



**ŞEKER ENDÜSTRİSİ ARITMA ÇAMURU
KULLANILARAK CONGO RED BOYAR
MADDESİNİN ADSORPSİYONU**

Sude KİBRİTÇİOĞLU YILDIRIM

Danışman: Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN
Yüksek Lisans Tezi
Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2023
(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ŞEKER ENDÜSTRİSİ ARITMA ÇAMURU KULLANILARAK CONGO RED
BOYAR MADDESİNİN ADSORPSİYONU**

(Adsorption of congo red dye using sugar industry sewage sludge)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sude KİBRİTÇİOĞLU YILDIRIM

Danışman: Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Erzurum
Kasım, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Sude KİBRİTÇİOĞLU YILDIRIM tarafından hazırlanan “*Şeker Endüstrisi Arıtma Çamuru Kullanılarak Congo Red Boyar Maddesinin Adsorpsiyonu*” başlıklı çalışması 28 / 11 / 2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Çevre Mühendisliği Ana Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Doç. Dr. Şahset İRDEMEZ

Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Sinan KUL

Bayburt Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun

.../.../.... tarih ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Satuk Buğra CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN danışmanlığında sunulan “Şeker Endüstrisi Arıtma Çamuru Kullanılarak Congo Red Boyar Maddesinin Adsorpsiyonu” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	15	30
Materyal ve Metot	14	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	11	20
Sonuçlar ve Öneriler	1	20
Tezin Geneli	12	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Sude KİBRİTÇİOĞLU YILDIRIM	Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN
28.11.2023	28.11.2023
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, değerli fikirlerini paylaşan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi birikimime çok şey katan, karşılaştığım tüm zorluklarda yanımda olup beni yüreklendiren, değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Şahset İRDEMEZ'e ve Sayın Doç. Dr. Sinan KUL'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans dönemim boyunca maddi ve manevi desteklerini bir an olsun benden esirgemeyen, varlıklarıyla, sonsuz sabır, güven ve ilgileriyle bana daima güç katan değerli eşim Dr. Muhammet YILDIRIM, varlığıyla bana her an motivasyon olan biricik oğlum, canım ailem ve sevgili abim Dr. Öğr. Gör. Gürhan BEBEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. İyi ki varsınız.

Son olarak kurduğu büyük Türkiye Cumhuriyeti ile fırsat eşitliği sağlayan büyük önder Mustafa Kemal ATATÜRK'e cumhuriyet kadını bir mühendis olarak, sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Sude KİBRİTÇİOĞLU YILDIRIM

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEKER ENDÜSTRİSİ ARITMA ÇAMURU KULLANILARAK CONGO RED BOYAR MADDESİNİN ADSORPSİYONU

Sude KİBRİTÇİOĞLU YILDIRIM

Danışman: Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Amaç: Tez çalışmasında, atıksulardan boyar maddelerin adsorpsiyonla gideriminin incelenmesi ve sistem tasarımı için gerekli parametrelerin saptanması üzerine deneysel çalışmaların yapılması amaçlanmaktadır. Erzurum ili Aziziye ilçesinde faaliyet gösteren şeker fabrikasında pancar üretim sürecinde açığa çıkan atıksuların aerobik ve anaerobik olarak biyolojik arıtımı sonucunda oluşan çamurlar kurutulup adsorbent olarak kullanılmıştır. Boya çözeltisi ise Congo red tekstil boyar maddesinin laboratuvarında sentetik olarak çözünmesiyle elde edilmiştir.

Yöntem: Adsorpsiyon, çözünmüş katı, sıvı ve gaz maddelerin atomlarının yüzeye tutunması ile ilgili kimyasal ve fiziksel bir tür adezyon kuvvetidir. Adsorpsiyon ile sentetik boyar madde giderimini sağlamak için sulu çözeltilere farklı konsantrasyonlarda adsorbent ilavesi yapılarak numunelerdeki giderim verimleri belirlenmiştir.

Bulgular: Bu çalışmada adsorpsiyona etki eden faktörlerden; pH, başlangıç boyar madde konsantrasyonu, adsorbent miktarı, temas süresi, karıştırma hızı, sıcaklık ve partikül boyutu incelenerek adsorpsiyon verimleri karşılaştırılmıştır.

Sonuç: Bu çalışmada adsorpsiyona etki eden faktörlerden; pH, başlangıç boyar madde konsantrasyonu, adsorbent miktarı, temas süresi, karıştırma hızı, sıcaklık ve partikül boyutu incelenerek adsorpsiyon verimleri karşılaştırılmıştır.

Sonuç: Bu çalışmada, Erzurum Aziziye bölgesinde faaliyet gösteren şeker fabrikasından pancar üretimi sonucunda açığa çıkan arıtma çamuru kullanılarak Congo Red boyar maddesi sulu çözeltilerden adsorpsiyon yöntemi ile uzaklaştırılmıştır. Yapılan çalışmada adsorpsiyon kinetiği ve termodinamiği incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, Freundlich izoterm modeli ile uyumlu olup adsorpsiyonun yalancı ikinci dereceden kinetik modele uyduğunu göstermiştir. Başlangıç boyar madde konsantrasyonunun 100 mg/L, pH'ın 11,3 (doğal pH), adsorbent konsantrasyonunun 0,3 g/L, temas süresinin 60 dk, karıştırma hızının 200 rpm, partikül boyutunun 0,2-0,5 mm aralığında ve sıcaklığın 20°C olarak belirlendiği deneysel şartlarda giderim verimi %75,2, adsorplama kapasitesi ise 25,06 mg/g olarak bulunmuştur. Congo red boyar madde adsorpsiyonunda kullanılan arıtma çamurunun yeterince verimli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, Adsorpsiyon İzotermi, Adsorpsiyon Kinetiği, Arıtma Çamuru, Boyar Maddeler, Congo Red

Kasım 2023, 53 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

ADSORPTION OF CONGO RED DYE USING SUGAR INDUSTRY SEWAGE SLUDGE

Sude KİBRİTÇİOĞLU YILDIRIM

Assoc. Prof. Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Purpose: The aim of this thesis is to conduct experimental studies on the investigation of the removal of dyestuffs from wastewater by adsorption and the determination of the necessary parameters for system design. The sludge formed as a result of the aerobic and anaerobic biological treatment of wastewater released during the beet production process in the sugar factory operating in the Aziziye district of Erzurum was dried and used as an adsorbent. The dye solution was obtained by dissolving Congo red textile dye synthetically in the laboratory.

Method: Adsorption is a type of chemical and physical adhesion force related to the attachment of atoms of dissolved solid, liquid and gas substances to the surface. To ensure the removal of synthetic dyes by adsorption, different concentrations of adsorbent were added to aqueous solutions and the removal efficiencies in the samples were determined.

Findings: In this study, adsorption efficiencies were compared by examining the factors affecting adsorption such as pH, initial dye concentration, amount of adsorbent, contact time, mixing speed, temperature and particle size.

Results: In this study, Congo Red dye was removed from aqueous solutions by adsorption method using the sewage sludge produced as a result of beet production from the sugar factory operating in Erzurum Aziziye region. In the study, adsorption kinetics and thermodynamics were examined. The data obtained from experimental studies are compatible with the Freundlich isotherm model and show that the adsorption fits the pseudo-second order kinetic model. Under these experimental conditions, where initial dye concentration of 100 mg/L, pH 11.3 (natural pH), adsorbent concentration of 0.3 g/L, contact time with 60 min, 200 rpm mixing speed, particle size ranging from 0.2 mm to 0.5 mm. and temperature of 20°C, the removal efficiency and the adsorption capacity were found as 75.2% and 25.06 mg/g, respectively. It was concluded that the sewage sludge used in Congo red dye adsorption was sufficiently efficient.

Keywords: Adsorption, Adsorption Isotherm, Adsorption Kinetics, Sewage Sludge, Dyes, Congo Red

November 2023, 53 page

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLOLAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER	3
Adsorpsiyon.....	3
Adsorpsiyon Türleri	4
Fiziksel Adsorpsiyon	4
Kimyasal Adsorpsiyon.....	5
İyonik (elektrostatik) Adsorpsiyon.....	5
Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler.....	6
Adsorbent Miktarı.....	6
Temas Süresi.....	6
Karıştırma Hızı	7
Sıcaklık	7
Partikül Boyutu	7
pH.....	7
Adsorpsiyon Maddelerin Çeşitleri ve Özellikleri.....	8
Doğal Adsorbentler.....	8
Yapay Adsorbentler	8
Adsorpsiyon İzotermi ve Denklemleri	9
Langmuir Adsorpsiyon İzotermi	10
Freundlich Adsorpsiyon İzotermi.....	11
Adsorpsiyon Kinetikleri	12

Yalancı Birinci Derece Kinetik Modeli	13
Yalancı İkinci Derece Kinetik Modeli	14
Adsorpsiyon Termodinamiği	14
Adsorpsiyonun Kullanıldığı Prosesler	15
Boyar Maddeler	16
Boyar Maddelerin Sınıflandırılması	17
Reaktif Boyar Maddeler	18
Dispers Boyar Maddeler	19
Direkt Boyar Maddeler	19
Asidik Boyar Maddeler	19
Boyar Maddelerin Atık Sulardan Giderilmesi	20
Congo Red	20
MATERYAL VE METOT	24
Materyal	24
Adsorbentin Hazırlanması	24
Boya Çözeltilisinin Hazırlanması	25
Metot	25
Standart Çözeltilerin Hazırlanması	26
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	27
Temas Süresinin Adsorpsiyona Etkisi	27
Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonunun Adsorpsiyona Etkisi	28
Adsorbent Konsantrasyonunun Adsorpsiyona Etkisi	31
Karıştırma Hızının Adsorpsiyona Etkisi	32
Sıcaklığın Adsorpsiyona Etkisi	34
Partikül Boyutunun Adsorpsiyona Etkisi	35
pH Değerinin Adsorpsiyona Etkisi	36
Adsorpsiyon Kinetiği	38
Congo Red Boyar Maddesi için Adsorpsiyon Kinetiği	38
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	53

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Boyutsuz ayırma sabiti (RL) değerleri ile izoterm tipleri arasındaki ilişki.....	11
Tablo 2. Boyar maddelerin sınıflandırılması.....	17
Tablo 3. Boya türlerinin tanımı	17
Tablo 4. Atıksu oluşumuna neden olan boyanın bileşimi ve içeriği hakkında bilgi	24
Tablo 5. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında % verim ve q değerlerinin değişimi	29
Tablo 6. Langmuir ve Freundlich izoterm sabitleri ve regresyon katsayıları	31
Tablo 7. Farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $q_e(\text{deneysel})$, $q_t(\text{deneysel})$ ve $\ln(q_e - q_t)$ değerlerinin değişimi	39
Tablo 8. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $q_e(\text{hesaplanan})$ ve k_1 değerlerinin değişimi.....	40
Tablo 9. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $\ln k_1$ değerlerinin değişimi	40
Tablo 10. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için K_c ve ΔG° değerleri	41
Tablo 11. Farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için t/q_t (dk.g/mg) değerleri.....	42
Tablo 12. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $q_e(\text{hesaplanan})$ ve k_2 değerleri.....	43
Tablo 13. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile KK boyar maddesi için $\ln k_2$ değerleri	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Adsorban yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon mekanizması	3
Şekil 2. Moleküllerin adsorban yüzeyindeki fiziksel adsorpsiyonu.	4
Şekil 3. Moleküllerin adsorban yüzeyinde kimyasal adsorpsiyonu.....	5
Şekil 4. Tekstil endüstrisinde kullanılan çeşitli boyalar	16
Şekil 5. Congo red boyasının moleküler yapısı	21
Şekil 6. Erzurum şeker fabrikası üretim akış şeması	22
Şekil 7. Havalandırılmış arıtma çamuru	25
Şekil 8. Congo red boya çözeltisi için hazırlanan kalibrasyon eğrisi	26
Şekil 9. Adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun ve giderim veriminin zamanla değişimi.....	27
Şekil 10. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında; (a) adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonlarının zamanla değişimi, (b) giderim verimlerinin zamanla değişimi	28
Şekil 11. Başlangıç boyar madde konsantrasyonu değişiminin adsorpsiyon verimi ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi	29
Şekil 12. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında elde edilen Langmuir izotermi	30
Şekil 13. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında elde edilen Freundlich izotermi	30
Şekil 14. Farklı adsorbent konsantrasyonlarında adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi	31
Şekil 15. Farklı adsorbent konsantrasyonlarının adsorpsiyon verimine etkisi	32
Şekil 16. Farklı karıştırma hızlarında adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi	33
Şekil 17. Farklı karıştırma hızlarının adsorpsiyon verimine etkisi	33
Şekil 18. Farklı sıcaklıklarda adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi	34
Şekil 19. Farklı sıcaklıkların adsorpsiyon verimine etkisi	34

