozonlamanın dezavantajları ise

yüksek ilk yatırım maliyeti, reaksiyon sırasında oluşan yan ürünlerden biri olan bromatın insan sağlığına zarar verebilmesi, sürecin tamamında elektrik enerjisi gereksinimi olarak sıralanmaktadır (Hajivandi vd. 2019, Gomes vd. 2012, Chen vd. 2009, Srinivasan vd. 2009).

2.4.3 Elektrokimyasal yöntem

Renk giderimi nedeniyle, elektrokimyasal arıtma giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu arıtma yöntemi, pH, sıcaklık, elektrik voltajı gibi faktörlerden etkilenir. Araştırmalar, belirli miktarda NaCl ve HCl eklenmesinin renk giderimi ve kimyasal oksijen ihtiyacının (COD) azaltılmasında ek katkı sağladığını göstermektedir.

Elektrokimyasal arıtmada, anodik oksidasyon verimliliği büyük ölçüde elektrot malzemelerine bağlıdır. Oksijen gelişimi için organik maddelerin oksidasyon potansiyelinin yüksek olması gerekir, aksi takdirde büyük miktarda akım oksijen üretimi için boşa harcanır. Grafit, ekonomik açıdan uygun olması nedeniyle genellikle anot olarak kullanılır. Galvanotaktik koşullarda, titanyum bazlı kararlı bir anot kullanılarak bir sistem geliştirilmiştir. Bu anot, $\text{RuO}_2/\text{IrO}_2/\text{TiO}_2$ karışık oksitleri ile kaplanmış olup, hücrenin merkezine yerleştirilmiş ve paslanmaz çelikten yapılmış karşıt elektrotlarla çevrelenmiştir. Sistem, 1.5 A akım kullanılarak batch modda çalıştırılmış ve gaz kaldırma yöntemiyle karıştırılmıştır. Başka bir çalışmada, titanyum trioksit ve genişletilmiş grafitten oluşan kompozit peletler elektrot olarak üretilmiş ve Reactive Black 5 boyasının arıtımında kullanılmıştır (Pavitra vd. 2019, Jager vd. 2018).

Platinyum elektrot kullanılarak hem bölünmüş hem de bölünmemiş konfigürasyonlarda reaktif boya bozulması/dekolorizasyonu gerçekleştirilmiştir. Anot olarak grafen oksit kullanıldığında, Reactive Orange 4 boyasının bozunmasında en iyi sonuçlar elde edilmiştir (Umokoro vd. 2017).

Bir başka araştırmada, elektrokimyasal arıtma ile lakkaz enzimi kombinasyonu kullanılarak deri sanayi atık sularındaki boyaların giderilmesi incelenmiştir. Dikdörtgen hücre, elektrokimyasal kabarcık reaktörü gibi farklı reaktör türleri kullanılmış ve en yüksek verimlilik elektrokimyasal kabarcık reaktöründe gözlemlenmiştir. Bu çalışma, deri sanayi atık su arıtımı hakkında temel bilgiler sağlamaktadır.

Acid Red 1 boyasının arıtımı için, paslanmaz çelik elektrotlar hem çalışma hem de karşıt elektrot olarak kullanılmıştır. Ayrıca, paslanmaz çelik yüzeyine polipirrol filmi polimerize edilerek Acid Red 1 gideriminde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bununla birlikte, elektrokimyasal arıtma yöntemi, verimliliğini artırmak amacıyla başka arıtma yöntemleri ile de birleştirilmektedir.(Pavitra vd. 2019)

Elektrokimyasal yöntemler, kullanılan elektrot tipi ve arıtımı amaçlanan kirleticinin türüne göre elektroflotasyon, elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyon başlıkları altında incelenmektedir. Kimyasal tüketimi, çamur oluşmaması ve arıtım sonrası elde edilen suyun kullanılabilir olması elektrokimyasal yöntemin avantajları arasındayken, yüksek maliyetli sistem hazırlığı ise en önemli dezavantajı arasındadır (Chaplin 2019, Bera vd. 2021).

2.4.4 Fotokimyasal yöntem

Bu yöntem, suyun varlığında UV tedavisi kullanılarak boya moleküllerinin bozunması için kullanılır. Yüksek konsantrasyonda üretilen hidroksil radikalleri, renk gideriminin tek kaynağıdır. Boyaların etkin şekilde giderilmesi için H_2O_2 , UV ışığı kullanılarak hidroksil radikali üretmek üzere aktive edilir. Bu yöntemde UV radyasyonunun yoğunluğu, pH, boya yapısı ve boya banyosu bileşimi gibi diğer faktörler de tedavi sürecine büyük ölçüde katkıda bulunur. Tekstil atık suyu tedavisi sırasında organik aldehitler, metaller, halojenler, inorganik asitler ve organik asitler gibi ek yan ürünler de üretilir.

Fotokimyasal tedavinin diğer mevcut yöntemlere göre avantajı, atık su tedavisi sırasında çamur üretimi ve kötü koku oluşumunun olmamasıdır (Singh vd. 2019)

UV ışığı, H_2O_2 'nin iki hidroksil radikale ($OH\bullet$) ayrışmasını sağlar:
 $H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2OH\bullet$

Bu reaksiyon, organik maddelerin kimyasal oksidasyonuna neden olur (Robinson vd. 2001).

Biyolojik arıtmadan önce uygulanabilecek bir arıtma teknolojisi UV destekli fotoliz,

UV ile peroksit fotolizi, UV Foto-Fenton, UV fotokatali olarak dört farklı fotokimyasal AOP yöntemi şeklinde değerlendirilmiştir. Bu yöntemler renk, COD ve Biyokimyasal

Oksijen İhtiyacı (BOD) giderimindeki etkinlikleri, yasal düzenlemelere uygunluk dereceleri, ileri biyolojik arıtma için suyun biyolojik olarak parçalanabilirliğini artırma kapasiteleri, elektrik enerjisi tüketimi, maliyet etkinliği gibi kriterler doğrultusunda incelenmiştir.(Bhargava vd. 2023)

Fotokimyasal (UV/O₃) reaksiyonlarının temel özelliği, kimyasal moleküllerin elektronik uyarılmasıdır ve bu süreç, UV veya ışık enerjisinin absorbe edilmesiyle başlar. Fotoliz radyasyonu, genellikle 200-400 nm dalga boyuna sahip UV spektrumunda bulunur ve yaygın olarak kullanılan bir ışınım türüdür. Fotoaktif veya fotosensitif boyar madde molekülleri doğrudan ışığı emerek uyarılabilir. Bu durum, bağ kopmalarına ve ardından bozunmaya yol açabilir (Gözmen vd. 2009).

Fotokimyasal bir süreçte, UV ışığı (hv), güçlü oksitleyici ajanlar veya bileşiklerle etkileşime girerek serbest radikaller oluşturabilir. Bu radikallerin UV absorpsiyon oranı düşük, ancak boyar madde giderim etkinliği yüksektir (Xue vd. 2023).

2.4.5 Biyolojik yöntemler

Dünya genelinde biyolojik yöntemler, su arıtma teknolojilerinin yaklaşık %70–80’ini oluşturmaktadır (Okut vd. , 2025). Mikroorganizmalar, çeşitli metabolik yollar ve büyüme modları aracılığıyla atık sudaki organik ve inorganik maddelerin bozunması, dönüşümü ve uzaklaştırılmasında kritik bir rol oynar (Barriuso vd. 2018).

Mikrobiyal aktivite, diğer bir deyişle mikrobiyal metabolik canlılık, belirli bir anda bir mikroorganizmanın hayati fonksiyonlarının tamamını ve belirli bir çevresel bağlamda mikroorganizma tarafından yürütülen tüm süreçlerin toplamını kapsar (Pan vd. 2023). Bu aktivite, mikrobiyal hücrelerin canlılığının ve metabolik durumunun bir göstergesi olup büyüme, üreme, metabolik süreçler ve çevresel koşullara uyum yeteneğini etkiler. Dolayısıyla, biyolojik atık su arıtma sistemlerinin verimliliğini ve etkinliğini doğrudan belirleyebilir (Tang vd. 2024).

Oksijen tüketim hızı, ATP içeriği, bakteriyel tür bileşimi, mikrobiyal popülasyon yoğunluğu ve çeşitli enzim aktiviteleri gibi göstergeler, mikrobiyal aktiviteyi etkili ve doğrudan yansıtan parametreler olarak kullanılabilir (Yu vd. 2024, Bao vd. ,2025).

Biyolojik atık su arıtma sistemleri, atık sudaki organik ve inorganik kirleticileri gidermek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, organik maddelerin parçalanması ve azot ile fosfor gibi besin maddelerinin uzaklaştırılması için mikrobiyal aktiviteye dayanır. Ancak geleneksel biyolojik arıtma sistemleri, ilaçlar, kişisel bakım ürünleri ve belirli endüstriyel kimyasallar gibi kirleticilerin arıtılmasında zorluklarla karşılaşabilir. Ayrıca, atık sudaki ağır metaller biyolojik arıtma sürecine ek zorluklar getirmektedir (Liv vd. 2025, Khalidi-idrissi vd. 2023, Hidrovo vd. 2022).

Son yıllarda araştırmacılar geleneksel yöntemlere alternatif olabilen, daha az enerji ve maliyet gerektiren yöntemler üzerine çalışarak tekstil atık sularında bulunan tüm kirleticilerin uzaklaştırılmasını amaçlamıştır. Bu doğrultuda tekstil atık suların gideriminde farklı mikroorganizmaların kullanıldığı biyolojik yöntemlerin öne çıktığı görülmektedir (Lage vd. 2021, Fazal vd. 2018).

Biyolojik atık su arıtımında, farklı metabolik tercihlere sahip çeşitli mikroorganizmalar, atık sudaki kirleticileri besin kaynağı olarak kullanır. Mikrobiyal toplulukların bileşimi, yalnızca bu atık suların arıtılması açısından değil, aynı zamanda çeşitli değerli biyoproduktlerin üretimi yoluyla değerlendirilmesi açısından da büyük önem taşır (Oliveira vd. 2023).

Biyolojik arıtma süreci, özellikle boya içeren atık suların giderilmesi için ucuz, çevre dostu ve ekonomik bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Genetik çeşitliliği ve çok yönlülüğü sayesinde, boya içeren atık su arıtımı için alternatif bir yöntem haline gelmiştir. Biyolojik maddeler, kirleticileri su, karbondioksit ve inorganik yapıda olan tuzlara dönüştürebilme yeteneğine sahiptir.

Boya bozunması, metabolik yollar veya adsorpsiyon yoluyla gerçekleştirilir. Bu süreçte bakteriler, mantarlar, mayalar, algler ve bitkiler gibi hem canlı hem de ölü biyokütleler rol oynayabilir (Pavitra vd. 2019).

Son yirmi yılda, mayalar tarafından kirletici giderimi konusunda büyük bir ilgi artışı yaşanmıştır. Mayalar, steril olmayan koşullarda düşük üretim maliyetleri ile yüksek miktarda kirletici giderebilir. Bu çalışma, atık su arıtımında mayaların potansiyel uygulamalarına yönelik gerçekleştirilen araştırmaların bir derlemesini sunmaktadır. Örneğin, atık su arıtımında kullanılan çeşitli maya suşlarına ilişkin verilerin özetlendiği bir değerlendirme sunulmaktadır. Bu çalışma, belirli bir atık su türü için uygun maya seçimine yönelik karar alma sürecine katkıda bulunacak ve bu alandaki araştırmaları destekleyecektir. Maya arıtımı, değişken arıtma koşullarına uyum sağlayabilen esnek bir yöntemdir. Mayaların atık su arıtımındaki etkinliği birçok faktörden etkilenmektedir. Maya teknolojisi, mevcut aktif çamur proseslerine entegre edilebileceği gibi, bakteriler yerine de kullanılabilir.

Mayaların belirgin özellikleri arasında düşük pH'a (3.0–5.0), yüksek tuzluluğa, yüksek organik yüklere ve antibiyotiklere tolerans göstermesi ile %12 (v/v) alkol içeren ortamda hayatta kalabilmesi bulunmaktadır. Düşük pH seviyelerinde maya yetiştirilmesi, bakteriyel kontaminasyonu azaltarak steril olmayan koşullarda mayaların baskın hale gelmesini desteklemektedir.

Laboratuvar ölçekli maya bazlı atık su arıtımı denemeleri son yirmi yılda gelişme göstermiştir; ancak, arıtım verimliliği atık suyun türüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Genel olarak, maya, çeşitli organik karbon kaynaklarını etkili bir şekilde işleyebilme kapasitesi sayesinde geleneksel mikrobiyal arıtma yöntemlerine kıyasla çeşitli avantajlar sunmaktadır. Ancak, endüstriyel ölçekte etkili bir teknoloji olarak uygulanabilirliği henüz tam olarak kanıtlanmamıştır (Mohiuddin vd. 2024)

2.4.5.1 Aerobik arıtım

Tekstil boyama işlemlerinden kaynaklanan atık suların arıtımında, aktif çamur kullanan aerobik biyolojik arıtım en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntem, atık sudaki karbonhidratlar, mumlar ve kolayca parçalanabilen yardımcı bileşikler gibi biyolojik olarak ayrışabilen bileşenleri giderir. Ancak, daha karmaşık yapıya sahip ksenobiyotik bileşikler, özellikle boyalar ve yüzey aktif maddeler, sistemde parçalanmadan kalabilir.

Aerobik biyolojik sistemlerin renk giderme konusundaki yetersizliği, alıcı su kaynaklarında estetik sorunlara yol açmış ve atık suyu deşarj eden işletmeleri alternatif yöntemler araştırmaya yönlendirmiştir. Boyalar, genellikle oksidatif biyolojik bozunmaya karşı dirençlidir, çünkü ticari boyaların en önemli özelliklerinden biri, kimyasal ve ışık kaynaklı oksidasyona karşı solmaya dirençli olmalarıdır. Bu durum, atık suyun toksisitesi açısından da önemli bir endişe kaynağıdır.

Ayrıca, boyar madde içeren atık suyun aerobik biyolojik arıtımındaki bir diğer zorluk, mikroorganizmaların substrata uyum sağlamasının güç olmasıdır. Tekstil endüstrisinde sürekli ürün değişimleri ve kesikli boyama işlemleri nedeniyle mikroorganizmaların ortama adapte olması zorlaşmaktadır.

Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOD) testleri üzerine yaptıkları çalışmada, tekstil atık suyundaki rengin, tipik evsel atık sulara kıyasla çok daha yavaş bir biyolojik bozunmaya uğradığını ortaya koymuştur. Tekstil boyaları ile ilgili yapılan birçok çalışmada, aerobik biyolojik arıtım sırasında boyaların bir miktar bozunduğu, ancak asıl giderim mekanizmasının aktif çamura adsorpsiyon yoluyla gerçekleştiği tespit edilmiştir (Joshi vd. 2004).

Aerobik arıtım yönteminin mekanizması aşağıda gösterilmektedir. (Mutlu vd. 2020)

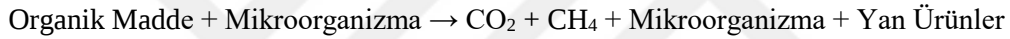


Geleneksel olarak kullanılan aerobik arıtım sistemleri; damlatma filtreleri (paketlenmiş yataklı reaktörler), stabilizasyon havuzları, havalandırılmış lagünler ve aktif çamur sistemleri olarak çeşitlendirilebilmektedir (Singh vd. 2017).

2.4.5.2 Anaerobik arıtım

Anaerobik arıtım, ortamda serbest oksijen yokluğunda, organik bileşenlerin karbondioksit ve metana dönüştürülmesi ile gerçekleşmektedir. Anaerobik arıtım yönteminde, karmaşık moleküler yapıya sahip organik bileşiklerin, karbon, kükürt ve azot bazlı gibi daha basit organik bileşiklere indirgemesi sağlanmaktadır (Gupta 2012).

Anaerobik arıtım reaksiyonu aşağıda gösterilmektedir. (Mutlu vd. 2020)



Azo boyalarının anaerob biyolojik indirgenmesi, kimyasal bozunma (arıtım) ve renk giderimi gibi birçok açıdan araştırılmıştır. Çevrede bulunan anaerobik indirgenme koşulları, oksijenin olmadığı akarsuların dip çökelleri veya belirli bölümlerdeki çöplüklerde bulunur. Azo ve diğer çözünabilir boyaların anaerobik biyoremediasyonu, bunların karşılık gelen aminlere parçalanması yoluyla renk giderimi sağladığı için yaygın olarak incelenmiş, ancak büyük bir çekinceyle ele alınmıştır. Çünkü boyadan daha toksik olan aminlerin kasıtlı olarak üretilmesi, çevresel açıdan fazla tercih edilmemektedir. Renk giderimi azo indirgenmesi sonucu gerçekleşse de tam mineralizasyon gerçekleşmez.

Azo boyaları, mikrobiyal elektron zincirinin indirgenmiş flavin nükleotidleri için oksitleyici bir ajan olarak görev yapar ve indirgenerek renkleri giderilir. Bu süreç, indirgenmiş flavin nükleotidlerinin tekrar oksitlenmesiyle eşzamanlı olarak gerçekleşir. Bunun olabilmesi için ek bir karbon kaynağı gereklidir; bu karbon kaynağı, renk gideriminin uygun bir hızda devam etmesini ve sonrasında metan, H₂S ve CO₂'ye dönüşmesini sağlar. Ancak ticari açıdan, bu ek karbon kaynağının sağlanması sınırlayıcı bir faktör olabilir.

Birçok durumda, reaktif azo boyalarının anaerobik koşullarda renk giderimi, azo redüktaz enzimi sayesinde gerçekleşir. Gonçalves ve arkadaşları, tekstil atık suyundan rengi gidermek amacıyla bir laboratuvar ölçekli ‘yukarı akış anaerobik çamur yatağı’ reaktörü kullanarak çalışmalar yapmıştır. Çalışmada, farklı ticari boyalar seçilmiş ve boya yapısının renk giderimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu yöntem kullanılarak asidik boyaların ortalama giderim verimi %80 ile %90 arasında bulunmuş, doğrudan boyalar için ise bu oran %81 olarak tespit edilmiştir. Ancak, dispers boyalar, özellikle de antrakininon bazlı boyalar, çok düşük konsantrasyonlarda bile bu anaerobik reaktörde başarılı bir şekilde giderilememiştir.

Bununla birlikte, azo boyalarının karşılık gelen aminlere parçalanması iki temel amacı gerçekleştirir: (i) atık sudaki rengin giderilmesi ve (ii) atık suyun sonraki biyolojik arıtım sürecine hazırlanması. Çünkü azo boyalarının anaerobik sindirimiyle açığa çıkan aromatik aminler, aerobik arıtma süreçleriyle etkili bir şekilde giderilebilmektedir. Dolayısıyla, mevcut literatür, anaerobik ve aerobik süreçlerin ardışık olarak uygulanmasının tekstil atık suyu arıtımı için daha etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anaerobik süreç genellikle daha az alan kaplar, 30.000 mg/L’ye kadar KOİ içeren atıkları arıtabilir, daha düşük sürekli maliyetlere sahiptir ve daha az çamur üretir. Eğer tam mineralizasyon gerçekleşirse, organik kirleticilerin metan ve oksijene dönüşmesi sağlanır ve böylece ısı, enerji üretimi ve düşük enerji maliyetleri gibi avantajlar elde edilir.