Şekil 20. Farklı partikül boyutlarında adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi	35
Şekil 21. Farklı partikül boyutlarının adsorpsiyon verimine etkisi	36
Şekil 22. Farklı başlangıç pH değerlerinde adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi	37
Şekil 23. Başlangıç pH'sının adsorpsiyon verimine etkisi	37
Şekil 24. Farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonuna ait birinci derece kinetik modeli	39
Şekil 25. Arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $1/T$ 'ye karşılık $\ln k_1$ eğrisi	40
Şekil 26. Arıtma çamuru ile Congo red boyar maddesi adsorpsiyonu için $1/T$ 'ye karşılık $\ln K_c$ eğrisi	41
Şekil 27. Farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonuna ait ikinci derece kinetik modeli	42
Şekil 28. Arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $1/T$ 'ye karşı $\ln k_2$ eğrisi.....	43

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Cs	: Sezyum
Sr	: Stronsiyum
pH	: Power of Hydrogen
vd.	: ve diğerleri
θ	: Adsorplayıcının Örtülü Yüzey Kesri
(1- θ)	: Örtülmemiş Yüzey Kesri
A	: Toplam Yüzey
Vm	: Birim kütlede katı yüzeyinin monomoleküler olarak örtülmesi için gerekli gazın hacmi
P	: Basınç
Ce	: Adsorpsiyon Sonrası Çözeltide Kalan Boyar Madde Konsantrasyonu
qe	: Birim Adsorban Üzerine Adsorplanan Madde Miktarı
Qmax	: Adsorbanın Maksimum Adsorplama Kapasitesi
b	: Sıcaklık ve Adsorpsiyon Entalpisine Bağlı Bir Sabit
RL	: Langmuir İzoterminin Sabit Ayırma Faktörü
c₀	: Maddenin Çözeltideki Başlangıç Konsantrasyonu
R	: Evrensel Gaz Sabiti
T	: Sıcaklık (°K)
bT	: Temkin Adsorpsiyon Potansiyeli
AT	: Temkin İzoterm Sabiti
K_{1,ad}	: Tek tabaka için denge sabiti, L/mg
K_{i,ad}	: Sonraki katmanlar için denge sabiti, L/mg
C_s	: Çözeltideki adsorbatın doymuş çözelti konsantrasyonu, mg/L
Ç	: Çözünür Grup
R	: Renkli Grup
K	: Köprü Grup
X	: Reaktif Grup

GİRİŞ

Doğaya ve insana karşı duyarlı üretim, son yıllarda artarak önem ve değer kazanmaktadır. Endüstriyel atıksular içeriğindeki boyarmaddeler ile günümüzdeki en önemli çevre problemlerinden birisi haline gelmiştir. Boyarmaddeler ile kirlatilen atıksuların, alıcı ortamlar ile birleşmesi suda yaşayan canlı varlıkları oldukça olumsuz şekilde etkilemektedir. Su kaynaklarının içme suyu olarak kullanılmasında pahalı arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Atıksularda boyarmadde barındırması biyolojik arıtma sistemlerinin verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Boyaların aksine, boyaların çoğu genellikle suda çözünür ve renk dağılımının tekdüze olması için sulu çözeltilerde kullanılır. Tekstil ve tekstil sektörleri başta olmak üzere kâğıt, deri, gıda ve kozmetik sektörlerinde birçok doğal ve sentetik boyalar kullanılmaktadır.

Günümüzde bütün insanlığı bizzat yakından ilgilendiren önemli sorunlardan biri de çevre kirliliği problemidir. Çevre kirliliği etkisi yalnızca olduğu bölgenin kirliliğini değil maalesef yakın çevresini de olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun yanı sıra zaman içerisinde tüm dünya nüfusunu da olumsuz yönde etkilemektedir. Sera gazlarının etkisi, nükleer kazalar (Çernobil gibi) ve endüstrinin atmosfere bıraktığı toksik gazlar bunun en belirgin örnekleridir. Bu durumda çevre kirliliği için mücadelede ülkeler, devletler, kurum ve kuruluşlar ile uluslararası ortak çalışma gerekmektedir (Yıldırım 2003).

Zararlı kirleticiler kategorisinde bulunan boyalar; deri, kozmetik, tekstil, kâğıt ve ilaç gibi farklı endüstrilerin atıksularında oldukça fazla bulunmaktadır. Boyalar, sulu bir ortamda çözünmüş partiküllerinin yüküne göre katyonik, anyonik veya iyonik olmayan olarak sınıflandırılmaktadır (Henning vd. 2022; Oukebdane vd. 2022; Zhang vd. 2022). Kirleticinin, atıksudan ve en elzemi içme suyundan arıtılması, fizikokimyasal niteliklerinin yanı sıra aynı zamanda arıtma prosedürlerine de bağlıdır (Kim vd. 2022). Bu nedenle atıksuların arıtımı için koagülasyon-flokülasyon (Jabbar vd. 2022), membran (Goh vd. 2022), fotokatalitik (Shkir vd. 2022), elektrokimyasal sistemler (Hassani vd. 2022) ve adsorpsiyon (Vieira vd. 2022) gibi birçok proses kullanılmakta ve geliştirilmektedir.

Boyaların atıksudan uzaklaştırılması için oksidasyon, koagülasyon-flokülasyon, ozonlama gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Hakkında en fazla çalışılan

yöntemlerden biri olan adsorpsiyon yöntemi ile renk gideriminde uygun maliyetli, ekonomik ve kolay bulunabilen adsorbanların kullanımı yaygın olarak araştırılmaktadır. Congo red, kanserojen ve mutajen özelliklere sahip olmasına karşı tekstil, kâğıt, baskı ve plastik endüstrisinde oldukça tercih edilmektedir. (Alver vd. 2017).

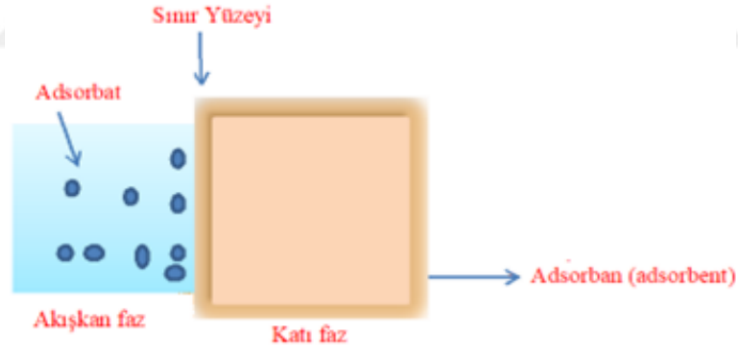
Çok yönlü bir maddedir çünkü çeşitli kullanımları vardır. Tekstil endüstrisinde ve hücreler ve kumaşlar için boya olarak kullanıldı. Congo red, bir diazonyum tuzu ve aktif bir aromatik halkadan oluşan bir protein azo boyasıdır. Bu madde, görünür spektrumdaki elektromanyetik radyasyonu emebilir, bu nedenle oldukça yoğun bir renge tercih edilmiştir. Bu sebeple boyarmadde olarak Kongo Kırmızısı seçilmiştir ve boyaların giderimi için en çok tercih edilen yöntemlerden adsorpsiyon kullanılmıştır. Bu çalışmada; Kongo Kırmızısının, sulu ortamdan arıtma çamuru adsorbent olarak kullanılarak adsorpsiyon yöntemi ile giderilmesi çalışılmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, iki ayrı fazda bulunan maddelerin temas yüzeylerinde oluşan belirli bileşenlerin birbirine bağlanması işlemine denir. Faz sınırlarındaki yüzey kuvvetleri, katı-sıvı arayüzündeki moleküllerin konsantrasyonlarında değişikliklere sebep olur (Tchernev 1979). Bu fazlar sıvı-gaz, sıvı-sıvı, katı-sıvı ve katı-gaz olabilir. Adsorbe olan faza adsorban, adsorbe edilen faza ise adsorbat adı verilir (Noll vd. 1992).

Adsorpsiyon işlemi sırasında gerçekleşen adsorpsiyon mekanizması Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu mekanizmada, adsorbanlar yoğun kısımdan, adsorbanın bulunduğu faza doğru ilerler ve sınır yüzeyde toplanırlar. Sınır yüzeyde toplanan adsorbanlar, adsorbanın gözenek kısımlarına yerleşip adsorban yüzeyinde adsorbe olmuş olurlar. Aşağıdaki Şekil 1’de adsorban yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon mekanizmasını göstermektedir (Sülkü 2012).



Şekil 1. Adsorban yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon mekanizması (Sülkü 2012)

Adsorpsiyon parametrelerini güvenli bir şekilde tahmin etmek amacıyla ilgili birçok araştırmacı, ağır metallerin, boyaların ve organik kirleticilerin aktif karbon üzerinde adsorpsiyonu gibi çeşitli adsorpsiyon sistemlerini açıklamak için lineer veya lineer olmayan izoterm modellerinin uygulanabilirliğini incelemeyi önermiştir (Chen 2015). Adsorpsiyon yöntemi, kirleticilerin yok edilmesinde farklı diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Hem ekonomik olup hem de atıksudan boyarmadde giderme veriminin yüksek olması açısından daha fazla kullanılmaktadır.

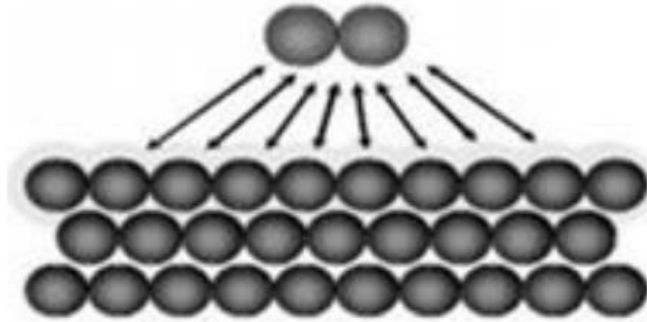
Aktif karbon yöntemi çoğunlukla adsorpsiyon yoluyla boyayı çıkarmak için kullanılır. Aktif karbon haricinde tercih edilen adsorbentler aktif kömür, selüloz türevleri, silika jel, odun, boksit, zeolit, bentonit, sepiyolit ve odun külü gibi kolay elde edilen ve uygun maliyetli olan adsorbentlerdir (Bahar 2011).

Adsorpsiyon Türleri

Adsorbat ve adsorbat partikülleri arasındaki çekim kuvvetine bağlı olarak 3 tip adsorpsiyon vardır. (Weber vd. 1991). Adsorpsiyon çeşitleri (i) fiziksel adsorpsiyon, (ii) kimyasal adsorpsiyon ve (iii) iyonik adsorpsiyon olmak üzere sınıflandırılabilir.