Anaerobik arıtım hidroliz, asit fazı ve metan fazı adı verilen üç aşamalı bir süreçtir. Hidroliz aşamasında, yüksek molekül ağırlıklı çözünmüş organik maddelerin hidrolizi gerçekleşir. Asit fazında ise, hidrolize edilmiş organik maddeler asit bakterileri tarafından yağ asitlerine ve sonrasında asetik aside dönüştürülür. Metan fazında, elde edilen asetik asit, H₂ ve CO₂’ye ve daha sonrasında metana dönüştürülür (Joshi vd. 2004).

Anaerobik ile aerobik arıtım sistemlerinin art arda yapılması hem çözünür hem de çözünmeyen boyaların giderilmesi ve toksisitesinin azaltılması daha uygulanabilir olduğu görülmektedir (Singh vd. 2017).

2.4.5.3 Biyoremediasyon

Fizikokimyasal yöntemler, çeşitli organik ve inorganik kirleticileri ortadan kaldırma, yüksek kirletici giderme etkinliği, hızlı reaksiyon hızı ve minimum çamur oluşumu gibi birçok avantajı nedeniyle atık sudaki kirleticileri gidermek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin yüksek işletme ve bakım maliyetleri, zararlı yan ürünler üretme riski ve bazı dirençli veya toksik organik bileşikler parçalayamama gibi bazı sınırlamaları vardır (Wu vd. 2023).

Bu endişeleri ele almanın alternatif ve sürdürülebilir bir yaklaşımı biyoremediasyondur. Bu yöntem, toksik maddelerin detoksifikasyonu, çevre dostu olması ve maliyet etkinliği gibi diğer yöntemlere kıyasla belirgin avantajlar sunar (Wu vd. 2023). Biyoremediasyon, biyobozunma, biyoadsorpsiyon, biyosorpsiyon, biyobirikim, biyopresipitasyon ve biyoliç gibi süreçlerin bir kombinasyonudur (Sreedevi, Suresh ve Jiang, 2022).

Biyoremediasyon, mikroorganizmalar ve bitkiler gibi canlı organizmaları kullanarak atık sudaki kirleticileri zararsız/toksik olmayan maddelere dönüştürür. Organizmalar, ya mevcut ortamda bulunan yerel türler kullanılarak ya da dış kaynaklardan temin edilip atık su arıtma sahasına yerleştirilerek zenginleştirilebilir. Organizma büyümesi ve aktiviteleri, biyoremediasyonun etkinliğini önemli ölçüde etkiler. Biyoremediasyon, mikrobiyal remediasyon ve fitoremediasyon olarak sınıflandırılır.

Mikrobiyal remediasyon, mikroorganizmaların atık sudaki kirleticileri gidermek için kullanılmasıdır. Bakteriler, mantarlar ve mikroalgler gibi mikroorganizmalar, anoksik, anaerobik veya aerobik koşullar altında mikrobiyal metabolik süreçleri için çeşitli kirleticileri enerji kaynağı olarak kullanır. Baskın mikroorganizma topluluğunun bileşimi, atık suyun özelliklerine, kullanılan teknolojiye, işletme koşullarına veya coğrafi konuma bağlıdır (Cyzdik-Kwiatkowska & Zielińska, 2016).

Mikrobiyal biyoremediasyon temelde in-situ ve ex-situ olmak üzere 2 grupta incelenmektedir. İnsitü biyoremediasyon yöntemindeki in-situ grubu kirleticilerin

bulunduğu ortamdaki kirlenmiş alanların temizlenmesini ifade ederken bu yöntem herhangi ek bir işlem gerektirmediği için düşük maliyetli ve etkilidir. Bu yöntemde mikroorganizmalar kemotaksis özellikleri ile kontamine alanlara taşınarak işlev görmektedir. Ex-situ biyoremediasyon yönteminde, kontamine alandaki toprağın veya suyun çıkarılıp sonrasında kirletici maddeler arıtılmakta ve bu yöntemde verimi artırmak için pH, oksijen, nem gibi etkenlerin dengesi kornmaktadır. Diğer yöntemlere kıyasla daha etkili olduğu görülmüştür. (Chagas-Spinelli vd. 2012, Gomes vd. 2013).

Biyodegradasyon: Biyodegradasyon süreci, organik maddelerin çeşitli enzimlerin etkisiyle daha basit ve küçük yan ürünlere ayrıştığı, enerjiye bağlı bir mekanizma olarak tanımlanır (Kaushik ve Malik 2009). Bu biyosüreç, biyobozunma ürünleri H_2O , CO_2 , NH_3 , CH_4 , H_2S veya PO_3 gibi daha temel elementlerden oluştuğunda mineralizasyon olarak adlandırılır. Organik bileşikler tamamen mineralize olmadığında ise bu süreç biyotransformasyon olarak tanımlanır (Danouche vd. 2021b).

Mantar âlemindeki diğer türlere kıyasla mayaların hızlı büyüme, yüksek plastisite ve olumsuz büyüme koşullarına uyum sağlama gibi avantajlarına rağmen (Jafari vd. 2014; Sen vd. 2016), halotolerant maya suşlarının organik kirleticilerin biyodegradasyonu için kullanılması üzerine yalnızca birkaç çalışma yapılmıştır.

Biyolojik süreçlerin sınırları, temel olarak belirli ksenobiyotik bileşiklerin (örneğin boyalar) sınırlı biyolojik bozunabilirliği, kirleticilerin mikrobiyal popülasyon üzerinde toksik veya inhibitör etkisi ve kirleticilerin biyobozunma hızının düşük olması gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Endüstriyel atık su arıtımında, mantarlar tarafından ağartma, mikrobiyal bozunma, adsorpsiyon ve canlı veya ölü organizmaların kullanımı gibi biyobozunma yöntemleri yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu süreçlerde bakteriler, mayalar, algler ve mantarlar gibi birçok mikroorganizma, çeşitli kirleticileri biriktirme ve parçalama yeteneğine sahiptir. Mevcut geleneksel biyodegradasyon süreçleriyle tatmin edici renk giderimi sağlanamamaktadır. Dahası, birçok organik molekül, karmaşık kimyasal yapıları ve sentetik organik kökenleri nedeniyle daha zor parçalanmaktadır. Özellikle ksenobiyotik yapıları nedeniyle, azo boyalarının biyolojik olarak bozunabilirliği oldukça sınırlıdır (Shah, 2019).

Sentetik boyaların biyoremediasyonunda maya kullanımı ise ilk olarak 1992 yılında, *Candida curvata* maya suşunun renkli atık suyun arıtımı için kullanılmasıyla gündeme gelmiştir. Günümüze kadar maya hücreleri kullanılarak sentetik boyaların biyodegradasyonu üzerine yapılan çalışmalar, diğer mikroorganizmalarla yapılan araştırmalara kıyasla sınırlıdır. Sentetik boyaların biyodegradasyonu üzerine en çok çalışılan maya suşları, Ascomycetes şubesine ait olan *Candida* sp. , *Saccharomyces cerevisiae* ve *Pichia* sp. türleridir. Basidiomycetous maya suşlarını içeren çalışmalar ise oldukça azdır ve yalnızca *Trichosporon* sp. ile *Pseudozyma rugulosa*'yı kapsamaktadır (Danouche vd. 2021).

Farklı bakteri, mantar ve maya gruplarına ait çeşitli mikroorganizmalar, farklı dirençli azo boyalarının biyodegradasyonunda rol oynamaktadır. Bozunma için kullanılan metabolik yollar yalnızca çevresel koşullara (örneğin aerobik veya anaerobik) bağlı olarak değil, aynı zamanda organizma türüne göre de değişebilir. Maya tarafından azo boyalarının bozunması, bakteri ve mantar türleri tarafından gerçekleştirilen renk giderme sürecine kıyasla çok daha az incelenmiştir. Maya ile boya biyoremediasyonunun genellikle üç süreç: biyosorpsiyon, biyoakümülyasyon ve biyodegradasyon aracılığıyla gerçekleşmektedir (Jafari vd. 2014).

Biyosorpsiyon: Biyosorpsiyon, kirleticinin yaşayan veya ölü biyokütleyle pasif olarak bağlanarak sulu çözeltiden ayrıldığı geri dönüşümlü bir süreçtir ve hücresel metabolik aşamalardan bağımsızdır (Abdi ve Kazemi 2015; Inoue vd. 2017). Bu süreç, kirleticinin sorbent yüzeyine fiziksel olarak yapışmasıyla veya kirleticinin sorbente dahil edilmesiyle gerçekleşebilir (Ali 2010; Brady vd. 1994). Mayaların hücre duvarında bulunan fonksiyonel gruplar (reaktif bölgelerin miktarı ve erişilebilirliği, kimyasal durumu ve afinitesi), kirleticinin türü, boya moleküllerinin özellikleri ve uygulanan işlemdeki fizikokimyasal parametreler, mayaların biyosorpsiyon kapasitesini etkileyen önemli faktörlerdir (Vieira ve Volesky 2000).

Biyosorpsiyon süreci, mikrobiyal hücre duvarlarının özelliklerine dayanır. Mantarların hücre duvarları kitin, glikoprotein, lipidler ve glukanlar gibi çeşitli maddelerden oluşur. Hücre duvarının yaklaşık %80'i polisakkaritlerden oluşur ve bu yapıya birçok farklı

protein bağlanır (Dhankhar ve Hooda 2011; Rashid vd. 2016). Hücre duvarında bulunan karboksil, fosfonat, amin ve hidroksil gibi fonksiyonel gruplar, çeşitli kirleticilerin ayrıştırılmasında ve etkileşiminde önemli rol oynar (Kanamarlapudi vd. 2018).

Bu teknikte, biyolojik olarak aktif veya inaktif bileşikler ile biyolojik kaynaklardan elde edilen malzemeler, metaller, boyalar ve kötü kokuya neden olan kimyasallar gibi organik ve inorganik kirleticileri pasif olarak gidermek için kullanılabilir (Ghaedi vd. 2013). Biyosorpsiyon işlemi adsorpsiyon, iyon değişimi, kirletici yüzeyi ile kompleks oluşturma ve çöktürme gibi çeşitli mekanizmalara dayanır (Rusu vd. 2021). İyi bir biyosorbentin özellikleri arasında düşük maliyet, yüksek biyosorpsiyon kapasitesi (yüksek afinite), kolay temin edilebilirlik, artık kirleticilerin kolay bertaraf edilmesi ve çok kez yeniden kullanılabilirlik bulunur. Ayrıca besin maddeleri, sıcaklık, pH gibi parametreler biyosorpsiyon sürecinde etkili faktörlerdir (Kanamarlapudi vd. 2018).

Biosorpsiyon prosedürleri, kirleticilerin (boyalar) giderilmesindeki etkinlikleri nedeniyle geniş bir önem kazanmıştır; bu yöntem, geleneksel yöntemlere kıyasla daha stabil bulunmuştur (Aksu vd. 2005). Biosorpsiyon, boya molekülünün bakteriyel biyokütle, hücre duvarının heteropolisakarit ve lipid bileşenlerindeki farklı fonksiyonel gruplar aracılığıyla adsorpsiyonu ile tüm bakteriyel hücreler tarafından gerçekleştirilen doğrudan bir renk giderme işlemidir. Biosorpsiyon tabanlı boya giderimi, boyanın organik veya inorganik bir katı matrisle etkileşimini içerir. Boyanın matrisle etkileşimi, matrisin bileşimine ve boya yapısına bağlıdır. Elektrostatik, iyonik değişim, Van der Waals kuvvetleri, kompleksleşme veya şelatlama gibi farklı etkileşimler, boyanın matrisle etkileşiminde rol oynar. Boya gideriminin biosorpsiyon yöntemiyle yapılması, sorbanın yüzey alanı, parçacık boyutu, pH, sıcaklık, temas süresi, tuzların, yüzey aktif maddelerin ve metallerin varlığı gibi çeşitli belirleyicilerden etkilenir (Robinson vd. 2001). Özellikle, sorpsiyon işlemlerinin kirleticilerin yalnızca bir fazdan diğerine geçişini sağladığı ve sonrasında güvenli şekilde bertaraf edilmesi veya farklı bir prosedürle geri kazanılması gereken çamur ürettiği vurgulanmalıdır. (Singh ve ark. 2019, Hu 1994).

Biyosorpsiyon, özellikle biyolojik olarak kolayca parçalanamayan boyalar gibi kirleticilerin atık sudan uzaklaştırılması için ekonomik ve çevre dostu bir mekanizmadır.

Bakteriler, mantarlar, algler, mayalar ve tarımsal atıklar, atık sudaki kirleticileri giderme kapasitesine sahip mükemmel biyosorbanlar olarak kabul edilmektedir (Gül 2018, Sadaf vd. 2014, Torres 2020) Biyosorpsiyonun, sulu çözeltilerden kirleticileri gidermek için kullanılan diğer mekanizmalara göre avantajları; düşük biyosorban maliyeti, hızlı bir süreç, farklı pH ve sıcaklık koşullarında yüksek bağlanma bölgeleri sayesinde yüksek kirletici tutma kapasitesi, biyosorbanın yenilenerek tekrar kullanılabilmesi, kolay depolama imkanı olarak sıralanabilmektedir (Vijayaraghavan, 2008). Mayalar, organik kirleticileri arıtarak atık sulardan uzaklaştırmada kullanılan mükemmel biyosorbanlar arasındadır. Tek hücreli organizmalar olup mantarlar sınıfına giren mayalar, düşük maliyetli ve oldukça etkili olmaları nedeniyle kirlenmiş suların biyoremediasyonunda önemli bir rol oynarlar. Maya teknolojisi, gen mühendisliği ve immobilize hücreler kullanılarak geliştirilmiş ve biyobozunma sürecini artırmak amacıyla organik maddeleri toksik olmayan bileşenlere dönüştürmek için uygulanmıştır (Gousia Qadir, 2019) .

Biyosorpsiyon yöntemi, biyoakümülyasyon yönteminin tersine hücrel metabolizmadan bağımsız bir yöntem olarak önümüze çıkmaktadır. Bu bağlamda boyanın hücre için herhangi bir toksisite etkisi mevcut değildir. Bundan dolayı ölü mikrobiyal biyokütlenin kullanıldığı pasif biyosorpsiyon yöntemi çok daha avantajlı durumdadır. Mikroorganizmalar biyosorpsiyon yöntemi tekstil atık sularının gideriminde etkili ve güvenilir bir şekilde kullanılmaktadır (Kodal ve Aksu 2017).

Biyoakümülyasyon: Zamanla bir organizmada kimyasalların birikmesi sürecidir. Uluslararası Saf ve Uygulamalı Kimya Birliği'ne (IUPAC) göre, biyoakümülyasyon şu iki süreçle gerçekleşir:

- 1.Biyokonsantrasyon: Kimyasalın doğrudan çevresel matristen alınması.
- 2.Biyomagnifikasyon: Kimyasalın besin zinciri yoluyla organizmaya girmesi.

Biyobirikim, maddenin hücreye alınma oranının, hücreden uzaklaştırılma oranından yüksek olması durumunda gerçekleşir ve şu formülle ifade edilir:

$$\text{Biyobirikim} = \text{AlımOranı} - \text{EliminasyonOranı}$$

Biyobirikim sürecinin etkisi, hem kimyasalın fizikokimyasal özelliklerine hem de organizmanın biyolojik yapısına bağlıdır (Chojnacka ve Mikulewicz 2014).

Her canlı organizma yaşamı boyunca hem organik hem de inorganik çeşitli maddeleri biriktirir. Biyobirikimin sonuçları, toksik etkilerin ortaya çıkmasıyla ilişkilidir ve hem kimyasalın türüne hem de organizmaya bağlıdır. Biyobirikimin ilk adımı maruziyettir. Farklı organizmalar, yaşadıkları ortama ve türlerine bağlı olarak kimyasalları çeşitli yollarla bünyelerine alırlar. Biyobirikim sonucunda biriken maddelerin kaderi (metabolizması), özellikle hidrofilik veya hidrofobik yapılarıyla güçlü bir şekilde ilişkilidir. Ayrıca, maddelerin organizmanın belirli bölümlerinde depolanması da kimyasal özelliklere bağlıdır. Kimyasalın türüne göre organizmadan uzaklaştırılma yolları da değişiklik gösterir (Chojnacka ve Mikulewicz 2014).

Biyoakümülyasyon yönteminde hücre içinde kirletici maddeler birikmektedir ve metabolik aktivite olduğu için canlı mikroorganizmalar kullanılmaktadır (Dönmez vd.2002). Bu yöntemde, atık sularda bulunan çeşitli kirleticiler, hücre duvarı ile birlikte taşınır ve sonrasında hücre içi yapılara bağlanarak birikim gerçekleşir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, boyanın canlı mikroorganizmalar üzerinde toksik etkiye neden olmasıdır (Kumar vd. 2015, Kodal ve Aksu 2017).

Biyoakümülyasyon, insanların iradesinden veya müdahalesinden bağımsız olarak gerçekleşen bir olgudur. Çevrede bulunan kirleticiler nedeniyle doğal olarak meydana gelir. Endüstriyel faaliyetlerin artması sonucu, çevrede biriken biyobirikimli maddelerin (organik bileşikler, toksik elementler) seviyesi son yüzyılda önemli ölçüde yükselmiştir.

Ksenobiyotikler (Xenobiotics): Ağır organik sentez ürünleri olan ksenobiyotikler, doğada bulunmayan kimyasallardır. Toksisitelerinin genel mekanizması, metabolik yollar için gerekli olan koenzimlerin blokajıdır. Canlı organizmaların bu maddelere karşı

doğal bir metabolizma yolu evrimsel süreçte gelişmediğinden, çoğu ksenobiyotik biyolojik olarak parçalanamaz ve çevrede birikerek kalıcı kirliliğe yol açar.

Toksik Elementler: Küresel ölçekte toksik elementlerin toplam miktarı değişmese de, endüstriyel faaliyetler nedeniyle hareketlilikleri artmıştır. Bu elementler, inert (hareketsiz) tortulardan serbest bırakılarak çevreye yayılmış ve biyolojik döngüye girmiştir (Chojnacka ve Mikulewicz, 2014).

2.5 Tekstil Atık Sularının Arıtımında Mayaların Önemi

Tekstil endüstrisi, ürettiği yüksek derecede kirletici sıvı atıklar nedeniyle çevre üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Dellamatrice vd. 2017; Sen vd. 2016). Bu boyalar kolayca emilir ve toksik, mutajenik ve kanserojen etkileri nedeniyle kanser ve diğer hastalıklara neden olabilir (Sudha vd. 2014). Boya içeren atık sular ayrıca fotosentetik aktiviteyi olumsuz etkileyerek su ortamlarında anoksik koşullar oluşturabilir ve bu da sucul organizmalar için ölümcül olabilir (Danouche vd. 2021; Kunz vd, 2002).

Geleneksel arıtma yöntemleri düşük verimliliğe, yüksek maliyetlere sahiptir ve ayrıca ayrı olarak işlenmesi gereken toksik atıklar oluşturabilir. Bu durum, bu yöntemlerin maliyetini ve karmaşıklığını önemli ölçüde artırır (Saratale vd. 2011; Mahmoud, 2016; Kurade vd. 2017). Biyolojik yöntemler ise organik kirleticilerin tamamen mineralizasyonunu sağlayabildiğinden veya canlı ya da ölü biyokütle tarafından adsorbe edilebildiğinden çevre dostudur ve daha düşük maliyetlidir (Danouche vd. 2021; Paz vd. 2017).

Boya biyobozunmasında rol oynayan mikroorganizmalar çeşitlidir ve son yıllarda incelenmiştir (Das ve Mishra, 2017). *Galactomyces geotrichum* (Kalyani vd. 2009), *Saccharomyces cerevisiae* (Aksu ve Dönmez, 2003; Mahmoud, 2016) ve *Candida* spp. (Yang vd. 2013; Martorell vd. 2017) gibi mayalar, boya bozundurma kapasiteleri açısından son zamanlarda araştırılmıştır. Bu mikroorganizmalar kültürde kolayca büyütülebilir ve çeşitli enzimler üretebilir. Ancak, bu biyolojik çözümler uzun vadeli

uygulama ve canlılık açısından bazı sınırlamalara sahiptir. Renk giderme kapasitesini koruyarak uzun süre saklanabilen formülasyonlara olan talep artmaktadır.(Mendes ve ark. 2023)

Mayalar, basidiomycetes ve ascomycetes türlerinden oluşan, tek hücreli halde yaşamaya özgü bir polifiletik mantar grubudur. Mayaların çevresel rolü diğer mantarlarla aynıdır. Aslında, bitki ve hayvan organik maddelerini biyokütle ve yan ürünlerine dönüştüren saprofitler olarak görev yaparlar (Kutty ve Philip 2008). Bu ekolojik özellikler, insan tarafından antik çağlardan beri kullanılmış olup, günümüzde de fermente süreçler (Bira, Şarap, Sake, Soya Sosu), gıda ve yem bileşenleri (enzimler, aromalar, pigmentler, amino asitler, organik asitler), biyokataliz (ilaç sanayisi, kiral kimyasal ara maddeler ve biyotransformasyon), biyokontrol (gıda ve yem güvenliği, bitki koruma, probiyotikler) ve moleküler biyoloji, yolak mühendisliği, sistem biyolojisi mekanizmaları, ilaç metabolizması ve direnç gibi temel biyoloji ve biyomedikal araştırmalarda geniş uygulama alanı bulmaktadır (Johnson ve Echavarri-Erasun 2011).

Bunun yanı sıra, mayaların bu ekolojik prensibinin farklı organik maddelerin biyobozunmasında kullanılması, bilim insanlarını, organik çözücüler, humik maddeler, fenolik bileşikler, petrol, yüzey aktif maddeler, pestisitler, ilaçlar ve boyalar gibi karbon temelli ksenobiyotiklerin biyobozunmasındaki kapasitelerini değerlendirmeye sevk etmiştir (Aksu 2005). Birçok çalışma, aromatik hidrokarbonlar (Deeba et al. 2018), fenol bileşikleri (Filipowicz vd. 2020), pestisitler (Han vd. 2019; Isia vd. 2019), fungusitler (Kucharska vd. 2020), insektisitler (Chen vd. 2012), herbisitler (States ve States 2011) ve sentetik boyalar (Danouche vd. 2021c, 2022) dahil olmak üzere çeşitli tehlikeli kirleticilerin biyobozunmasında mayaların yeteneğini rapor etmiştir(Mohammed vd., 2023)

Biyosüreçlerin çeşitli avantajları olmakla birlikte, bazı dezavantajlar da gözlemlenebilir; örneğin, filamentöz mantarlar veya mikroalgler kullanılarak boyaların biyoremoval işleminin uzun zaman alması (Singh ve Arora 2011). Dahası, bakteriler kullanılarak boyaların dekolorizasyonu iki aşamalıdır; önce Azo bağlarının anaerobik indirgenmesi, ardından ortaya çıkan aromatik aminlerin aerobik mineralizasyonu (Abiri vd. 2017; Roşu

vd. 2019). Ancak, maya hücrelerinin kullanımı bu dezavantajı aşmaktadır; bakteriler gibi hızlı büyümelerinin yanı sıra, pH dalgalanması veya sıcaklık değişiklikleri gibi olumsuz büyüme koşullarına uyum sağlama konusunda büyük bir plastisiteye sahiptirler. Ayrıca, mayalar bakterilerde olduğu gibi özel çift fazlı büyüme koşullarına ihtiyaç duymazlar. Dahası, maya hücreleri kullanılarak gerçekleştirilen boya biyobozunma mekanizmaları, farklı oksidazları içerir; bu enzimler, non-spesifik serbest radikal mekanizmalarıyla azo boyaları doğrudan parçalayarak, bakteriler tarafından sentetik boyaların azo bağlarının spesifik kesilmesi sonucu tipik olarak üretilen aromatik aminler gibi toksik ara ürünlerin oluşumunu önler (Pandey vd. 2007; Dave vd. 2015).

Üstelik, mayaların özel flokülasyon özelliği, onların çok hücreli kitleler (pul parçacıkları) oluşturmasını sağlar ve bu da, renkli atık suların arıtımından sonra mayaların toplanmasını kolaylaştırır (Soares ve Soares 2012). Bu nedenle, sentetik boyaların biyoremovalinde maya hücrelerinin kullanımı daha fazla ilgi çekmektedir (Jafari vd. 2014; Sen vd. 2016).

Son zamanlarda, *Pseudozyma rugulosa* (Yu vd. 2005), *Candida oleophila* (Lucas vd. 2006), *Saccharomyces cerevisiae* (Jadhav vd.2007), *Galactomyces geotrichum* (Jadhav vd. 2008), *Candida albicans* (Vitor vd. 2008), *Yarrowia lipolytica* (Aracagök vd. 2013) ve *Issatchenkia orientalis* (Jafari vd. 2014) gibi çeşitli askomiset maya türlerinin oldukça karmaşık azo boyalarını giderebildiği gösterilmiştir. Bu boyalar arasında Reactive Black 5, Direct Violet 51, Reactive Brilliant Red K-2BP, Reactive Yellow 84, Reactive Red 141 ve Reactive Blue 171 bulunmaktadır (Jafari vd. 2014)

Ascomycete ve basidiomycete suşlarına ait mayaların dekolorizasyon mekanizmalarına odaklanan çeşitli çalışmalar, aktif ve/veya pasif metabolizma yollarıyla çalışan üç biyoremoval stratejisinin yer aldığını göstermiştir: ekstraselüler biosorpsiyon (Dil vd. 2017; Mahmoud 2016), intraselüler bioakümüleyasyon (Das vd. 2010; Gönen ve Aksu 2009) ve/veya intra ve ekstraselüler biyobozunma (Martorell vd. 2018; Tan vd. 2019).

Maya, hem ikincil hem de üçüncül arıtım için potansiyel bir aday olabilir.

İkincil arıtmada maya, geleneksel aktif çamur sisteminde bulunan floküle olmuş bakteriler, mantarlar, protozoalar ve rotiferlerden oluşan kombinasyonla aktif olarak rekabet eder. İkincil arıtımın sonunda, maya endüstriyel olarak kanıtlanmış bir çökelme yeteneğine sahiptir ve hızlı ayrışma sağlar. Ayrıca, üretilen biyokütle değerli olabilir.

Üçüncül arıtmada ise maya, alternatif fizikokimyasal süreçler ve biyolojik yöntemlerle (örneğin mikroalgler) rekabet eder. Mikroalgler fotosentez yoluyla karbondioksiti oksijene dönüştürerek büyümek için azot (N) ve fosfor (P) kullanır ve böylece değerli biyokütle üretir. Buna karşılık, mayanın biyokütlesinde daha yüksek oranda N ve P bulunur, bu da onun mikroalglerle kıyasla daha yüksek potansiyele sahip olduğunu düşündürmektedir.

Verimliliği artırmak ve daha yüksek biyokütle üretimi sağlamak amacıyla mayanın mikroalglerle ortak kültür içinde yetiştirilmesi önerilmiştir. Velasquez-Orta ve arkadaşları, maya ve mikroalglerin birlikte yetiştirilmesi sürecini ayrıntılı bir şekilde ele almıştır. Mikroalgler ve maya birlikte yetiştirildiğinde simbiyotik bir ilişki oluştururlar. Maya, büyümek için oksijene ihtiyaç duyan heterotrofik bir mikroorganizmadır ve karbondioksit üretirken, mikroalgler bu CO₂'yi tüketerek oksijen üretir. Bu ortak kültür, çözünmüş oksijenin mikroalg büyümesi üzerindeki stresini azaltabilir ve her iki türün de büyümesi için gerekli olan O₂/CO₂ dengesini koruyabilir. Ayrıca maya, mikroalglerin enerji olarak kullanabileceği bazı kompleks şekerleri basit şekerlere parçalayabilir (Velasquez-Orta vd. 2022)

Maya, farklı besiyerlerinde yetiştirilebilir ve geniş bir çalışma koşullarına tolerans gösterebilir. Örneğin, bazı maya türleri çok düşük pH seviyelerinde, yüksek tuz konsantrasyonlarında, organik maddelerde ve antibiyotiklerde hayatta kalabilir (Wang vd. 2011). Ayrıca, bazı türler hacmen %12'ye kadar alkol içeren ortamlara dayanabilir ki bu çoğu mikroorganizma için toksik seviyedir. Mayanın optimum büyüme pH aralığı 3.0-5.0 olmakla birlikte, pH 7'ye kadar büyüyebilir. Hızlı büyüme yeteneği, mayayı biyolojik araştırmalar için ilgi çekici bir hale getirmiştir. Maya hücrelerinin çoğalma süresi, kullanılan besiyerine bağlı olarak 90 ila 140 dakika arasında değişmektedir. Ayrıca, değişen çevresel koşullara uyum sağlama kapasitesi olağanüstüdür.

Maya, düşük maliyetle büyük miktarlarda üretilen tek hücreli bir mikroorganizmadır. Dünya çapında yıllık maya üretimi 2 milyon ton civarındadır ve her yıl yaklaşık %4 oranında artması öngörülmektedir. Statista'ya göre, 2017 yılında maya ürünleri pazarının küresel değeri 4.16 milyar ABD doları olup, 2026 yılına kadar 8.94 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Maya üretim maliyeti kuru maya başına yaklaşık 6.714 ila 7.286 ABD dolarıdır (Cavka vd. 2015).

Maya, özellikle fırıncılık ve bira üretimi gibi gıda endüstrisinde yaygın olarak bilinmektedir, ancak atık su arıtımı açısından potansiyeli tam olarak keşfedilmemiştir. Bununla birlikte, mayayla atık su arıtımı giderek daha fazla ilgi çekmektedir. Scopus veritabanına göre, "maya ile atık su arıtımı" konulu yayımlanmış makale sayısı 2023 yılında 129 iken, 2024 yılında 2928'e yükselmiştir. Maya ile atık su arıtım sistemlerinin tasarımı, geleneksel atık su arıtım süreçlerine benzer. Açık ve aerobik koşullarda, asidik pH ve yüksek tuzluluk altında çalışmalar ve atık sudan tek hücreli protein üretebilirler (Yang vd. 2005, Mohiuddin vd, 2024).

Mayanın atık su arıtımında avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Avantajları; geniş bir organik atık yelpazesini arıtabilmesi, düşük pH seviyelerine toleranslı olması ve bu durumun da bakteriyel kontaminasyonu azaltması ve mayanın besiyerinde baskın hale gelmesini sağlaması, steril olmayan koşullarda hayatta kalabilmesi, arıtım faaliyetini gerçekleştirmek için güneş ışığına ihtiyaç duymaması şeklinde sıralanabilmektedir. Dezavantajları ise; oksijen tüketerek ve karbondioksit (CO₂) üretmesi olarak belirlenebilmektedir (Walls vd. 2019).

2.6 Maya Gelişiminde Zirai Atık Kullanılması

Üretilen tüm gıdaların yaklaşık üçte biri, çiftçilerden tüketicilere kadar uzanan değer zinciri boyunca kaybolmakta veya israf edilmekte olup bu miktar yılda yaklaşık 1,3 milyar ton etmektedir (Hoehn vd. 2023). Bu durum ekonomi ve çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Mirabella vd. 2014). Günümüzde, bir endüstrinin atığının başka bir endüstri için hammadde olarak kullanıldığı döngüsel ekonomi oluşturma eğilimi giderek artmaktadır. Bu bağlamda, biyorefineriler, biyokütle hammaddelerinden değerli ürünler

elde ederek atık bazlı bir döngüsel biyoekonomiye geçişi sağlayan araçlar olarak öne çıkmaktadır (Ubando vd. 2020).

Gıda endüstrisi, küresel nüfus ve ekonomik büyüme ile birlikte genişlemektedir (Singh vd. 2022). Ancak, bu genişleme gıda tedarik zincirinin her aşamasında üretim, dolaşım ve tüketim dahil yan ürünlerin (atıkların) artışına eşlik etmektedir (Özbük vd. 2020). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), dünya genelinde her yıl 1,3 milyar ton gıda atığının oluştuğunu ve bunun toplam küresel gıda üretiminin %30'undan fazlasına denk geldiğini bildirmiştir (Affognon vd. 2015). Bu gıda atıkları, önemli çevresel ve sosyoekonomik sonuçlar doğurmaktadır (Al-Obadi vd. 2022). FAO'ya göre, gıda atıkları küresel su çekiminin %6'sından, küresel tarım arazilerinin %30'undan sorumlu olup, yıllık 4,4 milyar ton CO₂ eşdeğeri sera gazı (GHG) üretimine katkıda bulunarak küresel sera gazı emisyonlarının %8'ini oluşturmaktadır (Jeswani vd. 2021 Jones vd. 2022). Teknik ilerlemeler ve hedeflenen sera gazı azaltım önlemleri uygulanmazsa, 2010 ile 2050 yılları arasında gıda tedarik zincirlerinin çevresel etkisinin %50 ila %90 oranında artacağı öngörülmektedir (Springmann vd. 2018). Bu nedenle, Birleşmiş Milletler (BM), Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) kapsamında “perakende ve tüketici seviyelerinde kişi başına düşen küresel gıda atığını yarıya indirmeyi ve üretim ile tedarik zincirindeki gıda kayıplarını, hasat sonrası kayıplar dahil, azaltmayı” hedefleyen bir direktif belirlemiştir (Ojha vd. 2020, Kwon vd. 2024).

Mayalar, genellikle oval, dairesel veya silindirik şekilli tek hücreli mantarlardır. İkiye ayrılırlar:

Fermantatif maya: Yalnızca altı karbonlu şekerleri kullanarak fermantasyon yapabilen ve bu süreçte alkol ve karbondioksit üreten maya türüdür (örneğin ekmek, buharlı ekmek ve şarap üretiminde kullanılır) (Mohd Azhar vd. 2017)

Oksidatif maya: Güçlü oksidasyon yeteneğine sahip, ancak fermantasyon yeteneği zayıf veya hiç olmayan maya türüdür (örneğin Candida ve Hansenula polymorpha). Bu mayalar petrol işleme endüstrisi ve atık su arıtma süreçlerinde kullanılır ve su arıtımı için

ana hedef mikroorganizmalardır. Organik bileşikleri veya kompleks bileşikleri metabolize etme yeteneğine sahiptirler (J.L.Wang, 2003)

Mayalar asidik ortamlarda büyümeyi tercih eder ve en iyi gelişim sıcaklıkları ise 25–30°C arasındadır. Mayalar asit direnci, ozmotik basınç direnci, yüksek sıcaklık direnci ve yüksek metabolik verimliliğe sahiptir. Ayrıca, gelişmiş enzim sistemleri sayesinde çeşitli özel ortamlara uyum sağlayabilirler. Bu nedenle toprakta, tatlı sularda, deniz ortamlarında ve canlıların yüzeyinde veya vücutlarında yaygın olarak bulunurlar.

Farklı maya popülasyonları farklı çevrelerde dağılmıştır ve bu topluluklardaki değişimler çevresel koşulların değişimini yansıtır. Dynowska, Trichosporon sp., Rhodotorula sp., Candida sp. ve Cryptococcus sp. türlerinin su kirliliğini gösteren indikatör mantarlar olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, mayalar bazı zor bozunur maddeleri ve organik toksinleri parçalama yeteneğine sahiptir. Araştırmalar, mayaların fenol ve gliseritler gibi çeşitli makromoleküler bileşikleri parçalayabildiğini göstermektedir (Yang, 2018)

Maya, sebze işleme endüstrilerinden kaynaklanan atık suların arıtılmasında başarıyla kullanılmıştır. Lahana, karpuz, salata ve tropikal meyvelerin artık biyokütlesinden elde edilen suların yanı sıra (Choi ve Park, 2003; Stabnikova ve ark. 2005), meyve kabuğu atıkları (Thiviya ve ark. 2022) ve bambu atıkları (Li ve ark. 2009) gibi atık suların işlenmesinde etkili olduğu gösterilmiştir. Mayalar ayrıca, yüksek şeker içeriğine sahip oldukları için bira üretimi kaynaklı atık suları da arıtabilmektedir (Schneider ve ark. 2013).

İçecek ve gıda sektörlerinde maya türleri kullanılarak yapılan arıtma çalışmaları oldukça yaygındır. Bunun sebebi, bu atık suların yüksek Kimyasal Oksijen İhtiyacı (COD) değerine sahip olması ve basit şekerler bakımından zengin olmasıdır. Maya sistemleri kullanılarak COD'nin ortalama %80'i giderilebilmekte olup, bu oran %45 ile %98 arasında değişmektedir.

Gıda işleme ve fermentasyon endüstrileri, büyük miktarlarda karbonhidrat açısından zengin atık sular üretmektedir. Bir biyodönüşüm süreci sayesinde, bu atık sular tek hücreli protein üretimi için ham madde olarak kullanılabilir. Yapılan bir araştırma, biyobozunma süreci sırasında pH'ın önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Fermentasyon sırasında karbonhidratlar organik asitlere dönüşerek pH'ı ideal aralık olan 4,6–6,5'in altına düşürmektedir (Mohiuddin ve ark. 2022).

Literatürde belirli maya suşlarının, atık sulardan çeşitli boyaların yüksek konsantrasyonlarını uzaklaştırma yeteneği olduğu belirtilmiştir. Bu durum, tekstil endüstrisinde kullanılan boyaların arıtımında mayaların etkili bir strateji olarak kullanılabileceğini öne sürmektedir (Ihsanullah vd. 2020).

Mevcut literatürde mikroorganizmalar tarafından azo boyaların gideriminin anaerobik koşullarda etkili olduğu belirtilmektedir. Fakat, azo bağlarının parçalanmasıyla başlayan bu süreç zamanla insanlar için mutajenik ve toksik olan aromatik aminlerin oluşumuna yol açmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla, yapılan çalışmalar genellikle anaerobik ve aerobik koşulların kombinasyonlarını içermektedir (Elisangela vd. 2009; Franciscon vd. 2009).

2.7 *Saccharomyces cerevisiae*

Maya türü *Saccharomyces cerevisiae*, geleneksel bira ve fırın mayalama işlemlerinden biyokimyasallar ve biyoyakıt üretimine kadar geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahip en önemli mikroorganizmalardan biridir (Mattanovich vd. 2014). Endüstriyel biyoteknolojide, hammadde (besi ortamı) maliyetleri toplam üretim maliyetinin %40-60'ını oluşturarak en büyük maliyet faktörü haline gelmektedir (Demain, 2007). Bu nedenle, daha ucuz tarım-gıda atıklarının veya yan ürünlerinin kullanımı giderek daha fazla ilgi görmektedir.

S. cerevisiae, glikoz, fruktoz ve sakkarozu metabolize etme konusunda özelleşmiştir ve nişasta ve selüloz gibi polisakkaritleri doğrudan parçalama yeteneğine sahip değildir.