Fiziksel Adsorpsiyon

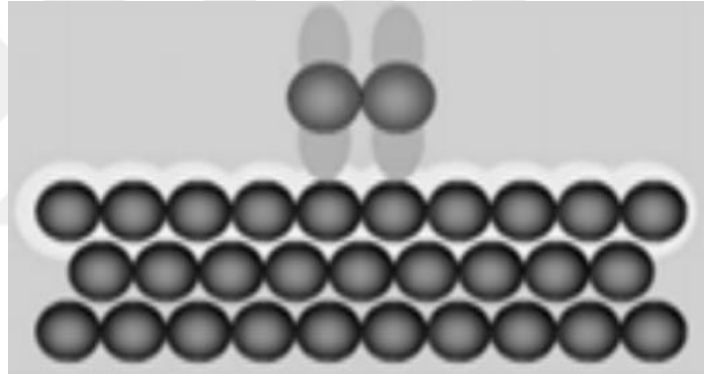
Fiziksel adsorpsiyon, zayıf Van der Waals kuvvetlerinin etkisinden kaynaklanmakta olup, moleküllerin adsorban yüzeyindeki fiziksel adsorpsiyonu Şekil 2’de gösterilmiştir (Kayacan 2007). Sıvı parçacıkları katı bir yüzeye çeken kuvvetler, adsorbat ve adsorbat molekülleri arasındaki zayıf Van der Waals kuvvetleri etkilidir ve bu, iki molekül arasında elektron alışverişinin veya elektron paylaşımının olmadığı bir adsorpsiyon türüdür. Fiziksel adsorpsiyon derecesi yükselen sıcaklıkla düşer ve katı katalizörlerin yüzey alanını ve gözenek boyutunu belirlemek için kullanışlıdır. (Haymaker ve Thompson 1972). Katı bir adsorban tarafından fiziksel olarak adsorbe edilen moleküller, ısı ile tekrar ayrılabilir. Bu nedenle, fiziksel adsorpsiyon geri dönüşümlü bir süreçtir. (Tchernev 1979).



Şekil 2. Moleküllerin adsorban yüzeyindeki fiziksel adsorpsiyonu (Kayacan 2007).

Kimyasal Adsorpsiyon

Kimyasal adsorpsiyon, adsorbanın kimyasal özelliklerinde bir değişikliğe neden olan adsorbat ile adsorbent arasında güçlü bir etkileşimi içermekte olup moleküllerin adsorban yüzeyinde kimyasal adsorpsiyonu Şekil 3'te gösterilmiştir (Kayacan 2007). Burada gaz molekülleri katı bir yüzeye kimyasal bağlarla bağlanır. Elde edilen bağ çoğunlukla fiziksel Van der Waals kuvvetlerinin etkisinden daha kuvvetlidir. Oldukça spesifik ve sadece adsorban ve adsorbat arasında kimyasal bir bağlanma olasılığı var oldukça meydana gelir. Kimyasal adsorpsiyon, adsorbanın kimyasal özelliklerinde bir değişikliğe neden olan adsorbat ile adsorbent arasında güçlü bir etkileşimi içerir. Burada gaz molekülleri katı bir yüzeye kimyasal bağlarla bağlanır (Weber vd. 1991).



Şekil 3. Moleküllerin adsorban yüzeyinde kimyasal adsorpsiyonu (Kayacan 2007).

İyonik (elektrostatik) Adsorpsiyon

İyonik adsorpsiyon, elektrostatik çekim kuvvetlerinin iyonun katı yüzeye seçici olarak bağlanması üzerindeki etkisiyle açıklanır. Belirli katılar ile bir elektrolit çözeltisi arasındaki tersinir iyon değişimine iyon değişimi denir. Değişim olgusu adsorpsiyondan daha karmaşık olmasına rağmen, elde edilen veriler oldukça benzerdir (Noll vd. 1992; Weber 1972).

İyonik özelliklere sahip bir adsorbatın elektrostatik çekim kuvvetleri tarafından yüzeyin yüklü bölgelerine tutturulduğu bir işlemdir. Maddelerin iyonik kuvvetine ve moleküllerin boyutuna göre seçici olarak oluşur. Ortamın iyonik kuvveti ve pH'ı bu tip adsorpsiyonu büyük ölçüde etkiler (Weber 1972).

Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler

Başlangıç konsantrasyonu, süre, karıştırma hızı, sıcaklık, partikül boyutu ve pH gibi çevresel koşullar adsorpsiyon prosesini etkilemektedir. Bu nedenle çevresel koşulların en iyi şekilde belirlenmesi ve maksimum verim için prosesin optimize edilmesi gerekmektedir (Chuah vd. 2005).

Adsorbent Miktarı

Adsorpsiyon işleminde adsorban miktarının artması adsorbatın giderim kapasitesinin de artması anlamına gelir. Fakat adsorpsiyon işleminin yüzey alanını azaltır ve adsorbatın gideriminin azalmasına neden olabilir. Bu nedenle maksimum adsorpsiyon verimi için gerekli işlem basamaklarının belirlenmelidir (Öztürk 2018). Adsorpsiyon işleminde adsorbanın diğer özellikleri kadar miktarı da önemlidir. Daha yüksek adsorbat konsantrasyonlarına sahip çözeltilerin dengeye ulaşması daha uzun sürerken, daha düşük konsantrasyonlara sahip çözeltiler daha kısa sürer (Etcı 2008).

Temas Süresi

Adsorpsiyon işleminde, kullanılan adsorbanın yüzeyindeki gözenekler nedeniyle adsorban molekülleri adsorbata kolayca yapışabilir, bu nedenle safsızlıklar sıvı halden çok hızlı bir şekilde dışarı akar. Boşluklar zamanla birikmeye başladığından, adsorbent moleküllerinin tutunacak bir yüzey bulması zorlaşır ve adsorpsiyon hızı düşer. Bu durumun bir sonucu olarak moleküllerin yapışmasını sağlayan kısmın sayısı belli bir sınıra geldiğinde adsorpsiyon mekanizması artık oluşmaz. Bu olay adsorpsiyonun dengeye ulaştığını gösterir. Adsorpsiyon hızı azalır ve reaksiyon sonunda adsorpsiyon hızı desorpsiyon hızına eşit olur. Bu, sistemin dengeye ulaştığını gösterir (Güneş 2018). İlk adsorbat konsantrasyonu, adsorbe edilen adsorbat miktarını etkiler. Başlangıçtaki adsorbat konsantrasyonundaki bir artış, başlangıçta adsorbe edilen malzeme miktarında bir artışa yol açar ve adsorbe edilen malzeme miktarı zamanla azalır. Azalmanın nedeni muhtemelen adsorpsiyon yüzeyindeki adsorpsiyon noktalarının doyuma ulaşmasıdır (Salleh vd. 2011).

Karıştırma Hızı

Adsorpsiyon işleminde iyi bir verim elde etmek için optimum karıştırma hızını belirlemek önemlidir, çünkü karıştırma hızı arttıkça adsorbat ile adsorban arasındaki temas artar, yani adsorpsiyon hızı artar, ancak eğer Karıştırma süresinin çok uzun olması adsorbat ile adsorban arasındaki bağın bozulmasına neden olur (Berkan 2010).

Sıcaklık

Ortam sıcaklığının adsorpsiyona etkisi adsorpsiyon yönteminin endotermik veya ekzotermik olmasına göre değişir. Yöntem endotermik ise sıcaklık arttıkça adsorbanın gözeneklerinin büyür ve yüzeyde adsorplanan madde miktarı artar. Yöntem ekzotermik olduğunda ise sıcaklığın artmasıyla adsorbanın gözenek boyutları küçülür yüzeyde adsorplanan madde miktarının az olmasına sebep olur (Elbağlı 2016).

Partikül Boyutu

Adsorban partikül boyutu da önemli bir adsorpsiyon değişkenidir. Parçacık boyutu, adsorpsiyon oranını doğrudan etkiler ve parçacık boyutu küçüldükçe adsorpsiyon hızı artar. Küçük parçacıklar yüzey alanını artırır ve çözelti ile teması daha kolay olduğu için adsorpsiyon verimini doğrudan etkiler. (Koçer 2013).

pH

Adsorpsiyonun gerçekleştiği çözeltinin pH'ı adsorpsiyonu etkiler. Çünkü hidrojen ve hidrojen iyonları oldukça güçlü bir şekilde adsorbe edilir. Adsorbent ve adsorbat moleküllerinin etkin olduğu pH aralıklarının belirlenmesi, en iyi adsorpsiyon verimini elde etmek için çok önemlidir (Uslu 2014). Ayrıca adsorpsiyon, asidik ve bazik bileşiklerin iyonlaşma derecesinden de etkilenir. Organik elektrolitlerin sulu çözeltilerden adsorpsiyonunun pH düştükçe arttığı genel olarak bilinmektedir. Sulu çözeltilerde organik elektrolitlerin adsorpsiyonunun pH'ın düşmesiyle arttığı gözlenmiştir (Yuana vd. 2009).

Adsorpsiyon Maddelerin Çeşitleri ve Özellikleri

Doğal Adsorbentler

Doğal adsorbentler, ön işlem gerektirmez ve kolayca elde edilebilir, maliyeti düşük maddelerdir. Çok fazla atık çıkarmazlar. Doğal adsorbentlerden bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- **Kömür:** Kömür, sıcaklık ve basınç etkisi altında çok uzun bir süre boyunca çeşitli fiziksel ve kimyasal değişimlere uğrayan yeraltı bitki kalıntılarından oluşan karmaşık ve heterojen bir katıdır. Fonksiyonel grupların çeşitliliği nedeniyle çeşitli adsorpsiyon işlemlerinde kullanılır.
- **Kitosan:** Kitosanın hammaddesi olan kitin, biyosorbentlerde selülozdan sonra en yaygın doğal polimerdir. Etkili bir ağır metal bağlayıcıdır.
- **Zeolit:** Doğal kristal aminosilikatlardır. Stronsiyum (Sr) ve sezyum (Cs) gibi ağır metallerin gideriminde iyon değiştirme özelliğinden dolayı dikkatleri üzerine çekmişlerdir.
- **Selüloz:** Yenilenebilir doğal polimerlerin en yaygın olanıdır.
- **Kil:** Bunlar doğada bol miktarda bulunan minerallerdir. Kil malzemeleri su bazlı alüminyum silikatlardır. Ağır metallerin uzaklaştırılmasında etkilidirler.

Yapay Adsorbentler

Yapay adsorbanlar, doğal adsorbanlardan oldukça pahalıdır. Gereksinim ve kullanım alanına bağlı tercih edilen özelliklerde hazırlanabilen maddelerdir. Bazı endüstriyel ve tarımsal atıklar dışında en önemli suni adsorbanlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- **Aktif karbon:** En çok tercih edilen endüstriyel adsorbentler arasında en önemlilerindendir.
- **Silika jel:** Genellikle endüstriyel kurutma işlemlerinde kullanılır. Başlıca avantajları, uzun hizmet ömrü, düşük maliyetler ve düşük rejeneratif enerji ihtiyacıdır. Aktif alümina: Bu bir alümina türüdür ve hemen hemen tüm endüstriyel kurutma işlemlerinde kullanılır.

- **Reçine:** İçme suyu arıtma, su yumuşatma ve demineralizasyonda kullanılabilen güçlü asit katyon değiştirici reçinelerdir.

Adsorpsiyon İzotermi ve Denklemleri

Adsorpsiyon sürecini daha verimli ve uygun fiyatlı duruma gelmesi için birçok araştırmacı, uygun maliyetli ve tekrar kazanılabilir adsorbanlar bulmaya çalışmaktadır. Maliyeti ve verimliliği azaltmanın beklenen yollarından biri, adsorpsiyonun doğasını anlamaktır (Ho ve McKay 1999). Adsorpsiyon bir denge işlemine benzer. Bir çözelti belirli bir miktar adsorban ile temas ettiğinde, adsorban yüzeyi ile dengeye gelene kadar çözeltideki adsorbe edilen maddenin konsantrasyonu azalır.