(Kavşcek vd. 2015; Viktor vd. 2013). Bu nedenle, nişasta ve selüloz bakımından zengin bitkisel ve gıda işleme atıkları, maya büyümesini desteklemek için önceden termal, kimyasal veya enzimatik ön işlemlerden geçirilerek şeker monomerlerinin açığa çıkarılmasını gerektirir. Bu bağlamda, meyve ve sebze atıkları, yüksek glikoz ve sakkaroz içeriği, düşük lignin oranı, biyolojik olarak parçalanabilirlikleri ve yüksek erişilebilirlikleri nedeniyle maya üretimi için uygun hammaddeler olarak kabul edilmektedir (O'Connor vd. 2021; Sekoai vd. 2022).

Ayrıca, ananas kabuğu, portakal kabuğu, patates kabuğu, muz kabuğu ve havuç posası gibi meyve atıklarının %54,17 ile %83 arasında değişen şeker içeriği nedeniyle biyokütle üretimini artırdığı gösterilmiştir (Khan vd. 2022; Dias vd. 2020). Buna ek olarak, bu karbon kaynakları, lignin açısından zengin tarımsal atıklara kıyasla daha az enerji gerektiren ön işleme ihtiyaç duyduğundan, işleme maliyetlerini %30–50 oranında azaltabilir (Sekoai vd. 2021).

S. cerevisiae, fırıncı mayası olarak bilinen, kolayca temin edilebilen ve uygun maliyetli bir biyokütle kaynağıdır. Atık sulardan çeşitli kirleticilerin ve boyaların giderilmesinde kullanılmaktadır (Song vd. 2019; Stepchenkova vd. 2023; Zinovicius vd. 2022). *S. cerevisiae* biyokütlesi, çeşitli ticari fermantasyon işlemlerinden atık olarak toplanabilir veya basit fermantasyon süreçleri kullanılarak düşük maliyetle üretilir. Hücre duvarının kimyasal yapısı sayesinde *S. cerevisiae*, boyaları adsorbe edebilir. Hücre duvarı, çeşitli polisakkaritler, belirli proteinler ve diğer bileşenlerden oluşur. Bu biyomakromoleküller, boyaların adsorpsiyonu için gerekli olan amino, karboksil, sülfidril, tiol ve fosfat grupları gibi birçok fonksiyonel grup taşımaktadır (Santos vd. 2019).

Saccharomyces cerevisiae'nin doğal yaşam alanı meyve sularıdır. Bu ortam, özellikle şekerler olmak üzere çözünen maddeler bakımından oldukça zengindir. Mayanın bu şekerleri kullanarak büyümesi ve fermantasyon süreci, fizikokimyasal çevresinde önemli değişimlere neden olur. Büyümesini sürdürebilmesi için *S. cerevisiae*'nin bu değişimlere uyum sağlaması gerekmektedir. Fermantasyon sırasında şeker konsantrasyonu 1 M'den 10^{-5} M'ye kadar düşebilir ve ortamın genel bileşimi hücresel metabolizma tarafından

değiştirilmektedir. Bu nedenle, hücrenin şeker taşıma aktivitesi ve bu taşımayı sağlayan proteinler değişen koşullara uyum göstermelidir. *S. cerevisiae*, heksozları kolaylaştırılmış difüzyon yoluyla taşır. Glikoz açısından zengin ortamlarda büyütülen hücrelerde, taşıma düşük afiniteli şekilde gerçekleşir ($K_m \approx 20 \text{ mM}$). Ancak heksoz konsantrasyonunun düşük olduğu ortamlarda büyütülen hücrelerde, ek olarak yüksek afiniteli bir taşıma mekanizması ($K_m \approx 1 \text{ mM}$) da aktif hale gelir. Hem kesikli fermantasyonlarda hem de kemostat kültürlerinde, glikoz taşıma kinetiği düzenlenmektedir. Yüksek afiniteli taşıma mekanizması, kesikli fermantasyonların ilerleyen aşamalarında veya düşük seyrelme hızlarında daha belirgin hale gelir. Yani, glikoz konsantrasyonunun sınırlayıcı olduğu durumlarda bu taşıma sistemi baskın hale gelir. Başka bir deyişle, maya ortamındaki heksoz konsantrasyonuna uyum sağlayarak mevcut koşullara uygun bir taşıma sistemi ifade eder. (Kruckeberg, 1996)

Şeker metabolizması açısından *Saccharomyces* oldukça benzersizdir ve diğer mayalarda bulunmayan bir dizi kendine özgü özellik geliştirmiştir. *Saccharomyces*'e giden soy hattında gerçekleşen tüm genom duplikasyonu (WGD) sonrası, çoğu gen tekrar tek kopya haline dönse de, glikoliz ve şeker metabolizmasıyla ilgili birçok genin çift kopyası korunmuştur. Bu durumun, *Saccharomyces*'in artan glikolitik akış geliştirmesine ve glikozu hızla fermantasyon yoluyla etanol üretimine yönlendirebilmesine olanak sağladığı ve bu özelliğin, onun özel ekolojik nişinde rekabet avantajı sunduğu öne sürülmektedir. WGD geçirmemiş mayalar, farklı selektif baskılar altında evrimleşmiş ve kendilerine özgü düzenleyici mekanizmalar geliştirmişlerdir. Bu nedenle, *S. cerevisiae* üzerinde yapılan çalışmaların sonuçlarını doğrudan *K. marxianus* veya diğer WGD öncesi mayalara uyarlarken dikkatli olunmalıdır. Hatta bazı araştırmacılar, *S. cerevisiae*'nin aslında gerçek "konvansiyonel olmayan" maya olabileceğini öne sürmektedir (Lane vd. 2010).

2.8 *Candida boidinii*

Candida türleri, Fungi (Mantarlar) âlemi, Ascomycota şubesi, Hemiascomycetes sınıfı, Saccharomycetales takımı ve Saccharomycetaceae ailesine aittir (Barnett vd. 2000). *Candida* cinsi mayalar tek hücreli mikroorganizmalardır. Hücrelerin şekli ve

boyutu, türe, büyüme evresine, fizyolojik durumuna ve çevresel koşullara bağlı olarak değişir. Genellikle oval, elipsoidal veya uzunlamasına uzamış bir yapıya sahiptirler ve boyutları $(1-8) \times (1-6.0)$ μm arasında değişir (Kurtzman ve Fell, 1998; Malke 1988). Bu mayalar tipik olarak aerobik mikroorganizmalardır. Havalandırma sırasında çok az alkol üretirler veya hiç üretmezler, bunun yerine biyokütlelerini hızla artırır (Barnett vd. 2000). Optimal sıcaklık ve pH değerleri sırasıyla 25-30°C ve 4.0-6.0 arasındadır (Kurtzman ve Fell, 1998).

Metallerin uzaklaştırılmasının yanı sıra, mayaların tekstil sanayi atıklarından gelen boyaların renk giderimi ve bozunmasını, hidrokarbonların ve toksik kimyasalların parçalanmasını sağlayabildiği de belirlenmiştir. Candida cinsine ait çeşitli maya türleri, biyoprosesler, gıda ve ilaç endüstrisi ile çevre alanında geniş uygulamalara sahip olarak görülmektedir. Tüm maya türleri arasında, Candida türleri atık sudan BOD (Biyolojik Oksijen İhtiyacı) ve COD (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) gideriminde etkili olma yeteneğine sahiptir. (Rana vd. 2023)

Sinha ve ark. (2018), Candida türleri kullanılarak reaktif yeşil boyanın ve tekstil atık suyunun biyobozunumu üzerine bir çalışma raporlamıştır. Araştırmacılar, kullanılan maya suşunun yeşil boyayı %84 oranında giderdiğini ve tekstil atık suyunun genel kirliliğinde %75'e kadar azalma sağladığını gözlemlemiştir. Ayrıca, bu süreç sırasında oksido-redüktaz enzimi sentezlendiği belirlenmiştir. Reaktif yeşil boyanın renk giderimi mekanizmasında temel rolün enzimatik parçalanmaya dayandığını ve özellikle azo bağlarını hedef alarak kromofor grupların bozulmasını sağladığını öne sürmüştür.

2.9 *Kluyveromyces marxianus*

Kluyveromyces marxianus, genellikle fermente geleneksel süt ürünleri, kefir tanesi, şeker endüstrilerinin atıkları, sisal yaprakları ve bitkiler gibi geniş kapsamlı doğal habitatlardan izole edilen en umut verici geleneksel olmayan mayalardan biridir. Bu, hızlı büyüme oranı ve termotolerans gibi çeşitli faydalı özelliklere sahip, gıda sınıfında bir maya olup, farklı endüstriyel gıda ve biyoteknolojik uygulamalar için cazip hale gelmektedir. *K. marxianus*, enerji üretimini solunum veya fermantasyon yollarıyla gerçekleştirebilen

respiro-fermentatif bir mayadır. Geniş bir metabolit yelpazesi üreterek farklı gıda ve biyoteknoloji endüstrilerine katkıda bulunabilir. *Saccharomyces cerevisiae*, tüm yönleriyle en yaygın kullanılan baskın temsilci olmasına rağmen, *K. marxianus*'un biyoteknoloji, gıda ve çevre alanlarındaki birçok uygulaması günümüzde yeni yeni ortaya çıkmaktadır (Karim vd. 2020)

K. marxianus, süt bazlı gıda sınıfı maya olarak, biyokütle üretiminden biyoremediasyona kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Karim vd. 2020). Yüksek pazar değerine sahip çeşitli hücre içi ve hücre dışı ürünler üreterek önemli bir endüstriyel role sahiptir (Lane vd. 2010). Geniş substrat yelpazesi, termotoleransı, yüksek büyüme hızları, aşırı şeker maruziyetinde fermentasyona daha az eğilim göstermesi ve laboratuvar ortamında güvenle işlenebilme (GRAS) özellikleri nedeniyle büyük bir pazar potansiyeline sahiptir (Fonseca vd. 2008). *K. marxianus*, endüstriyel potansiyele sahip bir suş olup çevresel strese iyi uyum sağlar (Lopez –Alvarez 2012). Bu maya, γ -aminobütirik asit üretiminde kullanılır (Perpetuini vd. 2020) ve son ürün kalitesi için hayati önem taşıyan peynir olgunlaşmasında önemli bir rol oynar (Perpetuini vd. 2019) . Fonseca ve arkadaşları (2008), *K. marxianus*'un inülinaz, β -galaktosidaz, β -glukozidaz ve protein fosfatazlar, karboksipeptidazlar ve aminopeptidazlar gibi yaygın kullanılan bazı enzimlerin üretimi için de kullanılabileceğini önermiştir (Easwaran vd. 2022).

Kakuta ve ark. (1998), bazı mayaların sentetik boyaları bozunmaya uğratabilme yetenekleri nedeniyle metal absorpsiyonunda uygun biyosorbanlar olabileceğini belirtmiştir. Meehan ve ark. (2000), *K. marxianus*'un Remazol Black-B boyasını içeren çözeltileri renk giderimi açısından başarılı bir şekilde arıtabilen bir mikroorganizma olduğunu ortaya koymuştur. Aerobik koşullar altında aktif olarak büyüyen *K. marxianus* IMB3 hücreleri, 24 saat içinde çözeltideki boyayı tamamen gidermiş ve 37°C'de maksimum %98 renk giderimi sağlamıştır. Araştırmacılar, renk gideriminin esas olarak boyanın hücresel biyokütleyle fiziksel adsorpsiyonundan kaynaklandığını, herhangi bir kimyasal enzimatik aktivitenin rol almadığını tespit etmiştir (Meehan vd. 2000). Ancak, boya bileşenlerinin hücresel biyokütle tarafından nasıl alındığı mekanizması henüz tam olarak açıklanmamıştır. Biyosorpsiyon tabanlı süreçlerin temel zorluklarından biri, büyük miktarda çamur oluşumuna neden olmasıdır. Bu çamur, daha ileri arıtma yöntemleri

gerektirebilir; örneğin, katı hal fermantasyonu gibi yöntemler uygulanabilir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, katı hal fermantasyonu yapabilen mikroorganizmaların kullanılması önerilmektedir. Beyaz çürüklük mantarları, *K. marxianus* ve benzeri mikroorganizmaların tekstil boyalarının renk giderimi açısından etkili olduğu gösterilmiştir (Senthilkumar vd. 2014).

K. marxianus'un sahip olduğu termo-tolerans, yüksek etil asetat üretimi, düşük maliyetli karbon kaynaklarını (örneğin, inülin, laktoz ve ksiloz) kullanabilme yeteneği, kısa hücre bölünme süresi ve hızlı büyüme hızı, bu mayayı biyoteknolojik, gıda ve çevresel uygulamalar açısından oldukça önemli bir araç haline getirmektedir. Ayrıca, yüksek etanol konsantrasyonu ve/veya yüksek sıcaklık koşullarında yaşayabilmesi, bu mayanın üstün adaptasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Çeşitli araştırmalarda, *K. marxianus*'un farklı stres koşullarına (örneğin, düşük pH, yüksek sıcaklık, oksijen kısıtı, yüksek etanol konsantrasyonu) dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Bu özellikler, biyoyenilenebilir endüstriyel uygulamalar için büyük bir avantaj sağlamaktadır (Karim 2020).

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

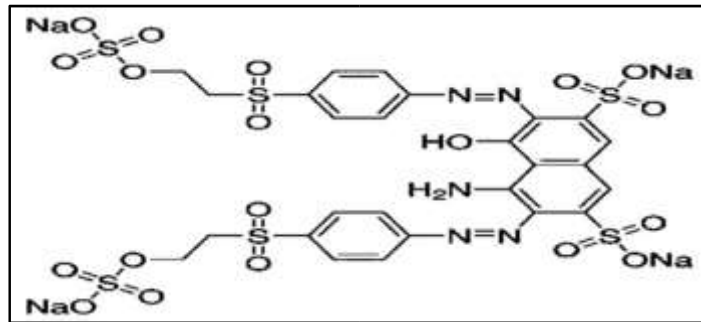
3.1.1 Mikroorganizmanın elde edilmesi ve saklanması

Tez çalışmasında biyogiderim kapasitesinin belirlenmesi amacıyla Ankara Üniversitesi Biyoloji Bölümü Biyoteknoloji Araştırma Laboratuvarı kültür koleksiyonunda yer alan *Saccharomyces cerevisiae* mayası kullanılmıştır. Kullanılan maya Potato Dekstroz Agar (PDA) içeren katı ve yatkı besiyerlerine ekimleri gerçekleştirilmiş olup stok kültürler halinde +4°C’de buzdolabında saklanmıştır.

3.1.2 Boya stok solüsyonunun deneyler için hazırlanması

Sigma marka (CAS: 17095-24-8) saf ve toz halde bulunan Reactive Black 5 boyası (RB5) kullanılmıştır.. Boyanın stok solüsyonu, konsantrasyonu %2 (w/v) olacak şekilde distile suda çözülüp otoklavlanarak hazırlanmış olup istenilen konsantrasyonlarda biyoremediasyon deneylerinde kullanılmıştır (Aksu, 2005).

3.1.2.1 Reactive black 5



Şekil 3.1 Reactive Black 5 boyasının kimyasal yapısı (<https://www.sigmaaldrich.com>)

Çizelge 3.1 Reactive Black 5'in kimyasal özellikleri

Boya	Reactive Black 5
Molekül Ağırlığı	991.82 g/L
Molekül Formülü	C ₂₆ H ₂₁ N ₅ Na ₄ O ₁₉ S ₆
Renk	Siyah
λ _{max}	600 nm
CAS Numarası	17095-24-8

3.1.3 Zirai atıkların temini ve saklanması

Tez çalışmasında 3 farklı zirai atık kullanılmıştır. Çay atığı, İşletmeleri Genel Müdürlüğü (Çay-Kur)/Rize'den, Balkabağı atığı Ankara/ Türkiye'nin lokal pazardan ve havuç posası ise Belso A.Ş. Ankara' den temin edilmiştir. Ham maddeler etüvde (Nevü FN400) 70°C sıcaklıkta kurutulduktan sonra laboratuvar tipi değirmende (Miprolab) por çapı 0.24 cm olacak şekilde öğütülerek oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir.

3.2 Yöntem

3.2.1 Zirai atıkların ön-işlem yöntemi

Zirai atıkların seyreltik asit yöntemi ile ön işlemini için 50 g/L çay atığı, balkabağı posası ve havuç posası içeren ortamlara %1 H₂SO₄ eklenerek 121°C'de 15 dakika otoklavlanmıştır. Böylece mayanın kullanabileceği monomerik şekerlerin açığa çıkması sağlanmıştır. Otoklav işlemi sonrası hidrolizatlar filtre kağıdı yardımıyla süzölmüştür. Süzöntü deneyin sonraki aşamalarında kullanılmak üzere stok olarak buzdolabında +4°C'de saklanmıştır.

3.2.2 Biyogiderim deneyleri

Tüm biyogiderim deneyleri boyunca 250 ml'lik erlenlerde 100 ml'lik çalışma hacmi ile çalışılmıştır. Belirli konsantrasyonlarda boya çözeltisi ve %10 inokülüne sahip maya

içeren erlenler 100 rpm çalkalama hızında deney süresi boyunca çalkalanmıştır. İki paralel olacak şekilde belirli saatlerde (0-168), örnekler alınmıştır. Alınan örnekler 5000 rpm’de 5 dakika santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonrası süpernatant temiz bir tüpe alınarak boya giderim verimini belirlemek ve pelet ise mikrobiyal gelişim için analiz edilmiştir. Belirtilen deney düzeneği ile farklı parametrelerin biyogiderim verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.2.3 Başlangıç pH değerinin biyogiderim etkisinin araştırılması

50 mg/L RB5 içeren deney ortamlarının başlangıç pH değerinin biyogiderime etkisi araştırılırken 4, 5, 6, 7 olmak üzere dört farklı pH değeri incelenmiştir. pH değerlerinin ayarlaması 0.1 M H₂SO₄ ve 0.1 M NaOH ile yapılmıştır.

3.2.4 Başlangıç boya konsantrasyonunun biyogiderime etkisinin belirlenmesi

Optimum pH değerinde başlangıç boya konsantrasyonlarının biyogiderime etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 103.67 mg/L, 209.25 mg/L, 400.00 mg/L ve 595.3 mg/L olmak üzere dört farklı boya konsantrasyonu denenmiştir.

3.3 Analitik Yöntemler

3.3.1 Spektrofotometrik ölçümler

Deneydeki biyogiderim veriminin ölçülmesi amacıyla belirli aralıklarla alınan örnekler santrifüj edilmiş, elde edilen süpernatant kısmında gerekli spektrofotometrik ölçümler yapılmıştır. Spektrofotometrede okuma işlemi 600 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. Santrifüj sonrası elde edilen pelet ise *S. cerevisiae*’nın boya içeren besiyerindeki gelişiminin incelenmesi amacıyla örnek alınarak 600 nm dalga boyunda okunmuştur.

Santrifüj işlemi için Hettich Rotofix 32 A model santrifüj, spektrofotometrik işlemler için Shimadzu UV-1201V model laboratuvar tipi spektrofotometre kullanılmıştır.

3.3.2 Biyogiderim veriminin hesaplanması

Giderim verimi, boyarmadde gideriminde, uzaklaştırılan boyarmadde derişiminin, başlangıç boyarmadde derişimine oranı olarak tanımlanmıştır ve bunun için aşağıdaki formül tanımlanmıştır:

$$\% \text{ Boya giderim (BG)} = ((C_o - C_f) / C_o) \times 100$$

Burada;

C_o : Biyoakümülyasyon ortamındaki başlangıç boya derişimi (mg/L)

C_f : Herhangi bir anda biyoakümülyasyon ortamında kalan boya derişimi (mg/L) ifade etmektedir.

Gram başına düşen maksimum spesifik boya alımı (q_m) için kullanılacak formül;

$$q_m = (C_o - C_f) / X_m$$

q_m : kurutulmuş bir gram hücredeki maksimum boya miktarı (g g⁻¹)

X_m : maksimum kurutulmuş hücre kütlesi (g l⁻¹)

C_o : başlangıç boya konsantrasyonu (mg l⁻¹)

C_f : son boya konsantrasyonu (mg l⁻¹)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Araştırılan tez konusunda, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Biyoteknoloji Araştırma Laboratuvarı Kültür Koleksiyonu'nda bulunan maya ve boya kullanılmıştır. Yapılan tez çalışmasında *Saccharomyces cerevisiae* mayası farklı zirai atıklarında Reactive Black 5 (RB5) boyasını biyogiderimi incelenmiştir.

Biyokütlenin boya gideriminde ortam pH değeri, artan boya konsantrasyonu ve biyogiderim konsantrasyonu, biyogiderim zamanı gibi farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir.

4.1 Deneylerde Kullanılan Atıkların Başlangıç İndirgen Şeker Miktarlarının Belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde 50 g/L başlangıç balkabağı, havuç ve çay atığının başlangıç indirgen şeker miktarları belirlenmiştir. Bu miktarlar çay, havuç ve balkabağı posaları için sırasıyla 21.52 g/L, 36.82 g/L ve 8.31 g/L olarak bulunmuştur.

4.2 Başlangıç Ham Maddenin Seçimi

Tez çalışmasında kullanılacak ham maddenin belirlenmesi için üç farklı atık kullanılarak 50 g/L besiyeri konsantrasyonun biyoremediasyona etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.1'de 50 g/L başlangıç çay, havuç ve balkabağı posalarında 50 mg/L boya konsantrasyonun da zamana bağlı gerçekleştirilen biyoremediasyon % 'leri en yüksek sırasıyla 76.35 ± 0.94 , 25.71 ± 1.20 ve 96.14 ± 0.44 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.1 Farklı zirai atıklarında geliştirilen *S. cerevisiae* RB5 boya giderimine etkisi (50 g/L başlangıç posa konsantrasyonu, 50 mg/L RB5; %10 inokülüm; 30 °C; 100 rpm)

Hammadde	Zaman (saat)			
	24	48	72	96
	Biyogiderim (%)			
Çay	60.18 ±0.24	60.94 ±0.11	62.19 ±1.30	76.35 ±0.94
Balkabağı	8.44 ±0.62	13.59 ±0.50	21.13 ±1.05	25.71 ±1.20
Havuç	91.71 ±1.10	92.53 ±0.64	93.75 ±0.38	96.14 ±0.44

4.3 Başlangıç pH Değerinin Biyogiderim Üzerine Etkileri

Optimum pH değerinin belirlenmesi için %1 H₂SO₄ ile ön-işleme tabi tutulmuş 50g/L havuç posası varlığında *S. cerevisiae* ile RB5 boyasında farklı pH değerlerinin biyogiderim etkisi belirlenmiştir.

48 saat sonunda pH 4, 5, 6 ve 7 için biyogiderim % 'leri sırasıyla 54.56, 99.07, 71.76 ve 60.88 olarak elde edilmiştir.

Yapılan çalışmada Çizelge 4.2 'deki gibi 50 mg/L RB5 boya konsantrasyonunda en yüksek biyoakümülyasyon %'si pH 5'de % 99.07 olarak bulunmuştur. İlerleyen deneylere pH 5 değeri ile devam edilmiştir.

Çizelge 4.2 Farklı pH değerlerinin biyogiderime etkisi (50g/L başlangıç havuç posası konsantrasyonu, 50 mg/L RB5; %10 inokülüm; 30 °C; 100 rpm)

pH Değeri	Zaman (saat)		
	Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/L)	24	48
		Biyogiderim (%)	
4	45.58 ±1.90	42.84 ±0.69	54.56 ±0.38
5	57.82 ±3.40	93.33 ±1.19	99.07 ±0.26
6	57.82 ±3.74	70.00 ±0.86	71.76 ±0.58
7	52.52 ±1.02	51.42 ±0.53	60.88 ±0.07

4.4 Farklı Başlangıç Boya Konsantrasyonlarının Zamana Bağlı Biyogiderim Üzerine Etkisi

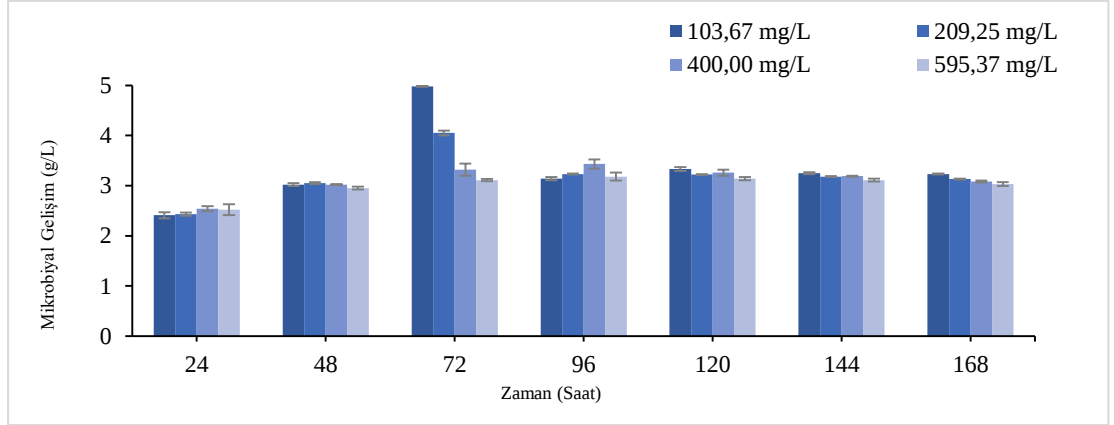
Yapılan çalışmada, *S. cerevisiae* mayasının farklı başlangıç boya konsantrasyonlarında zamana bağlı biyogiderim üzerine etkisi 103.67 mg/L, 209.25 mg/L, 400.00 mg/L ve 595.3 mg/L RB5 boya konsantrasyonlarında incelenmiştir. En yüksek biyogiderim %'si tüm konsantrasyonlar için 168. saatte gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.3 'de gösterildiği gibi bu değerler 103.67 mg/L, 209.25 mg/L, 400.00 mg/L ve 595.37 mg/L için sırasıyla 92.77±0.83, 81.03±1.64, 75.24±0.11 şeklinde belirlenmiştir.

Çizelge 4.3 Farklı başlangıç RB5 boya konsantrasyonlarının biyogiderime etkisi (50g/L başlangıç havuç posası konsantrasyonu; %10 inokülüm; 30 °C; 100 rpm)

Başlangıç RB5 Konsantrasyonu (mg/L)	Zaman (saat)						
	24	48	72	96	120	144	168
	Biyogiderim (%)						
103.67	79.43 ±1.27	84.19 ±3.81	87.81 ±0.80	88.66 ±1.26	88.91 ±1.44	89.28 ±0.82	92.77 ±0.83
209.25	67.94 ±0.32	75.68 ±0.51	77.96 ±1.27	78.32 ±0.47	79.69 ±0.92	79.97 ±1.05	81.03 ±1.64
400.00	57.42 ±0.39	65.92 ±0.96	69.69 ±0.42	70.07 ±0.28	70.41 ±0.36	70.48 ±0.45	75.24 ±0.11
595.37	45.70 ±0.32	46.24 ±0.57	46.51 ±0.63	47.13 ±0.62	47.58 ±0.55	48.12 ±0.80	48.84 ±1.12

Çizelge 4.3’de 50 g/L havuç konsantrasyonunda ve RB5 boya konsantrasyonlarında *S.cerevisiae* mayasının zamana bağlı mikrobiyal gelişime etkileri incelenmiştir. Belirlenen RB5 boya konsantrasyonları 103.67 mg/L, 209.25 mg/L, 400.00 mg/L ve 595.3 mg/L’dir ve örnek alınan saat aralıkları ise 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168’dir. Her bir boya konsantrasyonu için *S. cerevisiae*’nin en iyi gelişim gösterdiği zaman aralıkları sırasıyla 103.67 mg/L için 72. saatte 4.98 ± 0.01 , 209.25 mg/L için 72. saatte 4.05 ± 0.05 , 400.00 mg/L için 96. saatte 3.43 ± 0.09 , 595.3 mg/L için 96. saatte 3.18 ± 0.08 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.1 Farklı Başlangıç RB5 boya konsantrasyonlarının mikrobiyal gelişime etkisi (50g/L başlangıç havuç posası konsantrasyonu; %10 inokülüm; 30 °C; 100 rpm; 48 saat)

Deneyisel çalışmalarda kullanılan qm değeri (maximum adsorption capacity), biyogiderim (adsorpsiyon veya biyoakümülyasyon) süreçlerinde kullanılan maksimum adsorpsiyon kapasitesini ifade eder. 50 g/L havuç konsantrasyonunda ve değişen RB5 konsantrasyonlarında bir adsorbent olan *Saccharomyces cerevisiae* tarafından doyma durumunda tutulan maksimum boya miktarı Çizelge 4.4' de verilmiştir. Maya hücreleri belirli koşullar altında daha fazla boya alamadığında ulaşılan en yüksek boya yükleme kapasitesi yani qm değeri her bir boya konsantrasyonu için sırasıyla; 103.67 mg/L'de 19.20, 209.25 mg/L'de 41.47, 400.00 mg/L'de 81.16, 595.3 mg/L'de 89.50 şeklinde gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4 Farklı başlangıç RB5 boya konsantrasyonlarının biyogideriminde C_f (mg/L), q_m (mg/g) ve X_m (g/L) değerleri (50g/L başlangıç havuç posası konsantrasyonu; %10 inokülüm; 30 °C; 100 rpm)

Başlangıç RB5 Konsantrasyonu (mg/L)	C_f (mg/L)	X_m (g/L)	Q_m (mg/g)
103.67	8.03 ±0.48	4.98 ±0.01	19.20
209.25	41.29 ±2.31	4.05 ±0.05	41.47
400.00	121.63 ±2.50	3.43 ±0.09	81.16
595.3	310.75 ±2.31	3.18 ±0.08	89.50

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

S. cerevisiae mayasının biyokütlesi adsorban olarak kullanılmasıyla tekstil endüstrisinde en yaygın kullanılan boyalardan biri olan Reactive Black 5'in biyolojik giderimi araştırılmıştır. Buna göre, yapılan biyoakümülyasyon deneylerinde, optimum pH değeri belirlendikten sonra aynı koşullar altında pH (4, 5, 6, 7), başlangıç boya konsantrasyonu (50, 103.67, 209.25, 400.00 ve 595.3 mg/L), başlangıç biyoakümülyasyon konsantrasyonu %10 inokulum ve biyoakümülyasyon süresinin (24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 saat), 30 °C sıcaklıkta, 50 g/L havuç konsantrasyonundaki etkileri incelenmiştir.

Biyolojik süreç, tekstil sularında bulunan boyaların arıtılması konusunda düşük maliyetli, sürdürülebilir ve etkili bir yöntem olması açısından oldukça önemlidir. *S. cerevisiae* mayasının RB5 boyasını biyoakümülyasyon yöntemiyle etkin bir şekilde uzaklaştırmayı başarmıştır. Ancak biyoremediasyon olaylarının gerçekleşmesinin zaman alması, sonuçların hızlı elde edilmesinin önüne geçmektedir. Endüstriyel uygulamalar için zaman kısıtlayıcı bir faktör değilse *S. cerevisiae* diğer mayalara göre boya giderimi için en uygun ve başarılı sonuç veren mayadır. Özellikle düşük pH koşullarında ve destekleyici organik kaynak varlığında boyar madde gideriminde oldukça etkili olduğunu göstermiştir.

5.1 Başlangıç pH Faktörünün Biyogiderime Etkileri

Elde edilen bulgulara göre, en yüksek biyogiderim oranı 50 mg/L RB5 boya konsantrasyonunda %99,07 ile pH 5'te gerçekleşmiştir. Bu durum, düşük pH seviyelerinde maya hücre yüzeylerindeki yük dağılımının boyar madde ile elektrostatik etkileşimleri kolaylaştırmasıyla açıklanabilir. Benzer şekilde, Aksu (2005), pH'ın biyosorpsiyon süreçlerinde kritik bir parametre olduğunu ve düşük pH'ın özellikle aniyonik boyar maddelerin tutulmasında etkinliği artırdığını belirtmiştir. Aynı doğrultuda, Rousk vd. (2009) çalışmaları da mikrobiyal aktivitenin ve metal iyonlarının biyoyararlanımının ortam pH'ına güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir.

Başlangıç pH değeri, mikrobiyal büyüme ve giderim verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Karbon ve besin maddesinin varlığı gibi abiyotik faktörler de ortamın pH değerine ve metal çözünürlüğüne bağlıdır. (Rousk, Brookes ve Bååth 2009)

pH ve sıcaklık parametreleri açısından, bunların *S.cerevisiae* mayasının boya renk giderim performansı üzerindeki etkisi değerlendirildi. Şekil 4.3.1’de gösterildiği gibi maksimum boya giderim oranıyla 48 saatlik inkübasyondan sonra pH 5’te %99.07’ a ulaşmasına karşın güçlü asidik veya alkali pH koşullarında renk giderim verimliliğinde daha düşük oranlar gözlemlendi.

Hsueh ve Chen, asidik pH’ta boya renk gideriminin azalmasının büyük oranla boyanın kimyasal yapısında değişikliğe yol açan protonlanmış azo boyalarının oluşumundan kaynaklandığını bildirmişlerdir (Hsueh ve Chen, 2007) Ancak, *S.cerevisiae* tarafından RB5 renk giderimi, hem %54.56 maksimum boya giderme oranıyla asidik bir pH değerinde (pH 4) hem de %60.88 boya giderme oranıyla bazik bir pH değerinde (pH 7) gözlemlendi; bu, asidik ve bazik koşullarda azo boyalarının tedavisinde anlamlı olabilir. Bulguların Du ve ark. ile uyumlu olduğu görülmüştür. (Du ve ark. 2015)

Ceyhun ve ark. yaptığı çalışmada %4 NaCl (a/a) varlığında, başlangıç RB5 boya konsantrasyonu 50 mg/L olacak şekilde ve pH aralığı 3 ile 7 arasında değişen koşullarda *K. marxianus* tarafından yapılan biyogiderim incelenmiştir. Test edilen pH değerleri arasında benzer biyogiderim verimleri elde edilmiş olsa da, pH 6, *K. marxianus* için biyogiderim açısından daha uygun bulunmuştur çünkü en yüksek mikrobiyal büyüme bu pH değerinde gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre, *K. marxianus*, pH 6 ortamında RB5 boyasının %98.7’sini uzaklaştırmıştır.

5.2 Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Biyogiderim Üzerine Etkileri

Başlangıç boya konsantrasyonunun artışı, giderim veriminde azalma ile sonuçlanmıştır. Bu, biyosorbent olarak görev yapan maya hücre yüzeylerindeki bağlanma bölgelerinin sınırlı sayıda olması ile açıklanabilir. Çeşitli çalışmalarda da benzer şekilde, düşük

konsantrasyonlarda daha yüksek giderim oranları raporlanmış ve yüksek konsantrasyonlarda yüzey doygunluğuna bağlı verim düşüşü gözlemlenmiştir (Crini 2006; Forgacs 2004).

Boya birikiminin düzeyi, başlangıç pH değerine ve başlangıç boya konsantrasyonuna bağlı olarak değişmiştir. Maya biyokütlesi, pH 5 koşulunda RB5 'in giderimi için etkili bir biyoakümülyasyon sağlamıştır. Büyüme ortamındaki boya konsantrasyonunun 600 mg L⁻¹'ye kadar artırılması maya büyümesini ve aynı seviyede biyoremediasyon olaylarını baskılamış ve uzun bir gecikme (lag) süresine sebep olmuştur.

Ortamdaki boya düzeyinin artmasıyla birlikte lag süresinin de artışı, boya birikiminin temel nedeninin metabolik aktiviteye bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Metabolizmaların kendine özgü boya alımı, boya konsantrasyonu yükseldikçe belirli değerlere kadar yükselmiştir. Bu durum biyoakümülyasyon olayının mikroorganizma gelişimiyle paralel ilerlediğini göstermektedir.

Maya hücreleri tarafından gerçekleştirilen RB5 boya giderimi, önce hücre çevresine özgü olmayan fiziksel biyosorpsiyon, ardından hücre içinde kendine özgü akümülyasyon şeklinde gerçekleşmiştir.

Yang vd. (2003) yaptıkları biyoremediasyon çalışmalarında *Penicillium geastrivorus*'un bu

tezde de kullanılan Reactive Black 5 boyasını giderimini araştırmışlardır. Deneyde, *A. oryzae*, PDA'da geliştirildikten sonra toplanmıştır. Biyokütle, biyoremediasyon deneyleri

61 için, kültür besiyerinden filtrasyon ile ayrılarak otoklavlanmıştır. Başlangıç boya konsantrasyonunu 103.67 mg/L olduğu deneylerde 48 saatin sonunda %> 99 oranında boya giderim değerini bulmuşlardır.

5.3 Zirai Atıkların *Saccharomyces cerevisiae* Gelişimine Etkisi

Çalışmanın genel bulguları, *S. cerevisiae*'nin azo boyar madde gideriminde potansiyel bir biyosorbent olduğunu ortaya koymakla kalmayıp, bu tür biyolojik sistemlerin düşük maliyetli tarımsal atıklarla entegre edilmesinin de giderim performansını artırabileceğini göstermiştir. Literatürde pek çok çalışmada farklı mikroorganizmaların RB5 giderimi incelenmiş olsa da (*Pseudomonas putida*, *Trametes versicolor*, *Aspergillus niger* gibi), maya türleri üzerine yapılan çalışmalar nispeten sınırlıdır. Bu açıdan bakıldığında, bu çalışmanın maya tabanlı biyogiderim stratejilerine katkı sunduğu değerlendirilebilir.

Bunun yanı sıra, bu çalışmada maya gelişimini desteklemek amacıyla kullanılan havuç posasının önemli katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Tarımsal atıkların bu tür uygulamalarda kullanımı, yalnızca ekonomik avantaj sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe de katkı sunar. Havuç posası gibi lignoselülozik maddelerin mikrobiyal büyümeyi destekleyerek biyosorpsiyon kapasitesini artırabileceği, Benemann (2008) ve Zohri ve ark. (2021) tarafından da vurgulanmıştır. Bu yönüyle çalışmamız, zirai atıkların ikincil kullanımı açısından değerli bir örnek sunmaktadır.

5.4 Sonuç

Bu çalışmada, tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir azo boyar madde olan Reactive Black 5 (RB5)'in biyolojik yöntemlerle giderimi incelenmiştir. Biyosorbent olarak kullanılan *Saccharomyces cerevisiae* suşu, karbon ve enerji kaynağı olarak havuç posası ile desteklenmiş ortamda geliştirilmiştir. Farklı pH değerleri ve başlangıç boya konsantrasyonları altında yürütülen deneysel çalışmalar, bu maya türünün boyar madde gideriminde etkili bir tür olabileceğini göstermiştir.