Adsorpsiyon izotermi, adsorbentin adsorbat ile nasıl etkileşime girdiğini açıklamak için çok önemlidir ve ayrıca adsorpsiyon kapasitesi hakkında fikir verir. Adsorpsiyon mekanizmasının anlaşılmasında önemli bir rol oynar. Adsorpsiyon süreçlerini açıklamak için hem katı-çözücü arayüzey etkileşimleri hem de gelişmiş bir mekanik modelin basit deneysel denklemleri kullanılır. Bu yaklaşımlar ve denklemler organik iyonlar için geçerlidir, ancak aynı prensip ve denklemlerin birçoğu organik çözünenlerin adsorpsiyonu için geçerlidir. Adsorpsiyon sürecini açıklamaya yardımcı olan birkaç teori olmasına rağmen, en basit izoterm, doğrusal bölünme katsayısıdır. (Sarıkaya 2011). Deneysel veriler tüm izoterm denklemlerine uygulanarak hangi izotermin adsorpsiyona daha iyi uyduğu bulunur. Bu adsorpsiyon için R^2 'nin 1'e yakın olduğu bir izoterm en başarılı olanıdır. Ancak bir veya daha fazla izoterme de sığabilir. Bu çalışmada iki adsorpsiyon izotermi için denge verileri uygulanmıştır. Bunlar sırasıyla Langmuir ve Freundlich izotermi'dir (Roostaei ve Tezel 2004). Dolayısıyla, denge verilerinin teorik veya ampirik bir denklem kullanılarak korelasyonu, adsorpsiyon verilerinin yorumlanması ve değerlendirilmesi için önemlidir. Adsorpsiyon durumunda, adsorplanan malzeme miktarı adsorbat konsantrasyonuna ve ortam sıcaklığına bağlıdır. Genellikle, sabit bir sıcaklıkta adsorbe edilen bir maddenin miktarı konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak belirlenir. Adsorpsiyon izotermi adı verilen sonuçtaki fonksiyon, dengede sabit bir sıcaklıkta çözelti içinde adsorbe edilmemiş halde kalan çözünen konsantrasyonuyla ilgili adsorpsiyonun birim kütlesi başına adsorbe edilen madde miktarını verir (Lin ve Liu 2000).

Langmuir Adsorpsiyon İzotermi

Langmuir izotermi, çözeltideki bir safsızlığın, çözelti içindeki bir adsorbanın yüzeyindeki homojen kısımlar üzerindeki tek tabakalı adsorpsiyonuna uygulanır (Güneş 2016). Yüzey kimyası üzerine yaptığı çalışmalardan dolayı 1932'de Nobel Kimya Ödülü'nü alan Amerikalı bilim adamı Irving Langmuir (1881-1957), 1916'da kimyasal adsorpsiyon için basit bir izoterm denklemi türetmiştir. Bu denklem, tek tabakalı fiziksel adsorpsiyon için de geçerlidir.

Langmuir izotermi, üç ana varsayıma dayanan basit ve fiziksel olarak makul bir adsorpsiyondur. Bu destekler şu şekildedir: Adsorpsiyon durumunda, adsorpsiyon yüzeyi tek bir tabakanın kapladığı yüzeyi geçmemelidir. Adsorbanın tüm yüzey bölgeleri aynı boyuttadır ve birden çok adsorbat molekülü yerleştirmek amacına uygundur. Bu durumda ortaya çıkan katman bir molekül kalınlığındadır. Ek olarak, adsorbe edilen iyonlar tüm adsorpsiyon bölgelerine eşit olarak çekilir ve adsorbe edilen molekül, komşu bölgedeki başka bir molekül ile etkileşime giremez. Bu varsayımlardan yola çıkarak Langmuir eşitliği ve eşitliğin lineerleştirilmiş hali sırasıyla Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2'de görülmektedir (Sarıkaya ve Aybar 1978).

$$q = \frac{x}{m} = \frac{q.K.C_e}{1+K.L.C_e} \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{a.K_L} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{a} \quad (2.2)$$

Burada C_e ifadesi adsorpsiyon sonrasında çözeltide kalan maddenin konsantrasyonunu (mg/L), q_e ifadesi birim adsorbent üzerine toplanan madde miktarını (mg/g), K_L ifadesi adsorbentin adsorptivitesine bağlı bir sabit (L/mg), a ise adsorbentin maksimum adsorplama kapasitesini (mg/g) göstermektedir.

a ve K sabitlerinin değeri, $1/q_e$ 'ye karşı $1/C_e$ grafiği çizilerek elde edilen doğrunun eğiminden hesap edilmekte olup, genellikle heterojen adsorpsiyon sistemlerinde meydana gelen tek tabakalı adsorpsiyon bu izoterm sistemlerinde meydana gelen tek tabakalı adsorpsiyonu açıklamada yetersiz kalmaktadır. Bu durum boyutsuz dağılma sabiti (R_L) ile açıklanmakta olup, adsorpsiyonun fizibilitesini

belirlemek için R_L sabiti hesaplanır ve 0 ile 1 arasındaki değerler adsorpsiyon kullanılabilirliğinin elverişlilik durumunu gösterir.

$$R_L = \frac{1}{1+bC_0} \quad (2.3)$$

Burada; b değeri Langmuir sabitini (L/mg) C_0 değeri ise maddenin çözeltideki başlangıç konsantrasyonunu (mg/L) ifade etmektedir. Adsorpsiyonun elverişlilik durumunu gösteren farklı R_L değerleri için ifade ettiği durumlar Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Boyutsuz ayırma sabiti (R_L) değerleri ile izoterm tipleri arasındaki ilişki

RL Değerleri	Adsorpsiyon
$RL > 1$	Elverişli olmayan
$RL = 1$	Lineer
$0 < RL < 1$	Elverişli
$RL = 0$	Tersinmez

Freundlich Adsorpsiyon İzotermi

Freundlich tarafından incelenen bu izoterm modeli, daha çok sıvı çözelti adsorpsiyonu için kullanılsa da gaz adsorpsiyonu için uygun bir yöntemdir (Yang vd. 2018). Freundlich izotermi, fiziksel etkileşimler sonucu heterojen yüzey ortamlarında oluşur ve yüzey alanı nedeniyle çok katmanlı sistemlerde kullanılır (Khani vd. 2016).

Freundlich izotermi, heterojen bir yüzey üzerinde dengenin sağlanmasında aktiftir ve tek tabakanın hacmi, çözeltinin konsantrasyonu ile adsorbe edilen malzeme miktarının oranı arttığında dikkate alınmaz (Freundlich 1906).

Freundlich denklemi Eşitlik 2.4'de verilmiştir.

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \quad (2.4)$$

Burada K_F (mg/g) ve n (L/mg) değerleri sırasıyla adsorpsiyon kapasitesini ve heterojenlik faktörünü ifade eden Freundlich sabitleridir. Bu sabitleri elde etmek için Eşitlik 2.4'ün logaritması alınarak Eşitlik 2.5'te verilen lineer Freundlich izotermi elde edilir.

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \cdot \log C_e \quad (2.5)$$

$\log q_e$ ile $\log C_e$ değerleri arasındaki grafikte elde edilen doğrunun eğimi ve kesim noktası kullanılarak sırasıyla n ve K_F elde edilir. n değerinin 1'den düşük çıkması adsorpsiyon işleminin doğruluğunu gösterir.

Adsorpsiyon Kinetikleri

Adsorpsiyon sürecinin kinetik çalışmaları, adsorpsiyon oranını ilgilendiren ve uygun bir süre içerisinde dengeye gelmesine destek olan deneysel koşulların dikkatli bir şekilde gözlemlenmesini barındırır. Bu tür çalışmalar, olası adsorpsiyon mekanizması ve olası adsorbat-adsorbat etkileşim durumu için bilgi sağlar ve etkileşimleri açıklamak için makul matematiksel şekillerin geliştirilmesine destek olur. Adsorpsiyon kinetiği, bir adsorbanın bir adsorpsiyon yüzeyinde adsorpsiyonunu hangi mekanizmanın etkilediğini göstermek için kullanılır. Bu durumda literatürde çeşitli kinetik modeller önerilmiştir. Bu modellerden en sık tercih edilenleri; yalancı birinci dereceden kinetik model, yalancı ikinci dereceden kinetik model ve parçacık içi difüzyon modeli.

Adsorpsiyon dengesinin oluşabilmesi amacıyla geçen süreyi adsorpsiyon kinetiği ile tanımlanır. Bunun için farklı adsorpsiyon çeşitleri ile ifade edilir. Adsorpsiyon prosesinin adsorplama kapasitesini kavrayabilmek için genel mekanizma aşağıdaki gibidir (Lagergren 1998).

- Sıvı veya gaz halindeki adsorbat, adsorban tanımlayıcı katmana yayılır. Bu durum adsorpsiyon mekanizmasına esneklik kazandırdığı için dikkate alınmayabilir.

- Sınır tabakaya hareket eden adsorbat, durgunluk noktasından geçerek adsorbanın gözenek yoğunluğuna hareket eder. Bu fenomene sınır tabakası difüzyonu denir.
- Adsorbat, adsorpsiyonun meydana geldiği yüzeye hareket ederek adsorbanın gözeneklerine doğru ilerler.
- Son olarak adsorbanın adsorpsiyon işlemi için gerekli olan yüzey bağlanması gerçekleşir (Çiftci 2021).

Adsorbent durağan fazda ise ilk adım yavaştır yani adsorpsiyon hızı denir. Akışkan hareketi zamanla artarsa, yüzey tabakası azaldıkça adsorpsiyon hızı artar. Reaksiyonun son basamağı çok hızlı olduğu için reaksiyonun hızı ölçülemez ve birinci basamağın yavaşlığından dolayı 2. ve 3. basamak elde edilemez. Adımlar, bir reaksiyonun hızını belirleyen adım olarak düşünülebilir. Bu, Adım 2 işleminin ilk birkaç dakikasında gerçekleştiği için, Adım 3'ün reaksiyon hızını belirlediği sonucuna varılabilir (Uzgör 2008).

Yalancı Birinci Derece Kinetik Modeli

Yalancı birinci dereceden kinetik modeli genellikle Eşitlik 2.6'daki gibi ifade edilir (Lagergren 1898).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_l(q_e - q_t) \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6'nın integrali alındığında, denklem Eşitlik 2.7'ye dönüşmektedir.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.7)$$

Burada; q_e ve q_t değerleri sırasıyla denge ve t zamanında adsorplanan madde miktarlarını (mg/g), k_1 değeri ise hız sabitini (1/dk) ifade etmektedir.

Yalancı İkinci Derece Kinetik Modeli

Yalancı ikinci dereceden kimyasal absorpsiyon kinetik modeli Eşitlik 2.8'deki gibi gösterilir (Ho 2004).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.8)$$

Bu eşitlik ise limit değerlerle birlikte entegre edildiğinde Eşitlik 2.9 elde edilir.

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.9)$$

Burada; k_2 değeri yalancı ikinci dereceden hız sabitini (g/mg.dk) ifade etmektedir. Eşitlik 2.8'in lineer duruma getirilmesi ile Eşitlik 2.10 ve Eşitlik 2.11 elde edilir.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.10)$$

$$h = k_2 \cdot q_e^2 \quad (2.11)$$

Burada h değeri başlangıç absorpsiyon hızını ifade etmektedir (mg/g.dk)

Adsorpsiyon Termodinamiği

Termodinamik, sıcaklık anlamına gelen "termo" ve sıcaklıktaki değişiklik anlamına gelen değişim anlamına gelen "dinamik" kelimelerinden türetilmiştir. En önemli doğa olaylarından biri de tüm değişim ve dönüşümlere eşlik eden enerjidir. Termodinamik, fiziksel veya kimyasal değişim yoluyla bir sistemin enerjilerini belirleyen iç ve serbest enerji, entalpi ve entropi gibi reaksiyon koşullarını inceler.

Serbest enerjideki değişim (ΔG°), reaksiyonun kendiliğinden gerçekleşip gerçekleşmediği adsorpsiyon sırasında meydana gelen entropideki (ΔS°) değişimden anlaşılabilirken, gaz veya sıvı bir ortamda daha düzensiz parçacıklar düzenli hale gelir.