Yapılan biyogiderim deneyleri sonucunda en yüksek boya giderimi $92,77 \pm 0,83$ oranıyla pH 5'te ve 103.67 mg/L başlangıç boya konsantrasyonunda elde edilmiştir. Bu koşullarda adsorpsiyon kapasitesi (q) 20,68 mg/g olarak hesaplanmıştır. Artan boya konsantrasyonunun giderim veriminde azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu

durum, biyosorbent yüzeylerinde mevcut bağlanma bölgelerinin sınırlı olmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Ayrıca, çalışmada havuç posasının düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir tarımsal atık olarak, maya gelişimini desteklediği ve biyogiderim kapasitesini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu bulgu, çevre dostu atık su arıtım teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; havuç posası gibi organik atıklarla zenginleştirilmiş *Saccharomyces cerevisiae* suşunun, RB5 boyar maddesinin gideriminde etkili bir biyolojik yöntem sunduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, bu yöntemin çevreye duyarlı, ekonomik ve uygulanabilir bir alternatif olabileceğini desteklemektedir. Bu açılarından sürdürülebilir bir boya giderim stratejisinin geliştirilebileceğini göstermektedir. Gerek adsorpsiyon kapasitesi gerekse sistemin sadeliği bakımından, bu yöntemin tekstil atıksularının arıtımında uygulanabilirliği oldukça yüksektir.

KAYNAKLAR

- Abdi, O. Kazemi, M., 2015. A review study of biosorption of heavy metals and comparison between different biosorbents. *J. Mater. Environ. Sci.* 6, 1386–1399.
- Abiri, F. Fallah, N., & Bonakdarpour, B. (2016). Sequential anaerobic–aerobic biological treatment of colored wastewaters: case study of a textile dyeing factory wastewater. *Water Science and Technology*, 75(6), 1261–1269. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.531>
- Affognon H, Mutungi C, Sanginga P, Borgemeister C. Unpacking Postharvest Losses in Sub-Saharan Africa: A Meta-Analysis. *World Dev* 2015;66:49–68.
- A.K. An, J. Guo, S. Jeong, E.J. Lee, S.A. Tabatabai, T.O. Leiknes, *Water Res.* 103 (2016) 362.
- Akpomie, K.G. Conradie, J., 2020. Advances in application of cotton-based adsorbents for heavy metals trapping, surface modifications and future perspectives. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 201, 110825.
- Aksu, Z. Donmez, G., 2003. A comparative study on the biosorption characteristics of some yeasts for Remazol Blue reactive dye. *Chemosphere* 50, 1075e1083. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00623-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00623-9).
- Aksu Z (2005) Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. *Process Biochem* 40:997–1026
- Aksu Z, Dönmez G. A comparative study on the biosorption characteristics of some yeast for Remazol blue reactive dye. *Chemosphere* 2003;50:1075–83.
- Aksu, Z., Tatlı, A. and. Tunç İ, Ö. 2008. A comparative adsorption/biosorption study of Acid Blue 161: Effect of temperature on equilibrium and kinetic parameters. *Chemical Engineering Journal*, 142(1); 23-39.
- Allen, S. and B. Koumanova, Decolourisation of water/wastewater using adsorption. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 2005. 40(3): p. 175-192.
- Ali, H. (2010) Biodegradation of Synthetic Dyes—A Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213, 251-273. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-010-0382-4>
- Ali S.S., Al-Tohamy, R., Koutra, E., Kornaros, M., Khalil, M., Elsamahy, T., El-Shetehy, M., Sun, J., 2021a. Coupling azo dye degradation and biodiesel production by manganese-dependent peroxidase producing oleaginous yeasts isolated from wood-feeding termite gut symbionts. *Biotechnol. Biofuels* 14 (1), 61.
- Ali, S.S, Al-Tohamy, R., Sun, J., 2022. Performance of *Meyerozyma caribbica* as a novel manganese peroxidase-producing yeast inhabiting wood-feeding termite gut symbionts for azo dye decolorization and detoxification. *Sci. Total Environ.* 806, 150665.
- Al-Obadi M, Ayad H, Pokharel S, Ayari MA. Perspectives on food waste management: Prevention and social innovations. *Sustain Prod Consump* 2022;31: 190–208.

- Al-Tohamy, R., Kenawy, E.R., Sun, J., Ali, S.S., 2020a. Performance of a newly isolated salt-tolerant yeast strain *Sterigmatomyces halophilus* SSA-1575 for azo dye decolorization and detoxification. *Front. Microbiol.* 11, 1163.
- Al-Tohamy, R., Sun, J., Fareed, M.F., Kenawy, E.R., Ali, S.S., 2020b. Ecofriendly biodegradation of Reactive Black 5 by newly isolated *Sterigmatomyces halophilus* SSA1575, valued for textile azo dye wastewater processing and detoxification. *Sci. Rep.* 10 (1), 1–16.
- Amalina, F., Razak, A. S. A., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications – A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>
- Ayed, L., Ladhari, N., Achour, S., Chaieb, K., 2020b. Decolorization of reactive yellow 174 dye in real textile wastewater by active consortium: experimental factorial design for bioremediation process optimization.
- Babu BR, Parande AK, Raghu S, Kumar TP. Cotton textile processing: waste generation and effluent treatment. *J Cotton Sci* 2007;11:141–53.
- Bankole, P.O. and Adekunle, A.A. 2017. Degradation of indigo dye by a newly isolated yeast, *Diutina rugosa* from dye wastewater polluted soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5); 4639-4648
- Bao, Y., Yang, B., Yang, R., Wang, J., Geng, A., Zhang, C., & Sun, Z. (2025). Regulation of microbial activity based on quorum sensing: Implications for biological wastewater treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 199, 106029. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2025.106029>
- Barnett, J. A. (2000). Commentary on a new major reference work *Yeasts: Characteristics and Identification*, 3rd edn. By J. A. Barnett, R. W. Payne and D. Yarrow. Cambridge University Press: Cambridge. 200.00, ix+1139 pp., 1376 photomicrographs by Linda Barnett. ISBN 0 521 57396 3. Published 25 May 2000. *Yeast*, 16(15), 1445–1447. [https://doi.org/10.1002/1097-0061\(200011\)16:15<1445::aid-yea639>3.0.co;2-0](https://doi.org/10.1002/1097-0061(200011)16:15<1445::aid-yea639>3.0.co;2-0)
- Barriuso, J., Hogan, D.A., Keshavarz, T., Martinez, M.J., 2018. Role of quorum sensing and chemical communication in fungal biotechnology and pathogenesis. *FEMS Microbiol. Rev.* 42 (5), 627–638. <http://10.1093/femsre/fuy022>.
- Bazrafshan E., Alipour M.R., Mahvi A.H. 2016. Textile wastewater treatment by application of combined chemical coagulation, electrocoagulation, and adsorption processes, *Desalination Water Treat.* 57 (20) 9203–9215.
- Bera S.P., Godhaniya M., Kothari C. 2021. Emerging and advanced membrane technology for wastewater treatment: a review, *J. Basic Microbiol.*
- Benkhaya S., El Harfi A. 2017. Design Of A New Layered Composite Membrane Based On A Physical Copolymer (PSU/PEI/PPc) Supported By A Tri-Component Support (PA6/Fiberglass/PA6) Application of Ultrafiltration Baths Based On Azoic and Antraquinonique Dyes, *Moroc. J. Chem.* 5 (1). 1–15.

- Benkhaya, S., M'rabet, S., El Harfi, A., 2020. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorg. Chem. Commun.* 115, 107891. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107891>.
- Bhargava, N., Bahadur, N., & Kansal, A. (2023). Techno-economic assessment of integrated photochemical AOPs for sustainable treatment of textile and dyeing wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104302. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104302>
- Bhatnagar A, Sillanpää M. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment: a review. *Chem Eng J* 2010;157:277–96.
- Bhatia D., Sharma N.R., Singh J., Kanwar R.S. 2017. Biological methods for textile dye removal from wastewater: a review, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 47 (19) 1836–1876.
- Brady, D., et al., 1994. Biosorption of heavy metal cations by non-viable yeast biomass. *Environ. Technol.* 15, 429–438.
- Cavka, A., Martín, C., Alriksson, B., Mörtzell, M., & Jönsson, L. J. (2015). Techno-economic evaluation of conditioning with sodium sulfite for bioethanol production from softwood. *Bioresource Technology*, 196, 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.051>
- Ceyhun, B. Ş., Ertuğrul Karatay, S., Demiray, E., & Dönmez, G. (2022). Reactive Black 5 bioremoval potential of newly isolated halotolerant *Kluyveromyces marxianus*. *Bioremediation Journal*, 28(2), 156–171. <https://doi.org/10.1080/10889868.2022.2144996>
- Chagas-Spinelli, A. and Kato, M.T. 2012. Bioremediation of a tropical clay soil contaminated with diesel oil. *Journal of Environmental Management*, 113; 510–516.
- Chakraborty, J.N. 2014. Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles. WPI, 29–45.
- Chandanshive, V., Kadam, S., Rane, N., Jeon, B.H., Jadhav, J., Govindwar, S., 2020. In situ textile wastewater treatment in high rate transpiration system furrows planted with aquatic macrophytes and floating phytobeds. *Chemosphere* 252, 126513.
- Chaplin B.P.. 2019. The prospect of electrochemical technologies advancing worldwide water treatment, *Acc. Chem. Res.* 52 (3) 596–604.
- Chen, T. Y., Kao, C. M., Hong, A., Lin, C. E., & Liang, S. H. (2009). Application of ozone on the decolorization of reactive dyes — Orange-13 and Blue-19. *Desalination*, 249(3), 1238–1242. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.10.032>
- Chen S, Luo J, Hu M, Geng P, Zhang Y (2012) Microbial detoxification of bifenthrin by a novel yeast and its potential for contaminated soils treatment. *PLoS One* 7:30862. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030862>

- Cheng, S.Y., et al., 2019. New prospects for modified algae in heavy metal adsorption. *Trends Biotechnol.* 37 (11), 1255–1268.
- Choi, M. H., & Park, Y. H. (2003). Production of yeast biomass using waste Chinese cabbage. *Biomass and Bioenergy*, 25(2), 221e226. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00194-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00194-0)
- Chon, K., Cho, J. and Shon, H.K. 2013. A pilot-scale hybrid municipal wastewater reclamation system using combined coagulation and disk filtration, ultrafiltration and reverse osmosis: Removal of nutrients and micropollutants and characterization of membrane foulants, *Biosource Technology*, 141, 109–116.
- Chojnacka, K., & Mikulewicz, M. (2014). Bioaccumulation. *Encyclopedia of Toxicology*, 456–460. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386454-3.01039-3>
- C.J. Cooksey, The synthetic dye industry: what's in a color? *Environ. Health Perspect.* 124 (10) (2016) A158–A163.
- Crini, G., Lichtfouse, E., 2019. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environ. Chem. Lett.* 17, 145–155
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L.D., Morin-Crini, N., 2018. Adsorption-oriented processes using conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Green Adsorbents for Pollutant Removal* 23–71.
- Cydzik-Kwiatkowska, A., & Zielińska, M. (2016). Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(4). <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2012-9>
- Dabrowski, A., Adsorption--from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2001. 93(1-3): p. 135.
- Dhankhar, R., Hooda, A., 2011. Fungal biosorption—an alternative to meet the challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions. *Environ. Technol.* 32, 467–491.
- Danouche, M., El Arroussi, H., & El Ghachtouli, N. (2021). Mycoremediation of synthetic dyes by yeast cells: a sustainable biodegradation approach. *Environmental Sustainability*, 1-18.
- Das D, Charumathi D, Das N (2010) Combined effects of sugarcane bagasse extract and synthetic dyes on the growth and bioaccumulation properties of *Pichia fermentans* MTCC 189. *J Hazard Mater* 183(1–3):497–505. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.051>.
- Das, A., Mishra, S., 2017. Removal of textile dye reactive green-19 using bacterial consortium: process optimization using response surface methodology and kinetics study. *J. Environ. Chem. Eng.* 5, 612e627. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.10.005>.
- Dave SR, Patel TL, Tipre DR (2015) Bacterial degradation of Azo Dye containing wastes. In: *Microbial degradation of synthetic dyes in wastewaters, environmental science and engineering* (Springer, or. 57–83). https://doi.org/10.1007/978-3-319-109428_3

- Dave, H., Ledwani, L., Nema, S.K., 2019. Nonthermal plasma: a promising green technology to improve environmental performance of textile industries. *The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology*. Wood head publishing, pp. 199–249
- Deeba F, Pruthi V, Negi YS (2018) Aromatic hydrocarbon biodegradation activates neutral lipid biosynthesis in oleaginous yeast. *Bioresour Technol* 255:273–280. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.096>
- Delgadillo-Mirquez, L., et al., 2016. Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. *Biotechnology Reports* 11, 18–26.
- Dellamatrice, P.M., Silva-Stenico, M.E., Moraes, L.A.B. de, Fiore, M.F., Monteiro, R.T.R., 2017. Degradation of textile dyes by cyanobacteria. *Braz. J. Microbiol.* 48, 25e31. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.09.012>.
- *Demain, A. L. (2007). REVIEWS: The business of biotechnology. *Industrial Biotechnology*, 3, 269–283. <https://doi.org/10.1089/ind.2007.3.2>
- Deopura, B.L., Padaki, N.V., 2015. Chapter 5: Synthetic textile fibres: polyamide, polyester and aramid fibres. In: Sinclair, R. (Ed.), *Textiles and Fashion*. Elsevier Science.
- *Dias, P. G. I., Sajiwanie, J. W. A., & Rathnayaka, R. M. U. S. K. (2020). Chemical composition, physicochemical and technological properties of selected fruit peels as a potential food source. *International Journal of Fruit Science*, 20, S240–S251. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1717402>
- Dil EA, Ghaedi M, Ghezelbash GR, Asfaram A (2017) Multi-responses optimization of simultaneous biosorption of cationic dyes by live yeast *Yarrowia lipolytica* 70562 from binary solution: Application of first order derivative spectrophotometry. *Ecotoxicol Environ Saf* 139:158–164. <https://doi.org/10.1016/j.ecoen v.2017.01.030>.
- Dos Santos, A. B., Cervantes, F. J., & van Lier, J. B. (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technology*, 98(12), 2369–2385. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.013>
- Dönmez, G. 2002. Bioaccumulation of the reactive textile dyes by *Candida tropicalis* growing in molasses medium. *Enzyme Microbial. Technol.*, 30; 363–366.
- Du, L.-N. et al. Efficient metabolism of the azo dye methyl orange by *Aeromonas* sp. strain DH-6: Characteristics and partial mechanism. *Int. Biodeter. Biodegr.* 105, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.08.019> (2015).
- Easwaran, S. N., Mohanakrishnan, A. S., Santharam, L., Adimoolam, S. R., & Mahadevan, S. (2022). Metabolic heat responses of *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* during Carboxypeptidase Y Enzyme production. *Process Biochemistry*, 112, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.11.015>

- Elgarahy, A.M., Elwakeel, K.Z., Mohammad, S.H., Elshoubaky, G.A., 2021. A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process. *Clean. Eng. Technol.* 4, 100209.
- Elisangela, F., Andrea, Z., Fabio, D. G., de Menezes Cristiano, R., Regina, D. L., & Artur, C. P. (2009). Biodegradation of textile azo dyes by a facultative *Staphylococcus arlettae* strain VN-11 using a sequential microaerophilic/aerobic process. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63(3), 280-288. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.10.003>
- Environmental Law Handbook (17th ed.). (2003). *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 4(4). <https://doi.org/10.1108/ijshe.2003.24904dae.001>
- Ertugrul S, Bakır M, Donmez G. Treatment of dye-rich wastewater by an immobilized thermophilic cyanobacterial strain: *Phormidium* sp. *Ecol Eng* 2008;32:244–8.
- Esvandi, Z., Foroutan, R., Peighambardoust, S. J., Akbari, A. & Ramavandi, B. Uptake of anionic and cationic dyes from water using natural clay and clay/starch/MnFe₂O₄ magnetic nanocomposite. *Surfac. Interfac.* 21, 100754 (2020).
- Faryal R, Hameed A. Isolation and characterization of various fungal strains from textile effluent for their use in bioremediation. *Pak J Bot* 2005;37:1003–8.
- Fairhead M, Thöny-Meyer L. Bacterial tyrosinases: old enzymes with new relevance to biotechnology. *New Biotechnol* 2012;29:183–91.
- Fazal, T., Ur, M.S., Xu, J., 2018. Bioremediation of textile wastewater and successive biodiesel production using microalgae. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 3107–3126.
- Flores, Y., Flores, R., Gallegos, A.A. 2008. Heterogeneous catalysis in the Fenton-type system reactive black 5/H₂O₂. *J. Mol. Catal. Chem.* 281, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2007.10.019>.
- Filipowicz N, Momotko M, Boczka G, Cieśliński H (2020) Determination of phenol biodegradation pathways in three psychrotolerant. *Enzyme Microb Technol J* 141:0141–0229. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2020.109663>
- Forgacs E, Cserhati T, Oros G. 2004. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environ Int*, 30(7): 953-971.
- Fonseca, G. G., Heinzle, E., Wittmann, C., & Gombert, A. K. (2008). The yeast *Kluyveromyces marxianus* and its biotechnological potential. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(3), 339–354. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1458-6>
- Franciscon, E., Zille, A., Fantinatti-Garboggini, F., Silva, I. S., Cavaco-Paulo, A., & Durrant, L. R. (2009). Microaerophilic-aerobic sequential decolourization/biodegradation of textile azo dyes by a facultative *Klebsiella* sp. strain VN-31. *Process Biochemistry*, 44(4), 446-452. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.12.009>

- Ghaedi, M., et al., 2013. *Saccharomyces cerevisiae* for the biosorption of basic dyes from binary component systems and the high order derivative spectrophotometric method for simultaneous analysis of Brilliant green and Methylene blue. *J. Ind. Eng. Chem.* 19, 227–233.
- Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Nayak, A., & Agarwal, S. (2012). Chemical treatment technologies for waste-water recycling—an overview. *RSC advances*, 2(16), 6380-6388
- Gupta, P.L., Lee, S.-M., Choi, H.-J., 2016. Integration of microalgal cultivation system for wastewater remediation and sustainable biomass production. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 32, 139.
- Gül, Ü. D. (2018). Bioremediation of Dyes in Textile Wastewater. *Turkish Journal of Scientific Reviews*, 11(2), 24-28.
- Gül Ü.D., Taştan B.E., Bayazıt G.2019. Assessment of algal biomasses having different cell structures for biosorption properties of acid red P-2BX dye, *South African Journal of Botany*, Volume 127, Pages 147-152, ISSN 0254-6299.
- Gomes, A. C., Fernandes, L. R., & Simões, R. M. S. (2012). Oxidation rates of two textile dyes by ozone: Effect of pH and competitive kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 189–190, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.051>
- Gönen F, Aksu Z (2009) Predictive expressions of growth and Remazol Turquoise Blue-G reactive dye bioaccumulation properties of *Candida utilis*. *Enzyme Microb Technol* 45(1):15–21. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.03.006>
- Gözmen, B., Kayan, B., Gizir, A. M., & Hesenov, A. (2009). Oxidative degradations of reactive blue 4 dye by different advanced oxidation methods. *Journal of Hazardous Materials*, 168(1), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.011>
- Gousia Qadir. Yeast a magical microorganism in the wastewater treatment. *J Pharmacogn Phytochem* 2019;8(4):1498-1500.
- Hajivandi, A., Farjadfard, S., Ramavandi, B., & Akbarzadeh, S. (2016). Experimental data for synthesis of bi-metalized chitosan particle for attenuating of an azo dye from wastewater. *Data in Brief*, 7, 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2016.01.066>
- Han Y, Tang Z, Bao H, Wu D, Deng X (2019) Degradation of pendimethalin by the yeast YC2 and determination of its two main metabolites {. *RSC Adv* 9:491–497. <https://doi.org/10.1039/c8ra07872f>
- Hayes, S. and McLoughlin, J. 2013. The sewing of textiles”, in Jones, I. and Stylios, G.K. (Eds), *Joining Textiles Principles and Applications*, Woodhead Publishing Series in Textiles, No. 110.
- Hidrovo, A., Luek, J. L., Antonellis, C., Malley, J. P., & Mouser, P. J. (2022). The fate and removal of pharmaceuticals and personal care products within wastewater treatment facilities discharging to the Great Bay Estuary. *Water Environment Research*, 94(1). Portico. <https://doi.org/10.1002/wer.1680>
- Hunger, K. (Ed.). (2007). *Industrial dyes: chemistry, properties, applications*. John Wiley & Sons.

- Hoehn, D., Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Margallo, M., Laso, J., Fernández-Ríos, A., Ruiz-Salmón, I., & Aldaco, R. (2023). A critical review on food loss and waste quantification approaches: Is there a need to develop alternatives beyond the currently widespread pathways? *Resources, Conservation and Recycling*, 188, Article 106671. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106671>
- Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pinjari, D.V., Mahamuni, N.M., Pandit, A.B., 2016. A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. *J. Environ. Manag.* 182, 351–366.
- Hongrui Xiang, Xiaobo Min, Chong-Jian Tang, Mika Sillanpää, Feiping Zhao. 2022. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 49, 2022, 103023, ISSN 2214-7144.
- Hsueh, C.-C. & Chen, B.-Y. Comparative study on reaction selectivity of azo dye decolorization by *Pseudomonas luteola*. *J. Hazard. Mater.* 141, 842–849. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.056> (2007).
- Hsueh, C.C. Chen, B.Y. and Yen, C.Y. (2009) Understanding Effects of Chemical Structure on Azo Dye Decolorization Characteristics by *Aeromonas Hydrophila*. *Journal of Hazardous Materials*, 167, 995-1001. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.077>
- Ihsanullah, I., Jamal, A., Ilyas, M., Zubair, M., Khan, G., & Atieh, M. A. (2020). Bioremediation of dyes: Current status and prospects. *Içinde Journal of Water Process Engineering (C. 38)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101680>
- Ilaria Berruti, Samira Nahim-Granados, María Jesús Abeledo-Lameiro, Isabel Oller, María Inmaculada Polo-López. 2022. Recent advances in solar photochemical processes for water and wastewater disinfection, *Chemical Engineering Journal Advances*, Volume 10.
- Inoue, K., et al., 2017. Biosorbents for removing hazardous metals and metalloids. *Materials* 10, 857.
- Isia I, Hadibarata T, Sari AA, Al Khulaifi MM (2019) Potential use of a pathogenic yeast *Pichia kluyveri* FM012 for degradation of dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT). *Water Air Soil Pollut* 230:1–11
- Iwuozor, K. O., Peter Oyekunle, I., Chizitere Emenike, E., Okoye-Anigbogu, S. M., Mayowa Ibitogbe, E., Elemile, O., Ighalo, J. O., & George Adeniyi, A. (2022). An overview of equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for the sequestration of Maxilon dyes. *Cleaner Materials*, 6, 100148. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100148>
- Jadhav, J. P., Parshetti, G. K., Kalme, S. D., & Govindwar, S. P. (2007). Decolourization of azo dye methyl red by *Saccharomyces cerevisiae* MTCC 463. *Chemosphere*, 68(2), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.087>
- Jadhav, J. P., Parshetti, G. K., Kalme, S. D., & Govindwar, S. P. (2007). Decolourization of azo dye methyl red by *Saccharomyces cerevisiae* MTCC 463. *Chemosphere*, 68(2), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.087>

- Jafari, N., Soudi, M.R. & Kasra-Kermanshahi, R. Biodegradation perspectives of azo dyes by yeasts. *Microbiology* 83, 484–497 (2014). <https://doi.org/10.1134/S0026261714050130>
- Jager, D., Kupka, D., Vaclavikova, M., Ivanicova, L., & Gallios, G. (2018). Degradation of Reactive Black 5 by electrochemical oxidation. *Chemosphere*, 190, 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.126>
- Jeswani HK, Figueroa-Torres G, Azapagic A. The extent of food waste generation in the UK and its environmental impacts. *Sustain Prod Consump* 2021;26:532–47.
- J.N. Chakraborty, 18 - Dyeing with disperse dye, Editor(s): J.N. Chakraborty, *Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles*, Woodhead Publishing India, 2010, Pages 192–201, ISBN9781845697884
- J.N. Chakraborty, in *Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles*, 2010
- Johnson EA, Echavarri-erasun C (2011) Yeast biotechnology. In: *The yeasts*. Elsevier B.V, pp 21–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52149-1.00003-3>
- Jones RE, Speight RE, Blinco JL, O'Hara IM. Biorefining within food loss and waste frameworks: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;154:111781.
- Joshi' M. , R Bansal & R Purwar, Department of Textile Technology, Indian Institute of Technology, New Delhi 110 016, India, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, Vol. 29, June 2004, pp. 239–259
- Jones, I., & Stylios, G. K. (2013). *Joining textiles: Principles and applications*. Cambridge:Woodhead Publishing.
- J. Wang, L. Qin, J. Lin, J. Zhu, Y. Zhang, J. Liu, B.V. Bruggen, *Chem. Eng. J.* 323 (2017) 56.
- Kalyani, D.C., Telke, A.A., Dhanve, R.S., Jadhav, J.P., 2009. Ecofriendly biodegradation and detoxification of Reactive Red 2 textile dye by newly isolated *Pseudomonas* sp. SUK1. *J. Hazard. Mater.* 163, 735e742. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.020>.
- Kaiqi Xiao, Kaichong Wang, Siqi Yu, Yao Yuan, Yangjie Qin, Ying An, Xiaodan Zhao, Zhen Zhou. 2023. Membrane fouling behavior in membrane bioreactors for nitrogen-deficient wastewater pretreated by ammonium ion exchange, *Journal of Membrane Science*, Volume 665, , 121087, ISSN 0376-7388.
- Kakuta, T., Aoki, F., Okada, T., Shindo, H., Yoshizawa, K., Koizumi, T., & Nojima, K. (1998). Purification and Properties of Two Different Azoreductases from a Yeast *Candida curvata* AN723. *Sen'i Gakkaishi*, 54(1), 18–25. <https://doi.org/10.2115/fiber.54.18>
- Kanamarlapudi, S., et al., 2018. Application of Biosorption for Removal of Heavy Metals from Wastewater.
- Kant, R., 2012. Textile dyeing industry an environmental hazard. *Nat. Sci.* 4, 22e26. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.41004>.

- Kaushik, P., & Malik, A. (2009). Fungal dye decolourization: Recent advances and future potential. *Environment International*, 35(1), 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.05.010>
- Karim, A., Gerliani, N., & Aider, M. (2020). *Kluyveromyces marxianus*: An emerging yeast cell factory for applications in food and biotechnology. *International Journal of Food Microbiology*, 333, 108818. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108818>
- Kavčiček, M., Stražar, M., Curk, T., Natter, K., & Petrovič, U. (2015). Yeast as a cell factory: Current state and perspectives. *Microbial Cell Factories*, 14, 94. <https://doi.org/10.1186/s12934-015-0281-x>
- Kaykıoğlu, G., Debik, E., 2006, Color Removal from textile wastewater with anaerobic treatment processes, *Sigma*, 2006/4, 59-68.
- 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>
- Khan, M. K. I., Asif, M., Razzaq, Z. U., Nazir, A., & Maan, A. A. (2022). Sustainable food industrial waste management through single cell protein production and characterization of protein enriched bread. *Food Bioscience*, 46, Article 101406. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101406>
- Khan, M.I., Shin, J.H., Kim, J.D., 2018. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microb. Cell Factories* 17 (1), 1–21.
- Kishor R., Alma R., Satarale G.D., Ferreira L.F.R., Bilal M., Chandra R., Bharagava R.N.2021. Tekstil endüstrisi atık sularının kalıcı renklendirici kirleticilerinin ekotoksikolojik ve sağlık sorunları ve çevre güvenliği için arıtma yaklaşımları. *J.Çevre. Kimya Müh*, 9.
- Kodal, S.P. and Aksu, Z. 2017. Cationic surfactant-modified biosorption of anionic dyes by dried *Rhizopus arrhizus*, *Environmental Technology*, 38(20); 2551-256.
- Kruckeberg, A. The hexose transporter family of *Saccharomyces cerevisiae*. *Arch Microbiol* 166, 283–292 (1996). <https://doi.org/10.1007/s002030050385>
- Kuberan T, Anburaj J, Sundaravadivelan C, Kumar P. Biodegradation of azo dye by *Listeria* sp. *Int J Environ Sci* 2011;1:1760–70.
- Kucharska K, Wachowska U, Czaplicki S (2020) Wheat phyllosphere yeasts degrade propiconazole. *BMC Microbiol* 20:1–14.<https://doi.org/10.1186/s12866-020-01885-6>
- Kunz, A., Peralta-Zamora, P., Moraes, S.G. de, Duran, N., 2002. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Quim. Nova* 25, 78e82. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000100014>.

- Kurbanova R, Mirzaoglu R, Ahmedova G, Şeker R, Özcan E. 1998. Boya ve tekstil kimyası ve teknolojisi. Selçuk Üniversitesi Fen- Edebiyat Fakültesi Yayınları, Konya, Türkiye, pp: 117-122.
- Kuruloğlu, H.E., 2006, *Aspergillus oryzae* ile procion blau boyar maddesinin renk giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Kurtzman, C. P., & Fell, J. W. (1998). Preface. *The Yeasts*, v. <https://doi.org/10.1016/b978-044481312-1/50000-9>
- Kutty SN, Philip R (2008) Marine yeasts—a review. *Yeast* 465–483. <https://doi.org/10.1002/yea>
- Mahmoud MS (2016) Decolorization of certain reactive dye from aqueous solution using Baker’s yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) strain. *HBRC J* 12:88–98. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.07.005>
- Kwon, D., Kim, Y., Choi, D., Tsang, Y. F., Jung, S., & Kwon, E. E. (2024). Optimizing carrot pulp waste valorization via thermochemical conversion using carbon dioxide. *Fuel*, 369, 131799. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131799>
- Lage, S., Toffolo, A., Gentili, F.G., 2021. Microalgal growth, nitrogen uptake and storage, and dissolved oxygen production in a polyculture based-open pond fed with municipal wastewater in northern Sweden. *Chemosphere* 276, 130122.
- Lane, M. M., & Morrissey, J. P. (2010). *Kluyveromyces marxianus*: A yeast emerging from its sister’s shadow. *Fungal Biology Reviews*, 24(1–2), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2010.01.001>
- Li, Z., Wei, T., Pan, J., Liang, Y., Ban, Z., Ke, X., Kong, Q., Qiu, G., Hu, Y., Preis, S., & Wei, C. (2023). Physicochemical pre- and post-treatment of coking wastewater combined for energy recovery and reduced environmental risk. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130802. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130802>
- Li, X., Ouyang, J., Xu, Y., Chen, M., Song, X., Yong, Q., & Yu, S. (2009). Optimization of culture conditions for production of yeast biomass using bamboo wastewater by response surface methodology. *Bioresource Technology*, 100(14), 3613e3617. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.001>
- López-Alvarez, A., Díaz-Pérez, A. L., Sosa-Aguirre, C., Macías-Rodríguez, L., & Campos-García, J. (2012). Ethanol yield and volatile compound content in fermentation of agave must by *Kluyveromyces marxianus* UMPe-1 comparing with *Saccharomyces cerevisiae* baker’s yeast used in tequila production. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 113(5), 614–618. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2011.12.015>
- Lucas, M. S., Amaral, C., Sampaio, A., Peres, J. A., & Dias, A. A. (2006). Biodegradation of the diazo dye Reactive Black 5 by a wild isolate of *Candida oleophila*. *Enzyme and Microbial Technology*, 39(1), 51–55. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.09.004>

- Mahmoud MS (2016) Decolorization of certain reactive dye from aqueous solution using Baker's Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) strain. HBRC J 12(1):88–98. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.07.005>
- Malke, H. (1988). P. Singleton and D. Sainsbury, Dictionary of Microbiology and Molecular Biology, Second Edition. XII + 1019 S., mit zahlreichen Abb. und Tab. Chichester—New York—Brisbane—Toronto—Singapore 1987. John Wiley and Sons. £ 69.00. ISBN: 0-471-91114-3. Journal of Basic Microbiology, 28(7), 470–470. Portico. <https://doi.org/10.1002/jobm.3620280712>
- M. Martinez-Porchas, L.R. Martinez-Cordova, J.A. Lopez-Elias, M.A. PorchasCornejo. 2014. Bioremediation of aquaculture effluents, in: Microbial Biodegradation and Bioremediation, Elsevier, pp. 539e55.
- Martorell, M.M., Pajot, H.F., Ahmed, P.M., de Figueroa, L.I.C., 2017. Biodecoloration of Reactive Black 5 by the methylotrophic yeast *Candida boidinii* MM 4035. J. Environ. Sci. (China) 53, 78e87. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.01.033>.
- Martorell MM, del Rosales SoroPajot MHF, de Figueroa LIC (2018) Optimization and mechanisms for biodecoloration of a mixture of dyes by *Trichosporon akiyoshidainum* HP 2023. Environ Technol (UK) 39(24):3169–3180. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1375024>
- Martorell MM, Pajot HF, de Figueroa LIC. Dye-decolourizing yeasts isolated from Las Yungas rainforest Dye assimilation and removal used as selection criteria. Int Biodeter Biodegr 2012;66:25–32.
- Mattanovich, D., Sauer, M., & Gasser, B. (2014). Yeast biotechnology: Teaching the old dog new tricks. Microbial Cell Factories, 13, 34. <https://doi.org/10.1186/1475-285913-34>
- Maulin P. Shah, Chapter 6 - Bioremediation of Azo Dye, Editor(s): Maulin P. Shah, Susana Rodriguez-Couto, Microbial Wastewater Treatment, Elsevier, 2019, Pages 103-126, ISBN 9780128168097, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816809-7.00006-3>.
- Maximo C, Amorim MTP, Costa-Ferreira M. 2003. Biotransformation of industrial reactive azo dyes by *Geotrichum* sp. CCM1 1019. Enzyme Microb Technol, 32: 145- 151.
- Mazumber, D., 2011. Process evaluation and treatability study of wastewater in a textile dyeing industry. Int. J. Energy Environ. 2, 1053e1066.
- McMullan G, Meehan C, Conneely A, Kirby N, Robinson
- M. Celebi, M. Altikatoglu, Z. M. Akdeste, and H. Yildirim, “Determination of decolorization properties of Reactive Blue 19 dye using Horseradish Peroxidase enzyme,” Horseradish Peroksidaz enzimi Kullan. React. Blue 19 boyasi{dotless}ni{dotless}n renk giderilmesinin belirlenmesi, vol. 38, pp. 200–206, 2013.
- M. Celebi, Tekstil Atık Sularında Boyaların Biyobozunma ile Giderilmesi. 2013.

- Meehan, C., Banat, I. M., McMullan, G., Nigam, P., Smyth, F., & Marchant, R. (2000). Decolorization of Remazol Black-B using a thermotolerant yeast, *Kluyveromyces marxianus* IMB3. *Environment International*, 26(1–2), 75–79. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(00\)00084-2](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(00)00084-2)
- Mendes, M., Cassoni, A. C., Alves, S., Moreira, P., Castro, P. ML., & Pintado, M. E. (2023). Assessment of drying conditions for storage of a yeast-based decolorization solution for application in textile industrial wastewater treatment plants. *Fungal Biology*, 127(7–8), 1111–1117. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2023.06.002>
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>
- Mudhoo, A., Ramasamy, D.L., Bhatnagar, A., Usman, M., Sillanpää, M., 2020. An analysis of the versatility and effectiveness of composts for sequestering heavy metal ions, dyes and xenobiotics from soils and aqueous milieus. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 197, 110587.
- Muniasamy, A., Sivaporul, G., Gopinath, A., Lakshmanan, R., Altaee, A., Achary, A., Chellam, P.V. 2020. Process development for the degradation of textile azo dyes (mono-, di-, poly-) by advanced oxidation process-ozonation: Experimental partial derivative modelling approach. *J. Environ. Manage.* 265, 110397.
- Mutlu, H. 2020. Remazol Turuncu RGB ve İndosol Siyah NF-1200 boyar maddelerinin kefir biyokütlesi ile sonikasyon destekli biyosorpsiyonu. Yüksek lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Mustafa, T.Y., Tushar, K.S., Sharmeen, A. and Ang, H.M. 2014. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209; 172-184.
- Mohd Azhar, S. H., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Mohd Faik, A. A., & Rodrigues, K. F. (2017). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 10, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>
- Mohiuddin, O., P. Harvey, A., Orta Ledesma, M. T., & Velasquez-Orta, S. (2024). Bioremediation of waste by yeast strains. *Electronic Journal of Biotechnology*, 69, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2024.01.005>
- Mohiuddin, O., Harvey, A. P., Tabraiz, S., Ameen, M. T., & Velasquez-Orta, S. (2022). Kinetic modelling of yeast growth and pollutant removal in secondary effluent. *Journal of Water Process Engineering*, 50, 103244. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103244>
- Nawarkar, V.D. Salkar. 2019. Solar powered. Electrocoagulation system for municipal wastewater treatment, *Fuel*, 237, 222-226.