Normal entalpi değişimi (ΔH°), reaksiyonun ısı değişimi hakkında bilgi verir. Bu oran, reaksiyonun kendiliğinden oluştuğunu gösterir. Spontan kimyasal reaksiyonlarda, standart ΔG° negatif olur. ΔG° pozitif ise, serbest enerjinin arttığını ve reaksiyonun ters, istenmeyen yönde ilerlediğini gösterir ve standart entalpi değişimi (ΔH°) ve standart entropi değişimi (ΔS°) olmak üzere iki termodinamik fonksiyon içerir. Entalpi, sabit basınç altında her durumda sistem ile çevre arasında yapılan işi ve iç enerjiyi tanımlayan bir fonksiyondur. Entropi durum fonksiyonu, evrenin çalışma kapasitesindeki değişimin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. ΔG° , ΔH° ve ΔS° değerleri Eşitlik 2.12 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.12)$$

Burada ΔG° değeri Gibbs serbest enerjisini (kJ/mol), ΔH° değeri entalpi değişimini (kJ/mol), ΔS° değeri standart entropi değişimini (kJ/mol.K) ve T değeri mutlak sıcaklık değerini (K) ifade etmektedir.

Farklı sıcaklıklarda yapılan adsorpsiyon çalışmalarının ΔG° 'ın denge sabiti olan K_c değeri Eşitlik 2.13 kullanılarak hesaplanır. Sonrasında Eşitlik 2.14'te verildiği üzere $\ln K_c$ değerine karşı $1/T$ grafiği çizilerek elde edilen doğrunun eğiminden ΔH° , kesim noktasından ΔS° değerleri hesaplanabilmektedir.

$$\Delta G^\circ = -R.T.\ln K_c \quad (2.13)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{R.T} \quad (2.14)$$

Burada; R değeri ideal gaz sabiti olup, 8,314 J/mol.K değerine eşittir.

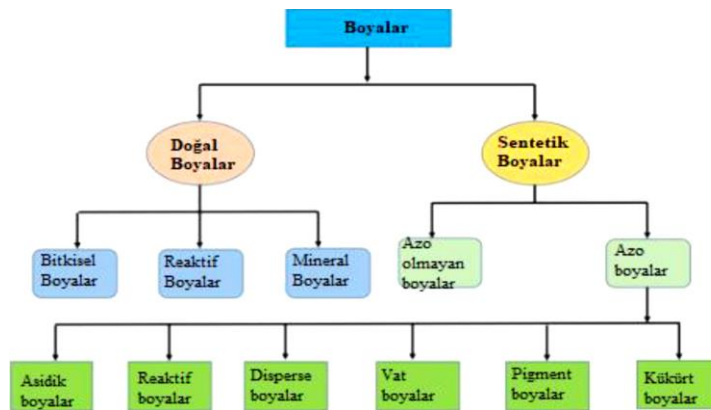
Adsorpsiyonun Kullanıldığı Prosesler

Adsorpsiyon işlemi, fazla derecede saflaştırma sağladığı için genellikle son saflaştırma adımı olarak kullanılır (Noll vd. 1992). Adsorpsiyonun kullanıldığı bazı prosesler, aşağıda maddeler halinde yazılmıştır (Özer 2004).

- Gazların gazlardan ayrılması,
- Buharların gazlardan ayrılması,
- Sıvıların renginin ve şeffaflığının giderilmesi,
- Su sertliğinin giderilmesi,
- Sıvılardan çözünmüş gaz ve koloidal partiküllerin ayrıştırılması,
- Tıpta sıvılarda çözünen toksik maddelerin ayrıştırılması,
- Kesirli işlemlerde kullanılır.

Boyar Maddeler

Boyar maddeler, genellikle tekstil endüstrisinde kumaş ve elyafları renklendirmek için tercih edilen organik maddelerdir. Boyaların boyanma işlemi kimyasal veya fizikokimyasal adımlardan oluşur ve kazıma, yıkama gibi işlemlerle renk solması olmaz (Başer ve İnancı 1990). Adsorpsiyon, çöktürme, pıhtılaşma (koagülasyon-flokülasyon) ve kimyasal oksidasyon gibi kimyasal arıtım işlemlerinde, tekstil atıksularından rengin gideriminde oldukça fazla tercih edilmektedir. (Selçuk 2004). Organik boyalar ise tekstil sektörü başta olmak üzere endüstriyel alanlarda atıksuları kirletmektedir. Öte yandan bu boya tasarrufları ciddi kafa karışıklığına neden oluyor. Boya molekülleri, aromatik yapı gibi görünür ışığı emen kimyasal yapılar içerir. Boyama, yıkama ve boyama sırasında büyük miktarda su gerektiren liflere renk verme işlemidir (Kuvancı 2021). Tekstil endüstrisinde çok çeşitli boyalar kullanılmaktadır. Tekstil endüstrisinde kullanılan farklı boyalar Şekil 4'te gösterilmektedir (Shabir vd. 2022).



Şekil 4. Tekstil endüstrisinde kullanılan çeşitli boyalar

Boyar Maddelerin Sınıflandırılması

Boyalar kaynaklarına, kimyasal yapılarına, endüstriyel uygulamalarına, nükleer yapılarına, renk indeks sayılarına, fiziksel ve kimyasal bağ yapılarına, boyanacak tekstil liflerine, çözünürlüklerine ve daha birçoklarına göre sınıflandırılabilir (Sardar vd. 2021). Bu gruplandırmanın en yaygın olanları Tablo 2.'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Boyar maddelerin sınıflandırılması

Çözünürlüklerine göre	Kimyasal yapılarına göre	Boyama özelliklerine göre
• Suda çözünen boyarmaddeler • Zwitter iyonik karakterli boyarmaddeler • Suda çözünmeyen boyarmaddeler • Substratta çözünen boyarmaddeler • Katyonik boyarmaddeler • Anyonik boyarmaddeler	• Anyonik boyar maddeler • Anyonik boyar maddeler • Anyonik boyar maddeler • Arilmetin boyar maddeler	• Bazik boyarmaddeler • Asidik boyarmaddeler • Direkt boyarmaddeler • Metal kompleks boyarmaddeler • Reaktif boyarmaddeler • Pigment boyarmaddeler • Sülfür boyarmaddeler

Kimyasal yapılarına göre ayırma, en uygun gruplandırma yöntemlerinden biridir. Özellikleri sayesinde boyaların hangi sınıfa ait olduğunu belirlemek kolaydır. Uygulamaya ve boyama mekanizmasına göre (tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılır) en çok kullanılan boyalar Tablo 3'te gösterilmiştir (Ismail ve Sakai 2021).

Tablo 3. Boya türlerinin tanımı

Boyanın Tipi	Tanım	Uygulanabilirlik
Reaktif	Lifler üzerindeki nükleofilik bölgelerle kovalent bağlar oluşturmak üzere reaksiyona girebilen kromoforlar içeren boyalardır	Pamuk, keten, yün ipek
Dispers	Suda çözünürlüğü çok düşük olan boyalardır. Suda dağıldığında, Van der Waals kuvvetleri nedeniyle elyafa renk katar ve bu da nispeten düşük bir dirençle sonuçlanır.	Naylon, akrilik, polyester

Direkt	Adsorpsiyon ile liflere tutunan, kullanımı kolay boyalardır.	Pamuk, keten, suni ipek, yün ipek
Asit	2-6 pH aralığında kullanılan anyonik boyalardır. Boya, boya ve lifler arasındaki iyonik bağ yoluyla aktarılır.	İpek, yün, naylon
Bazik	Amin grupları içeren ve alkolde yüksek oranda çözünen katyonik boyalar, genellikle bir boya macunu oluşturmak için etanol ile birlikte kullanılır. Bu nedenle, boya ile liflerin negatif yüklü bileşeni arasında iyonik bir bağ ile boyama, çoğu doğal lif pozitif yüklü olduğu için kullanılabilirliği sınırlar.	Akrilik, suni ipek

Reaktif Boyar Maddeler

Tekstil endüstrisindeki en popüler boyalardır. Çok yönlü kullanım, yüksek dayanıklılık (renk akmasına ve solmasına karşı direnç) ve geliştirilmiş renk gamı sunar. Reaktif boyaların yüksek hızları, özellikle selüloz liflerinde bazik koşullar altında hidroksil grupları ile kovalent bağlar oluşturabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu boya grubu en güvenli boyalardan biridir (Ismail ve Sakai 2021). Suda çözülebilirler. Kumaş ile kovalent bağ oluşturabilen tek boya grubudur. Bu grubun boyaları yün, selüloz elyafı, poliamid ve ipeğin boyanmasında kullanılır (Uysal 2010).

Reaktif boyar madde:

- **Ç (Çözünür Grup):** Boyanın suda üniform çözünmesini sağlayan gruplardır. Sülfon grupları genellikle mevcuttur.
- **R (Renkli, Kromofor Grup):** Boyar maddeye renk veren kısımdır.
- **K (Köprü Grubu):** Boyayı reaktif gruba bağlayan gruplardır. Bunlar -NH₂, -CO ve -SO₂ gibi gruplardır. Köprü görevi görmek gib sorumlulukları da vardır. Örneğin reaktif grubun reaktivitesini etkiler.
- **X (Reaktif Grubu):** Sübstitüsyon reaksiyonu sonucu yer değiştiren gruptur. H⁺, Cl⁻ ve SO₂CH₃ gibi.

Reaktif boyar soğukta boyanan (yüksek reaktifliğe sahip olan) ve sıcakta boyanan (düşük reaktifliğe sahip olan) boyar maddeler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Fabrika atıksularındaki reaktif boyaların konsantrasyonları oldukça fazladır. Boyama işlemi sonrasında yıkama daha fazla su, enerji ve zaman tüketir.

Dispers Boyar Maddeler

Dispers boyalar başlangıçta selüloz asetatı boyamak için geliştirilmiştir. Daha sonra naylon, selüloz asetat ve polyesteri boyamak için kullanıldı. 1949'da Terilenin ticari olarak geliştirilmesine kadar, boya üreticileri polyester elyaflara yöneldi. Boyaların geliştirilmesine odaklanmadı. 1950'ler ve 1960'larda polyester elyaf üretimi ve sonuç olarak bu boyalar bir boyaya dönüştü (Sunguray 2010).

Direkt Boyar Maddeler

Bu boyar madde grubun piyasaya çıkan ilk boyası 1984 yılında Böttiger tarafından keşfedilen Congo Red'dir. Bu boyalara ön işlem yapılmadan doğrudan boyandıkları için direkt boyalar denmektedir. Direkt boyalar, asit boyalara benzer bir yapıya sahiptir, ancak daha büyüktür. Bu boyut farkı, onları hamur için daha önemli hale getirir; bu nedenle doğrudan renklere ana renkler de denir (Koh 2011).

Asidik Boyar Maddeler

Asit boyalar genellikle yün, ipek, poliamid, kâğıt, deri ve gıda boyamak için kullanılır. Molekülleri bir veya daha fazla SO_3H sülfonik asit grubu veya COOH karboksilik asit grubu içerir. Ana fark, asit boyaların naylon ile uygulanabilmesidir. Naylonun amino terminal grubu nedeniyle reaktif boyalar kovalent bağ oluşturamasa da naylonun fiziksel yapısı boyaları doğrudan etkilemektedir. (Chakraborty 2015).

Bazik Boyar Maddeler

Diğer boyalardan farklı olarak, ana renkler başlangıçta boyanır; renk sadece boya tuz halindeyken görülür. Bazik boyalar organik bazların klorür tuzlarıdır ve renkli

kısmı katyonlar halindedir. Ana benzersiz özellikleri, geniş renk yoğunluğu ve parlaklığıdır. Asit renklerle karşılaştırıldığında, temel renkler olağanüstü parlaklık ve yoğunluk sağlar. Fakat suda çözünürlükleri zayıftır ve alkali maddelere maruz kaldıklarında bozulabilirler.

Bazik boyalar, doğrudan veya asit boyalar gibi diğer anyonik boyalarla reaksiyona girip çökdikleri için kullanılamazlar (Benkhaya 2020). Çok az yıkama ve hafif yün, pamuk ve ipek gerektirir. 80-90°C'de boyama genellikle tanik asit ve asetik asit ile yapılır (Başer ve İnancı 1990; Bozdoğan 1984; Gezerger 1998; Uysal 2010).

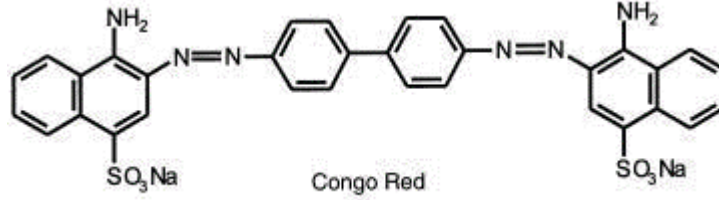
Boyar Maddelerin Atık Sulardan Giderilmesi

Hayatın gereklerine göre dünyada ve ülkemizde sanayi faaliyetleri günden güne daha fazla gelişmektedir. Bu gelişme sonucunda, tekstil endüstrisi büyük ölçüde miktarda atıksu üretmektedir. Atıksuyun boyanması, atıksu üretimine en büyük katkıyı yapandır. Boyaların toksisitesi, özellikle ekolojik açıdan boyaların atıksulardan uzaklaştırılmasının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Yıldız 2008). Boya üretiminin ve boya tüketen endüstrilerin hızla büyümesi, her geçen gün daha fazla su kaynağını tehdit etmektedir. Boya açısından zengin atıksuların uygun şekilde arıtılmadan bertaraf edilmesi birçok çevre sorununa neden olabilmektedir (Khatri vd. 2015). Örneğin tekstil boyalarının önemli bir parçası olan azo boyalarının kanserojen olduğu bilinmektedir. (Couto 2009). Fiziksel giderim yöntemlerinden biri olan adsorpsiyon prosesi, adsorpsiyon kayıpları, rejenerasyon maliyetleri ve adsorpsiyon atıkları gibi halen çözülmemiş birçok problem olmasına rağmen; Tehlikeli maddeler üretmemesi, basit iş süreci, ucuz ve mükemmel etki yaratmaması nedeniyle boya içeren atıksuların arıtımında en çok kullanılan yöntemdir (Crini 2006; Mu ve Wang 2016; Zhou vd. 2019).

Congo Red

Asit boyalardan Congo red, benzidin diazobis-1, naftilamin-4-sülfonik asidin sodyum tuzu ve bir azo boyadır. Congo red suda çözünen ancak etanol gibi organik çözücülerde daha fazla çözünen bir boyadır. Güçlü ve rijit yapısı nedeniyle selüloz

liflerine benzemektedir. Congo red boyar maddesi aynı zamanda asit-baz göstergesi olarak da kullanılmakta olup Congo red boyar maddesinin moleküler yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Congo red boyasının moleküler yapısı

Erzurum Şeker Fabrikası

Yüzyıllar boyunca en önemli insan gıdalarından biri olmuştur ve 18. yüzyıla kadar şeker kaynağı olarak sadece şeker kamışı kullanılmıştır. Şeker pancarında şeker varlığı ilk olarak 18. yüzyılda Almanya'da yapılan çalışmalarda fark edilmiştir. Ancak şeker pancarından elde edilen şeker, şeker kamışından elde edilen şekerden daha pahalı olduğu için 19. yüzyılın başlarında bir üretim fabrikası kurmak mümkün olmuştur. Avrupa ve ülkemiz coğrafyasının şeker kamışı ekimine uygun olmaması, şeker üretiminde şeker pancarını öncelikli hale getirmiştir.

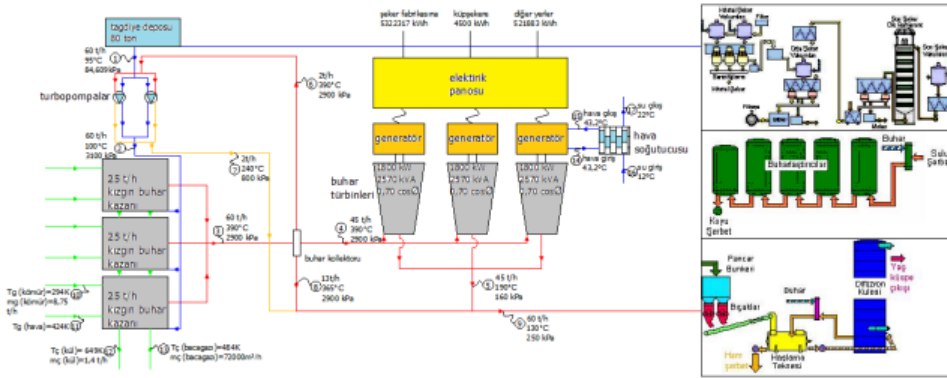
Erzurum Aziziye ilçesinde faaliyet gösteren Şeker Fabrikası Tesisinin kuruluş tarihi 1956'dır. Kapasitesi yılda yaklaşık olarak 50.500,00 ton/yıl'dır. Fabrikanın üretim alanları şu şekildedir; Ana ürün olarak kristal toz şeker, yan ürün olarak küspe, melas. Fabrikada oluşan atıksuların giderimi için izlenen yol şu şekildedir, atıksular atıksu arıtma tesisinde bertaraf ediliyor. Diğer atıklar bertaraf firmalarına gönderiliyor. Atıksu arıtım kapasitesi yaklaşık olarak 150 m³/sa'tir.

Çalışmamızda kullanılan numuneler aerobik havuz çamurundan alınmıştır ve çamur hem aerobik havuzdan hem de anaerobik havuzdan kaynaklanabilmektedir. Bu durum o yılki çamur miktarına göre değişim göstermektedir. Atıksuların arıtımı aşağıdaki sıralama ile gerçekleşmektedir.

- Oluşan atıksular çamur havuzlarına alınmaktadır.

- Daha sonra dengeleme havuzuna alınmaktadır. Dengeleme havuzundan istediğimiz debi ayarlanarak ısıtıcılardan geçirilip şartlandırma havuzuna alınmaktadır.
- Asit ve nutrientleri verildikten sonra reaktöre (anaerobik havuz) alınıp oksijensiz arıtım ardından aerobik havuza alınıp havuzun orta kısmında bulunan anoksik havuza alınmaktadır.
- Daha sonra taşkın yaparak dış bölmede blowerlarla havalandırılıp oksijenli arıtım gerçekleştirilmektedir. Bu aşamadan sonra son durultma havuzuna alınıp çamuru çökeltilip deşarj edilmektedir.

Erzurum Şeker Fabrikası üretim akış şeması Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Erzurum şeker fabrikası üretim akış şeması

Tarlalardan toplanan şeker pancarının fabrikaya alınır. Analiz edilir. Kullanım için silolarda istif edilir. Çalışma dönemi süresi içerisinde yüzdürme suları ile fabrika içerisine alınır. Fabrikada pancarlar önce yıkanır. Difüzyon kulesinde içerisinden şekeri alınan pancar küspe ve şerbet olmak üzere iki ürün elde edilir. Şerbet önce şeker dışı maddelerden kireçleme ile arındırılır. Daha sonra tepir dediğimiz buharlaştırıcılarda kaynatılarak briksi artırılır. Bu aşamada koyu şerbet dediğimiz 65 biriksli ara ürün elde edilmiş olur. Daha sonra koyu şerbet pişirim aparatları olan vakum kazanlarına alınarak önce mayalanır daha sonra lapa dediğimiz ürün elde edilir. Lapa santrifüjlerde işlenerek Kristal toz şeker elde edilir. Elde edilen şeker kurutma ünitelerinden geçirilerek paketlenir satışa hazır hale getirilir. Santrifüjlerden elde edilen şuruplar ise orta şeker ve

son şeker aşamalarında yeniden işlenerek şeker kısmı alınır eritilir yeniden işlenir. Şurup kısmı ise 3. Bir ürün olan melas tanklara gönderilerek satışa sunulur. Koyulaştırılarak rafineri birimine sevk edilir. Rafineride pişirim yapılarak lapa oluşturulur. Santrifüjlerde şeker ve şurup ayrılır. Şeker kurutma ünitesinde neminden arındırılarak ambalajlamaya ve akabinde satış için ambara sevk edilir.

Atıksular pancarın silolardan fabrika içine alınırken yüzdürme işleminden kaynaklanan çamurlu sular ve proses içerisinde kaynaklanan atıksular olmak üzere fabrikanın 2 aşamasından kaynaklanmaktadır. Bunlar üretim tanklarının yıkanması taşmalar sonucu yerlerin yıkanmasından kaynaklanan atıksular. Bertaraf edilmek istenen arıtma çamurları, fabrikadan kaynaklanan atıksular fabrikanın biyolojik arıtma tesisinde arıtılırken anaerobik ve aerobik havuzlarda arıtım çamurları oluşur.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışmada kullanılan adsorbent, Erzurum ili Aziziye ilçesi sınırları içerisinde faaliyet gösteren şeker fabrikasında pancar üretimi sürecinde açığa çıkan atıksuların aerobik ve anaerobik olarak biyolojik arıtımı sonucunda oluşan çamurların kurutulmasıyla elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan Congo red boyar maddesinin özellikleri Tablo 4’de verilmiştir. Boya çözeltisinin doğal pH değeri 10,8 olup, adsorbent ilavesi yapıldıktan sonra pH değeri 11,3 olarak ölçülmüştür. Boya çözeltileri, 1 M NH₃ ve 1 M HCl kullanılarak istenilen pH değerlerine ayarlanmıştır. Atıksuyun pH ayarlanması ve analizler için kullanılan bütün kimyasallar analitik saflıktadır.

Tablo 4. Atıksu oluşumuna neden olan boyanın bileşimi ve içeriği hakkında bilgi

Moleküler Formülü	C ₃₂ H ₂₂ N ₆ Na ₂ O ₆ S ₂
Mol Kütlesi	696,665 g/mol
Kaynama Noktası	>360 °C
CAS NO	573-58-0
Ağırlık %	<50
Zararlılık İşareti	H225

Adsorbentin Hazırlanması

Denemelerde kullanılacak olan arıtma çamuru havan kullanılarak öğütülerek belirli boyutlara getirilmiştir. Ardından arıtma çamuru 3 gün süre ile belirli zaman aralıklarıyla 150 rpm karıştırma hızında saf su ile yıkanmıştır. Saf su ile yıkanan arıtma çamuru daha sonra 100 °C sıcaklıkta 48 saat boyunca etüvde kurutulmaya bırakılmıştır. Kurutulmuş olan bu materyaller 48 saat desikatörde bekletilmiştir. 2 gün boyunca Şekil 7’deki gibi havalandırılarak dinlendirilmiştir.



Şekil 7. Havalandırılmış arıtma çamuru

Öğütülmüş materyaller, $<0,01$, $0,01-0,18$ mm; $0,18-0,2$ mm; $0,2-0,5$ mm; $0,5-0,85$ mm gözenek çaplarına sahip olan eleklerden elenerek adsorpsiyon çalışmalarında kullanmak üzere hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan adsorbent, hassas tartımlar yapılarak 100 mL hacmindeki boya çözeltilerinde kullanılmıştır.

Boya Çözeltisinin Hazırlanması

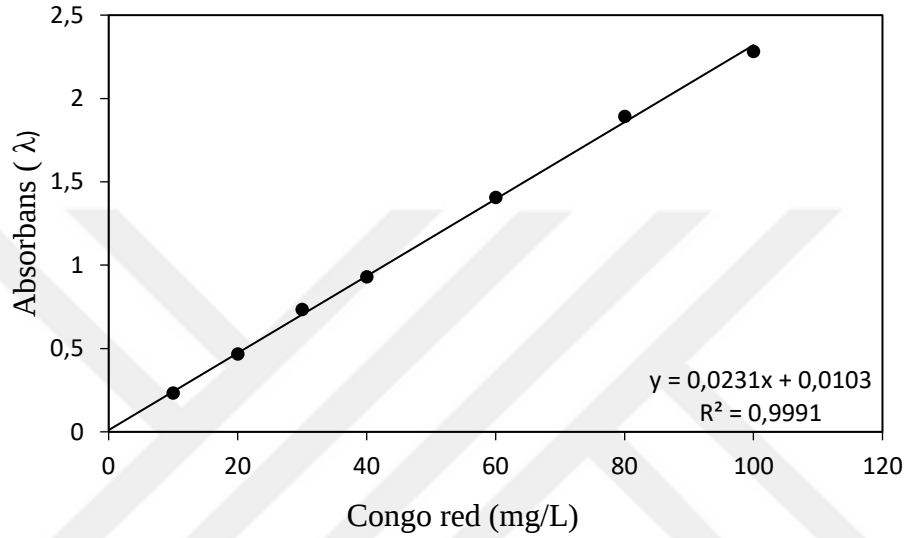
Congo red boyar maddesinden hassas tartım ile 1 g alınarak 1 L saf suda çözölmüş ve 1000 mg/L stok çözöltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan stok çözöltiden seyreltme işlemi ile 30, 50, 70, 100 ve 150 mg/L olacak şekilde farklı konsantrasyonlarda boya çözöltileri elde edilmiş ve her deney için 100 mL hacim kullanılmıştır.