- Ubando, A. T., Felix, C. B., & Chen, W. H. (2020). Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 299, Article 122585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>
- Ochando-Pulido, J. M., Pimentel-Moral, S., Verardo, V., & Martinez-Ferez, A. (2017). A focus on advanced physico-chemical processes for olive mill wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 179, 161174.
- O'Connor, J., Hoang, S. A., Bradney, L., Dutta, S., Xiong, X., Tsang, D. C. W., Ramadass, K., Vinu, A., Kirkham, M. B., & Bolan, N. S. (2021). A review on the valorisation of food waste as a nutrient source and soil amendment. *Environmental Pollution*, 272, Article 115985. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115985>
- Ojha S, Bußler S, Schlüter OK. Food waste valorisation and circular economy concepts in insect production and processing. *Waste Manag* 2020;118:600–9
- Oliveira, R., Silva, R. M., Castro, A. R., Rodrigues, L. R., & Pereira, M. A. (2023). Biological processes and the use of microorganisms in oily wastewater treatment. *Advanced Technologies in Wastewater Treatment*, 257–288. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99916-8.00016-x>
- Olisah, C., Adams, J.B., Rubidge, G., 2021. The state of persistent organic pollutants in South African estuaries: A review of environmental exposure and sources. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 219, 112316.
- O'Neill, C., Hawkes, F. R., Hawkes, D. L., Lourenço, N. D., Pinheiro, H. M., & Delée, W. (1999). Colour in textile effluents - sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 74(11), 1009–1018. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4660\(199911\)74:11<1009::aid-jctb153>3.0.co;2-n](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4660(199911)74:11<1009::aid-jctb153>3.0.co;2-n)
- Pan, Y., Yu, S.S., Xiao, Z.C., Min, Y., Tian, T., Zheng, Y.M., Zhao, Q.B., Yuan, Z.H., Yu, H. Q., 2023. Re-evaluation and modification of dehydrogenase activity tests in assessing microbial activity for wastewater treatment plant operation. *Water Res.* 246, 120737. <http://10.1016/j.watres.2023.120737>.
- Pandey A, Singh P, Iyengar L (2007) Bacterial decolorization and degradation of azo dyes. *Int Biodeterior Biodegrad* 59(2):73–84. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.08.006>
- Patel, A., Arkatkar, A., Singh, S., Rabbani, A., Medina, J. D. S., Ong, E. S., . . . Mungray, A. K. (2021). Physico-chemical and biological treatment strategies for converting municipal wastewater and its residue to resources. *Chemosphere*, 282, 130881.
- Patil, R., Zahid, M., Govindwar, S., Khandare, R., Vyavahare, G., Gurav, R., Desai, N., Pandit, S., Jadhav, J., 2022. Constructed wetland: a promising technology for the treatment of hazardous textile dyes and effluent. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes*. Elsevier, pp. 173–198.
- Patil, P. S., & Sekar, N. (2025). Photostable thiophene-based heterocyclic azo dyes: Synthesis, characterization, photophysical analysis, dyeing study, fastness,

- UPF, thermal stability, and antibacterial activity. *Journal of Molecular Liquids*, 126997. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.126997>
- Pavithra, K.G., P, S.K., V, J., P, S.R., 2019. Removal of colorants from wastewater: a review on sources and treatment strategies. *J. Ind. Eng. Chem.* 75, 1e19.
- Paz, A., Carballo, J., Perez, M.J., Domínguez, J.M., 2017. Biological treatment of model dyes and textile wastewaters. *Chemosphere* 181, 168e177. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.046>.
- Perpetuini, G., Tittarelli, F., Battistelli, N., Suzzi, G., & Tofalo, R. (2020). γ -aminobutyric acid production by *Kluyveromyces marxianus* strains. *Journal of Applied Microbiology*, 129(6), 1609–1619. Portico. <https://doi.org/10.1111/jam.14736>
- Prasad ASA, Kumar G, Thomas DM. Microbial Decolorization of Azo Dyes—a Mini Review. *Chem Pharm Bull* 2017;1:30–39.
- Ramalho, P. A., Paiva, S., Cavaco-Paulo, A., Casal, M., Cardoso, M. H., & Ramalho, M. T. (2005). Azo Reductase Activity of Intact *Saccharomyces cerevisiae* Cells Is Dependent on the Fre1p Component of Plasma Membrane Ferric Reductase. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(7), 3882–3888. <https://doi.org/10.1128/aem.71.7.3882-3888.2005>
- Rana, S., Handa, S., Aggarwal, Y., Puri, S., & Chatterjee, M. (2023). Role of *Candida* in the bioremediation of pollutants: a review. *Letters in Applied Microbiology*, 76(9). <https://doi.org/10.1093/lambio/ovad103>
- Rashid, A., et al., 2016. Fungal biomass composite with bentonite efficiency for nickel and zinc adsorption: a mechanistic study. *Ecol. Eng.* 91, 459–471
- R.B. Chavan, in *Handbook of Textile and Industrial Dyeing*, 2011
- R.B. Chavan, 16 - Environmentally friendly dyes, Editor(s): M. Clark, In *Woodhead Publishing Series in Textiles, Handbook of Textile and Industrial Dyeing*, Woodhead Publishing, Volume 1, 2011, Pages 515-561, ISBN 9781845696955, <https://doi.org/10.1533/9780857093974.2.515>.
- Ribeiro, J. P., & Nunes, M. I. (2021). Recent trends and developments in Fenton processes for industrial wastewater treatment—A critical review. *Environmental Research*, 197, 110957.
- Robinson T, McMullan G, Marchant R et al (2001) Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresour Technol* 77:247–255
- Roşu CM, Vochiţa G, Mihăşan M, Avădanei M, Mihai CT, Gherghel D (2019) Performances of *Pichia kudriavzevii* in decolorization, biodegradation, and detoxification of C.I. Basic Blue 41 under optimized cultural conditions. *Environ Sci Pollut Res* 26(1):431–445. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3651-1>
- Rubeena KK., Hari Prasad Reddy P., Laiju AR, Nidheesh PV. 2018. Asit kırmızı 1 boyasının bozunması için heterojen Fenton katalizörü olarak demir emdirilmiş biyokömürler *J. Çevre. Yönet*, 226, s. 320 – 328.

- Rusu, L., et al., 2021. Eco-friendly biosorbents based on microbial biomass and natural polymers: synthesis, characterization and application for the removal of drugs and dyes from aqueous solutions. *Materials* 14, 4810.
- Sadaf, S., Bhatti, H. N., Ali, S., & Rehman, K. (2014). Removal of Indosol Turquoise FBL dye from aqueous solution by bagasse, a low cost agricultural waste: batch and column study. *Desalination and Water Treatment*, 52(1–3), 184–198. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.780985>
- Safarik I, Rego LFT, Borovska M, Mosiniewicz-Szablewska E, Weyda F, Safarikova M. New magnetically responsive yeast-based biosorbent for the efficient removal of water-soluble dyes. *Enzyme Microbiol Technol* 2007;40:1551–6.
- Sánchez-Arévalo, C. M., García-Suarez, L., Camilleri-Rumbau, M. S., Vogel, J., Álvarez-Blanco, S., Cuartas-Urbe, B., & Vincent-Vela, M. C. (2024). Treatment of industrial textile wastewater by means of forward osmosis aiming to recover dyes and clean water. *Heliyon*, 10(23), e40742. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40742>.
- Santos, B.A. P.d., et al., 2019. Baker's yeast-MnO₂ composites as biosorbent for Malachite green: an ecofriendly approach for dye removal from aqueous solution. *Rev. Ambient. 'Água*. 14, 1–15.
- Saratale, R.G., Saratale, G.D., Chang, J.S., Govindwar, S.P., 2011. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 42, 138e157. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006>.
- Saritha, V., Srinivas, N., & Srikanth Vuppala, N. V. (2017). Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. *Applied Water Science*, 7, 451460.
- Savin II, Butnaru R. Wastewater characteristics in textile finishing mills. *Environ EngManage J* 2008;7:859–64.
- Schneider, T., Graeff-Hönninger, S., French, W. T., Hernandez, R., Merkt, N., Claupein, W., Hetrick, M., & Pham, P. (2013). Lipid and carotenoid production by oleaginous red yeast 368 *Advances in Yeast Biotechnology for Biofuels and Sustainability Rhodotorula glutinis* cultivated on brewery effluents. *Energy*, 61, 34e43. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.026>
- Sekoai, P. T., Chunilall, V., Sithole, B., Habimana, O., Ndlovu, S., Ezeokoli, O. T., Sharma, P., & Yoro, K. O. (2022). Elucidating the role of biofilm-forming microbial communities in fermentative biohydrogen process: An overview. *Microorganisms*, 10, 1924. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10101924>
- Sekoai, P. T., Ghimire, A., Ezeokoli, O. T., Rao, S., Ngan, W. Y., Habimana, O., Yao, Y., Yang, P., Fung, A. H. Y., Yoro, K. O., Daramola, M. O., & Hung, C. H. (2021). Valorization of volatile fatty acids from the dark fermentation waste Streams- A promising pathway for a biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, Article 110971. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110971>

- Sen, S. K., Raut, S., Bandyopadhyay, P., & Raut, S. (2016). Fungal decolouration and degradation of azo dyes: A review. *Fungal Biology Reviews*, 30(3), 112–133. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2016.06.003>
- Senthil Rathi, B., Senthil Kumar, P., 2022. Sustainable approach on the biodegradation of azo dyes: a short review. *Curr. Opinion Green Sustain. Chem.* 33, 100578.
- Sekar, N. (n.d.). 12 Direct dyes. *Handbook of Textile and Industrial Dyeing*, 425–445. <https://doi.org/10.1533/9780857093974.425>
- Senthilkumar, S., Perumalsamy, M., & Janardhana Prabhu, H. (2014). Decolourization potential of white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* on synthetic dye bath effluent containing Amido black 10B. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18(6), 845–853. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2011.10.010>
- Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. J. C. O. I. E. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 22, 154169.
- Shailendra Yadav, Kanha Singh Tiwari, Chitrasen Gupta, Mahendra Kumar Tiwari, Arbaj Khan, Sankatha P. Sonkar, A brief review on natural dyes, pigments: Recent advances and future perspectives, *Results in Chemistry*, Volume 5, 2023, 100733, ISSN 2211-7156, <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100733>.
- Sharma, B. and Dangi, A.K. 2018. Contemporary enzyme based technologies for bioremediation: A review. *Journal of Environmental Management*, Volume 210, 15 March 2018 Pages 10-22.
- Silva, A.C., Silvestre, A.J., Freire, C.S., Vilela, C., 2021. Modification of textiles for functional applications. *Fundamentals of Natural Fibres and Textiles*. Woodhead Publishing, pp. 303–365.
- Singh, K., Kumar, P., Srivastava, R., 2017, an overview of textile dyes and their removal, Department of Botany, Udai Pratap Autonomous College, Varanasi, U.P., India, Institute of Environment & Sustainable Development, Rajiv Gandhi South Campus, Banaras Hindu University, RGSC Mirzapur, India.
- Singh A, Singhanian RR, Soam S, Chen C-W, Halder D, Varjani S, et al. Production of bioethanol from food waste: Status and perspectives. *Bioresour Technol* 2022;360:127651.
- Sinha, A., Lulu, S., S., V., Banerjee, S., Acharjee, S., & Osborne, W. J. (2018). Degradation of reactive green dye and textile effluent by *Candida* sp. VITJASS isolated from wetland paddy rhizosphere soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 5150–5159. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.004>
- Sinha, S., Singh, R., Chaurasia, A.K., Nigam, S., 2016. Self-sustainable *Chlorella pyrenoidosa* strain NCIM 2738 based photobioreactor for removal of direct red31 dye along with other industrial pollutants to improve the water-quality. *J. Hazard Mater.* 306, 386–394.
- Soares EV, Soares HMVM (2012) Bioremediation of industrial effluents containing heavy metals using brewing cells of *Saccharomyces cerevisiae* as a green

- technology: a review. *Environ Sci Pollut Res* 19(4):1066–1083. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0671-5>
- Song, M., et al., 2019. Simultaneous adsorption of Cd²⁺ and methylene blue from aqueous solution using xanthate-modified baker's yeast. *Kor. J. Chem. Eng.* 36, 869–879.
- Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, Wiebe K, Bodirsky BL, Lassaletta L, et al. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 2018;562 (7728):519–25.
- Sreedevi, P. R., Suresh, K., & Jiang, G. (2022). Bacterial bioremediation of heavy metals in wastewater: A review of processes and applications. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102884. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102884>
- Srinivasan, S. V., Rema, T., Chitra, K., Sri Balakameswari, K., Suthanthararajan, R., Uma Maheswari, B., Ravindranath, E., & Rajamani, S. (2009). Decolourisation of leather dye by ozonation. *Desalination*, 235(1–3), 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.032>
- Srinivasan A, Viraraghavan T. Decolorization of dye wastewaters by biosorbents: a review. *J Environ Manage* 2010;91:1915–29.
- States U, States U (2011) Biodegradation and mineralization of metolachlor and alachlor by *Candida xestobii*. *J Agric Food Chem* 619–627. <https://doi.org/10.1021/jf103508w>
- Stabnikova, O., Wang, J.-Y., Bo Ding, H., & Joo-HwaTay. (2005). Biotransformation of vegetable and fruit processing wastes into yeast biomass enriched with selenium. *Bioresource Technology*, 96(6), 747e751. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.022>
- Stepchenkova, E.I., et al., 2023. Practical approaches for the yeast *Saccharomyces cerevisiae* genome modification. *Int. J. Mol. Sci.* 24, 11960
- Sudha, M., Saranya, A., Selvakumar, G., & Sivakumar, N. (2014). Microbial degradation of azo dyes: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(2), 670-690.
- Tan L, Xu B, Hao J, Wang J, Shao Y, Mu G (2019) Biodegradation and detoxification of azo dyes by a newly isolated halotolerant yeast *Candida tropicalis* SYF-1. *Environ Eng Sci* 36:999–1010. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0485>
- Tang, S., Gong, J., Song, B., Li, J., Cao, W., Zhao, J., 2024. Co-influence of biochar-supported effective microorganisms and seasonal changes on dissolved organic matter and microbial activity in eutrophic lake. *Sci. Total Environ.* 923, 171476. <http://10.1016/j.scitotenv.2024.171476>.
- Thangaraj, S., Bankole, P.O., Sadasivam, S.K., 2021. Microbial degradation of azo dyes by textile effluent adapted, *Enterobacter hormaechei* under microaerophilic condition. *Microbiol. Res.* 250, 126805.
- Thiviya, P., Gamage, A., Kapilan, R., Merah, O., & Madhujith, T. (2022). Production of singlecell protein from fruit peel wastes using Palmyrah Toddy yeast. *Fermentation*, 8(8), 355. <https://doi.org/10.3390/fermentation8080355>

- Torres, E. (2020). Biosorption: A Review of the Latest Advances. *Processes*, 8(12), 1584. <https://doi.org/10.3390/pr8121584>
- Umukoro, E. H., Peleyeju, M. G., Ngila, J. C., & Arotiba, O. A. (2017). Towards wastewater treatment: Photo-assisted electrochemical degradation of 2-nitrophenol and orange II dye at a tungsten trioxide-exfoliated graphite composite electrode. *Chemical Engineering Journal*, 317, 290–301. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.084>
- Velasquez-Orta SB, Mohiuddin O, Orta Ledesma MT, et al. Process intensification of microalgal biofuel production. In: 3rd Generation Biofuels, Disruptive Technologies to Enable Commercial Production Woodhead Publishing Series in Energy. Elsevier; 2022, p. 269–90. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90971-6.00030-9>.
- Vieira, R.H., Volesky, B., 2000. Biosorption: a solution to pollution? *Int. Microbiol.* 3, 17–24.
- Vijayaraghavan, K., & Yun, Y.-S. (2008). Bacterial biosorbents and biosorption. *Biotechnology Advances*, 26(3), 266–291. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.02.002>
- Viktor, M. J., Rose, S. H., Van Zyl, W. H., & Viljoen-Bloom, M. (2013). Raw starch conversion by *Saccharomyces cerevisiae* expressing *Aspergillus tubingensis* amylases. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 6, 167. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-167>
- Vitor, V. & Corso, C. R. (2008). Decolorization of textile dye by *Candida albicans* isolated from industrial effluents. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 35(11), 1353–1357. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0435-5>
- Walls, L. E, Velasquez-Orta, S. B. Romero-Frasca, E. Leary, P., Yáñez Noguez, I., & Orta Ledesma, M. T. (2019). Non - sterile heterotrophic cultivation of native wastewater yeast and microalgae for integrated municipal wastewater treatment and bioethanol production. *Biochemical Engineering Journal*, 151, 107319. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107319>.
- Wang, X.-X. Zhao, Z.-H. Chang, T.-S. & Liu, J.-G. (2011). Yeast screening from avermectins wastewater and investigation on the ability of its fermentation. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 34(9), 1127–1132. <https://doi.org/10.1007/s00449-011-0563-6>
- Wawrzkievicz, M. and Hubicki, Z. 2015. Anion exchange resins as effective sorbents for removal of acid, reactive, and direct dyes from textile wastewaters. *Ion Exchange-Studies and Applications*, 37-72.
- Wen, Y. Chen, H. Shen, C., Zhao, M., Liu, W. 2011. Enantioselectivity tuning of chiral herbicide dichlorprop by copper: Roles of reactive oxygen species. *Environ. Sci. Technol.* 45.
- Wensheng Zou, Wei Ma, Shufen Zhang, Salt-free neutral dyeing of cotton fiber with monochlorotriazine type reactive dyes, *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 282, Part 5, 2024, 136992, ISSN 0141-8130

- Wu, Y., Li, T. and Yang, L. (2012) Mechanisms of Removing Pollutants from Aqueous Solutions by Microorganisms and Their Aggregates: A Review. *Bioresource Technology*, 107, 10-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.088>
- Wu, Y., Liu, Y., Kamyab, H., Rajasimman, M., Rajamohan, N., Ngo, G. H., & Xia, C. (2023). Physico-chemical and biological remediation techniques for the elimination of endocrine-disrupting hazardous chemicals. *Environmental Research*, 232, 116363. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116363>
- Xiong J.Q., Kim S.J., Kurade M.B., Govindwar S., Abou-Shanab R.A., Kim J.R., Roh H.S., Khan M.A., Jeon B.H. 2019. Combined effects of sulfamethazine and sulfamethoxazole on a freshwater microalga, *Scenedesmus obliquus*: toxicity, biodegradation, and metabolic fate, *J. Hazard Mater.* 370 138e146.
- Xue, W., Hong, X., Du, Y., & Chen, B. (2023). Electro-Fenton mineralization of real textile wastewater by micron-sized ZVI powder anode. *Water Science and Technology*, 87(4), 924–937. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.032>
- Y.-Q. Zhang, X.-C. Wei, J.-J. Long. 2016. Ecofriendly synthesis and application of special disperse reactive dyes in waterless coloration of wool with supercritical carbon dioxide, *J. Clean. Prod.* 133, 746–756.
- Yakub, M.T., Sen, T.K., Afroze, S. and Ang, H.M., 2014, Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184.
- Yáñez-Ángeles, M. J., González-Nava, V. J., Castro-Fernández, J. A., García-Estrada, R., Espejel-Ayala, F., Reyes-Vidal, Y., Rivera-Iturbe, F. F., Cárdenas, J., & Bustos, E. (2025). Textile-washing wastewater treatment using ozonolysis, electro-coagulation, and electro-oxidation. *Electrochimica Acta*, 512, 145473. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145473>
- Yang, Q., Yang, M., Zhang, S., & Lv, W. (2005). Treatment of wastewater from a monosodium glutamate manufacturing plant using successive yeast and activated sludge systems. *Process Biochemistry*, 40(7), 2483–2488. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.09.009>
- Yang, Q., Zhang, H., Li, X., Wang, Z., Xu, Ying, Ren, S., Chen, X., Xu, Yuanyuan, Hai, H., Wang, H., 2013. Extracellular enzyme production and phylogenetic distribution of yeasts in wastewater treatment systems. *Bioresour. Technol.* 129, 264e273. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.101>.
- Yang Q, Angly FE, Wang Z, Zhang H. Wastewater treatment systems harbor specific and diverse yeast communities. *Biochem Eng J* 2011;58:168–76
- Yu, Z., & Wen, X. (2005). Screening and identification of yeasts for decolorizing synthetic dyes in industrial wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 56(2), 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.05.006>
- Yu, Y., Zeng, H., Wang, L., Wang, R., Zhou, H., Zhong, L., Zeng, J., Chen, Y., Tan, Z., 2024. Modeling nitrogen removal performance based on novel microbial activity indicators in WWTP by machine learning and biological interpretation. *J. Environ. Manag.* 354, 120256. <http://10.1016/j.jenvman.2024.120256>.

- Zabłocka-Godlewska, E., Przysa's, W., Grabi'nska-Sota, E., 2018. Possibilities of obtaining from highly polluted environments: new bacterial strains with a significant decolorization potential of different synthetic dyes. *Water Air Soil Pollut. Focus.* 229(6).
- Zhang Q (2010) Nanocolorants. In: Sattler KD (ed) *Handbook of nanophysics: functional nanomaterials*. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York
- Zinovicius, A., et al., 2022. Evaluation of a yeast–polypyrrole biocomposite used in microbial fuel cells. *Sensors* 22, 327.