Metot

Adsorpsiyon araştırma deneyleri için 100 ml'lik numuneler 250 ml'lik erlenlere aktararak kesikli bir deney sistemi hazırlanmıştır. Ayarlanabilir sabit sıcaklık ve sabit hareket hızına sahip çalkalayıcıda (Edmund Bühler GmbH Incubator Hood TH) adsorbentin boya çözöltisine eklenme anı $t=0$ kabul edilmiş ve belirli zaman aralıklarında numuneler alınmıştır. Alınan numuneler filtre kağıdından süzölmüş ve ortamda adsorplanmadan kalan boya çözöltisinin konsantrasyonu belirlenmiştir. Belirli zaman aralıklarında alınan numunelerin analizleri Spectroquant Phoro 300 adsorpsiyon spektrofotometresi kullanılarak yapılmıştır.

Standart Çözeltilerin Hazırlanması

1000 mg/L stok boya çözeltisinden 10, 20, 30, 40, 60, 80 ve 100 mg/L olacak şekilde seyreltmeler yapılarak standart çözeltiler hazırlanmıştır. Congo red boyar maddesinin spektrofotometrede analiz edileceği dalga boyu (λ) 495 nm olarak belirlenmiştir. Şekil 8’de Congo red boyar madde çözeltisinin kalibrasyon eğrisine ait grafik verilmiştir.



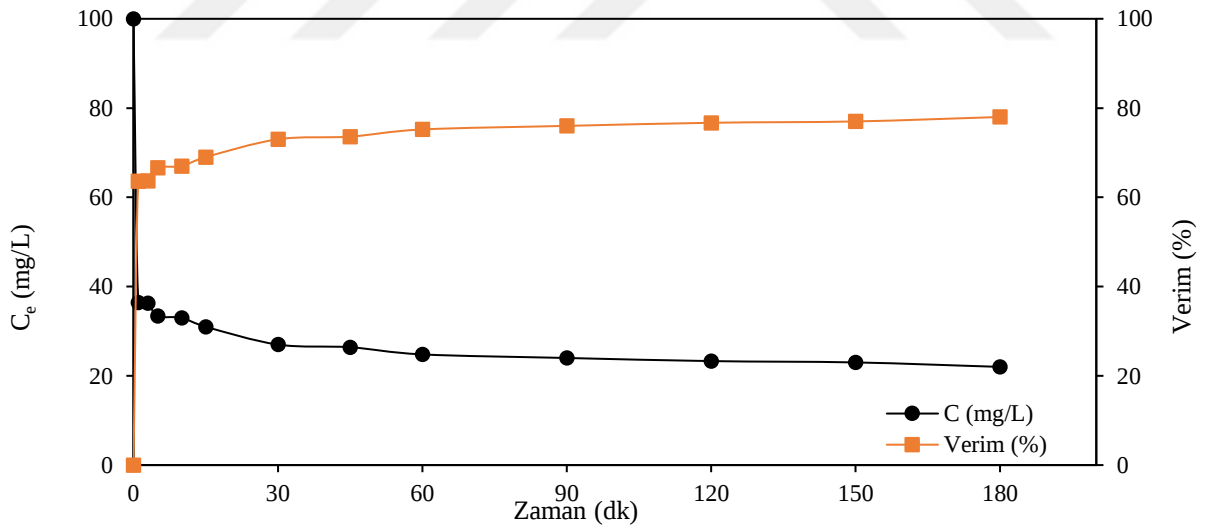
Şekil 8. Congo red boya çözeltisi için hazırlanan kalibrasyon eğrisi

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada adsorbent olarak şeker fabrikasından temin edilen arıtma çamuru kullanılmış ve Congo red boyar maddesinin adsorpsiyonu için temas süresi, başlangıç boya konsantrasyonu, adsorbent miktarı, karıştırma hızı, sıcaklık, partikül boyutu ve pH değişiminin etkileri incelenerek optimum giderim şartları belirlenmiştir.

Temas Süresinin Adsorpsiyona Etkisi

Temas süresinin Congo red boyar maddesinin adsorpsiyonu üzerine etkisinin incelendiği çalışmalar için 100 mg/L boya çözeltisinden 100 mL alınıp, bu çözelti içerisine 0,3 gr adsorbent ilave edilerek çözelti karıştırılmaya başlanmıştır. Sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 ve 180 dk sonra çözeltiden alınan örneklerin filtre kağıdı kullanılarak katı sıvı ayrımı yapılmış, elde edilen numunelerin spektrofotometrik olarak ölçümleri yapılmıştır. Congo red konsantrasyonlarının zamanla değişimi ve giderim verimleri Şekil 9’da gösterilmiştir.



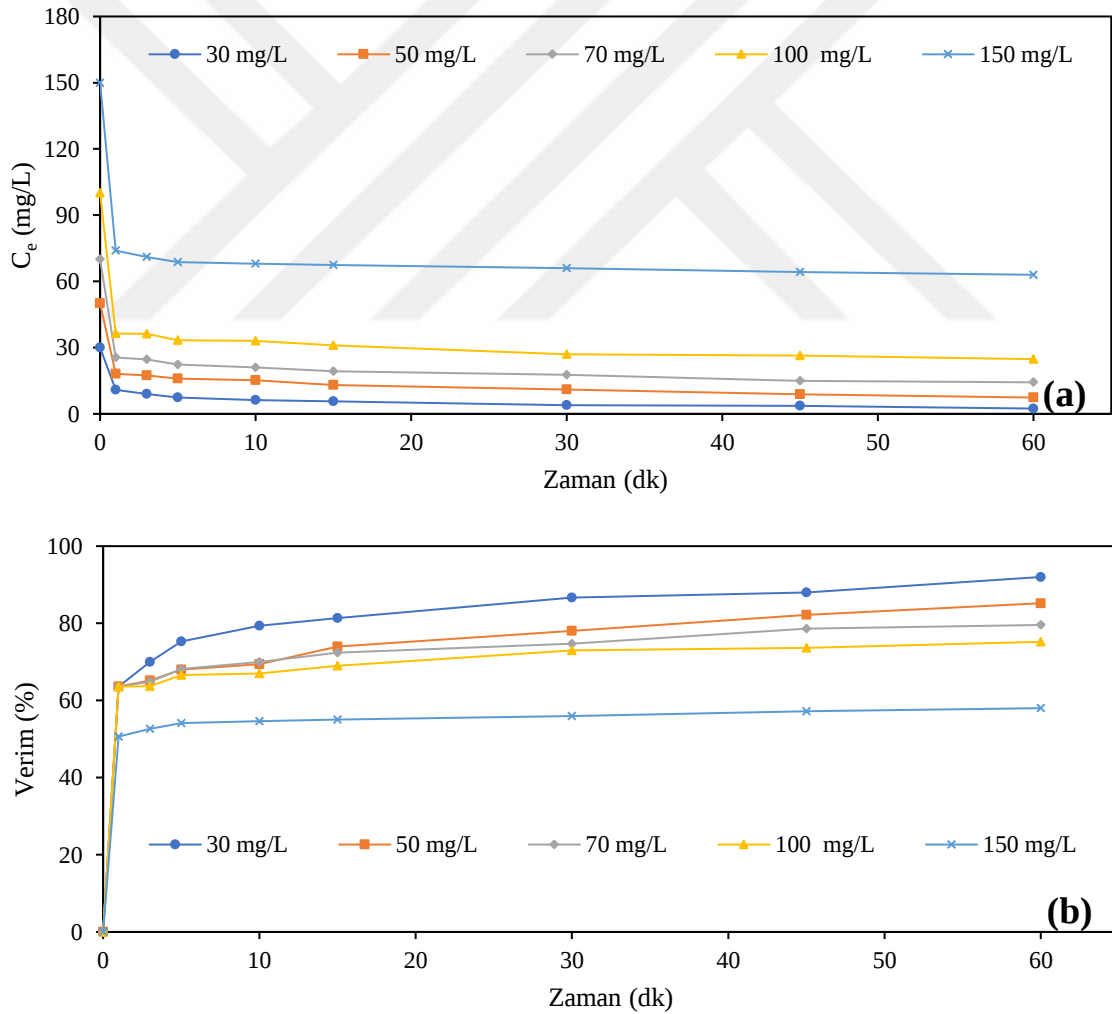
Şekil 9. Adsorplanmadan kalan boya madde konsantrasyonunun ve giderim veriminin zamanla değişimi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, T : 20°C , P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Şekil 9 incelendiğinde uygun zamanı belirleyebilmek için 180 dk boyunca çalkalama işlemi sürdürülmüş ve Congo red boya çözeltisinin adsorpsiyonunda giderim verimleri zamanla artış göstermiştir. İlk 15 dk’da adsorpsiyonun dengeye geldiği gözlenmiş ve 60 dk

sonunda giderim verimi %75,2, 180 dk sonunda ise %77 olarak belirlenmiştir. Elde edilen giderim verimleri karşılaştırıldığında 60 dk ve 180 dk sonunda yaklaşık %1,8'lik az bir fark olduğu, süre ve maliyetler dikkate alındığında ise deneye 180 dk boyunca devam etmenin ekonomik ve sürdürülebilir olmadığı görülmüştür. Bu nedenle sonraki deneyler için çalışma süresi 60 dk olarak kabul edilmiştir.

Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonunun Adsorpsiyona Etkisi

Adsorpsiyon prosesi genellikle artan başlangıç konsantrasyonları ile artmakta ve bu büyüme, tüm yüzeyin doygunluk konsantrasyonuna ulaşmasıyla sona ermektedir. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarının adsorpsiyona etkisi Şekil 10'da gösterilmiştir.



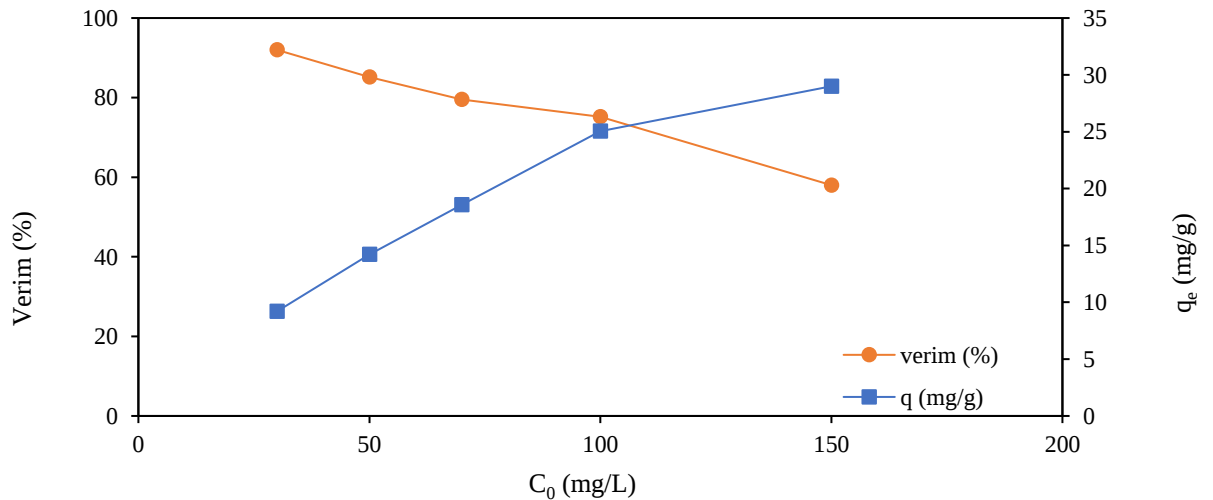
Şekil 10. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında; **(a)** adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonlarının zamanla değişimi, **(b)** giderim verimlerinin zamanla değişimi (t: 60 dk, m: 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, T:20°C , P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Şekil 10'dan görüleceği üzere Congo red boyar maddesinin doğal pH değerinde yürütülen deneylerde başlangıç konsantrasyonları 30 mg/L, 50 mg/L, 70 mg/L, 100 mg/L ve 150 mg/L olarak ayarlanmıştır. Adsorpsiyon verimleri incelendiğinde 30 mg/L başlangıç konsantrasyonunda giderim veriminin %92, 50 mg/L başlangıç konsantrasyonunda giderim verimi %85,2 ve 70 mg/L başlangıç konsantrasyonu için ise %79,5'lik bir adsorpsiyon verimi elde edilmiştir. Başlangıç konsantrasyonu 100 mg/L'ye çıkarıldığında %75,2 olan adsorpsiyon verimi 150 mg/L için %58 olarak tespit edilmiştir. x/m değerleri incelendiğinde 100 mg/L ve 150 mg/L başlangıç konsantrasyonları için adsorpsiyon kapasiteleri diğer başlangıç konsantrasyonlarına göre yüksek olup sırasıyla 25,06 ve 29 mg/g olarak hesaplanmıştır. Giderim verimleri ve x/m değerleri göz önünde bulundurularak sonraki denemelerde başlangıç boyar madde konsantrasyonunun 100 mg/L olarak ayarlanmasına karar verilmiştir.

Tablo 5 ve Şekil 11'de farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında, giderim verimleri (%) ve birim kütle başına adsorplanan boyar madde konsantrasyonlarının ($q=x/m$) değişimleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

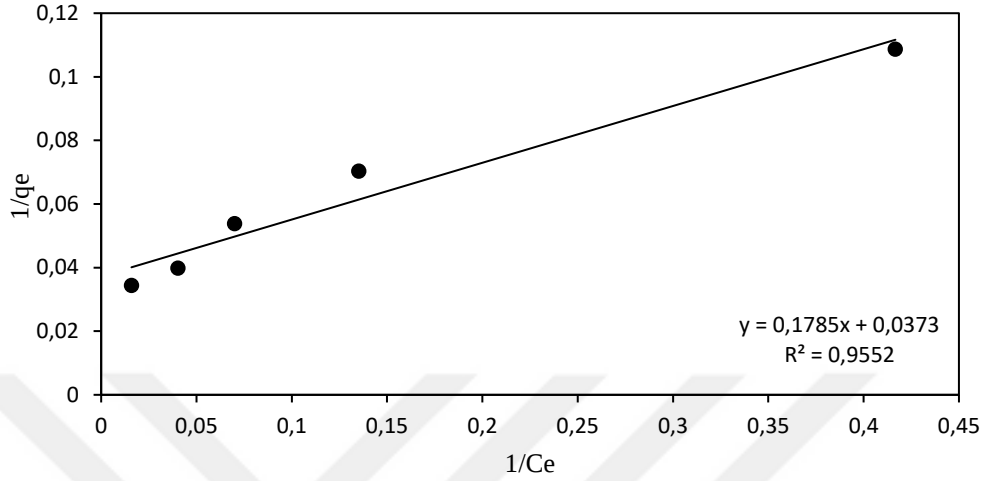
Tablo 5. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında % verim ve q değerlerinin değişimi (t: 60 dk, m: 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, T: 20°C , P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

C_0 (mg/L)	Verim (%)	$q = x/m$ (mg/g)
30	92	9,2
50	85,2	14,2
70	79,5	18,52
100	75,2	25,06
150	58	29

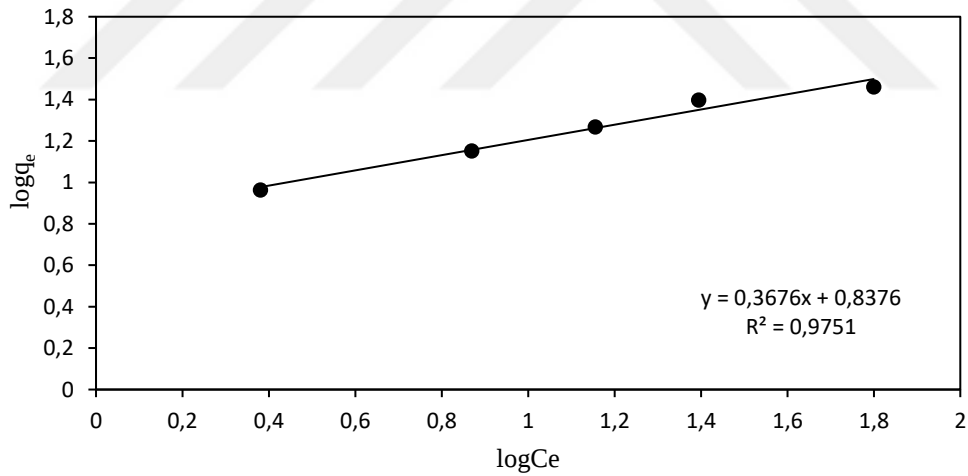


Şekil 11. Başlangıç boyar madde konsantrasyonu değişiminin adsorpsiyon verimi ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi (t: 60 dk, m: 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, T: 20°C , P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Başlangıç boyar madde konsantrasyonlarının değişimlerinin etkilerinin incelendiği çalışmalar sonunda varılan bilgiler kullanılarak, verilerin Langmuir ve Freundlich izoterm modellerine uygunluğunun tespit edilmesi için çeşitli hesaplamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 12 ile Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 12. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında elde edilen Langmuir izotermi (m: 0,3 g/L, K.H:200 rpm, t: 60 dk, T:20° C , P.B. : 0,2-0,5 mm, pH:11,3)



Şekil 13. Farklı başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında elde edilen Freundlich izotermi (m: 0,3 g/L, K.H:200 rpm, t: 60 dk, T:20° C, P.B. : 0,2-0,5 mm, pH:11,3)

Şekil 12 ve Şekil 13 incelendiğinde Freundlich izoterminin Langmuir izoterminden daha başarılı sonuçlar verdiği açıkça görülebilmekte olup Langmuir ve Freundlich izotermi için R^2 değerleri sırasıyla 0,9552 ve 0,9751 olarak hesaplanmıştır. Langmuir ve Freundlich izotermi için R^2 değerlerinin yanı sıra hesaplanan diğer sabitlerin değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

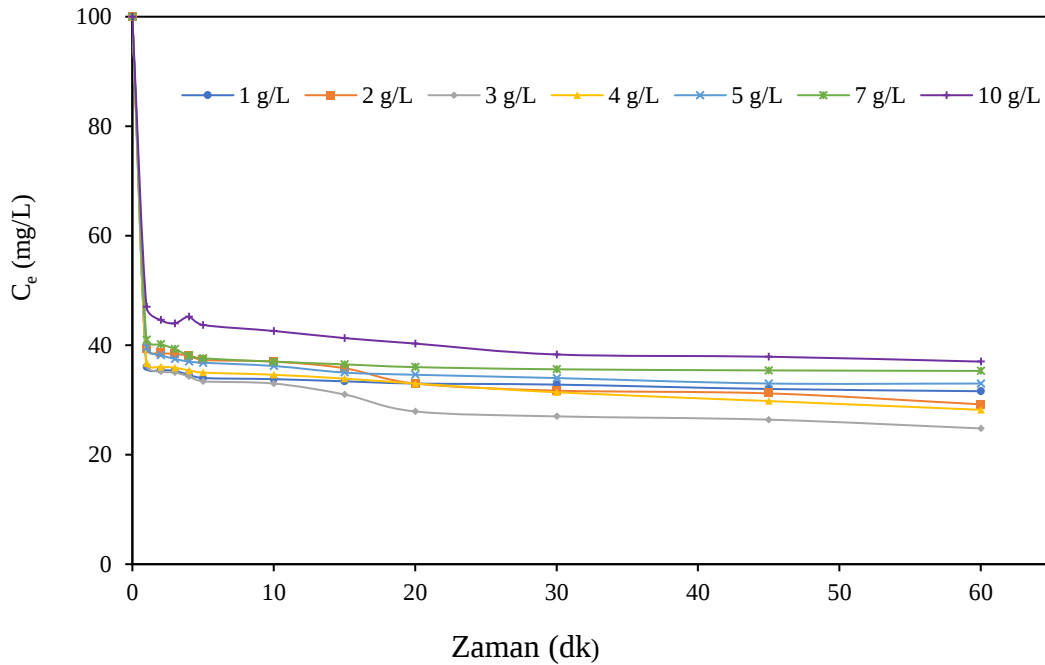
Tablo 6. Langmuir ve Freundlich izoterm sabitleri ve regresyon katsayıları (m: 0,3 g/L, K.H:200 rpm, t: 60 dk, T:20° C, P.B. : 0,2-0,5 mm, pH:11,3)

Langmuir izotermi			Freundlich izotermi		
K_L (L/mg)	a (mg/g)	R^2	K_F (mg/g)	n (L/mg)	R^2
0,2089	26,8096	0,9552	6,8801	2,7203	0,9751

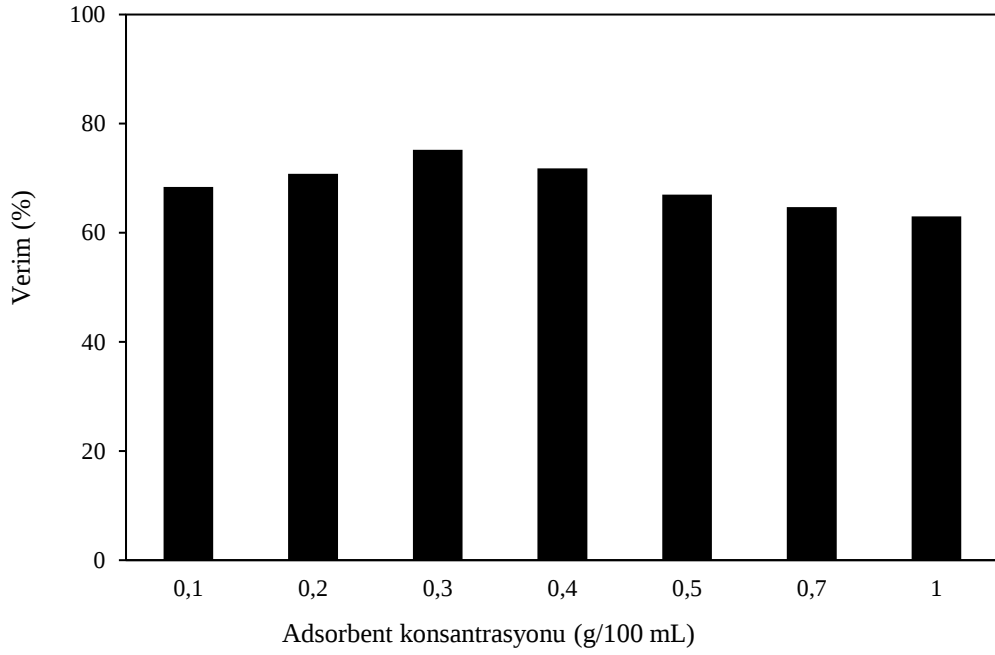
Tablo 6’da regresyon katsayıları incelendiğinde arıtma çamuru ile boyar madde adsorpsiyonunda Freundlich izoterminin Langmuir izoterminden daha uygun olduğu görülmektedir.

Adsorbent Konsantrasyonunun Adsorpsiyona Etkisi

Adsorbent konsantrasyonunun adsorpsiyon verimliliğine etkisinin incelendiği çalışmalar için 100 mg/L başlangıç konsantrasyonunda, 100 mL’lik boya çözeltisi hazırlanmış erlenlere 0,1 g, 0,2 g, 0,3 g, 0,4 g, 0,5 g, 0,7 g ve 1 g adsorbent dozları ilave edilerek deneyler yürütülmüştür. Belirli zaman aralıklarında alınan numuneler spektrofotometre yardımı ile ölçülerek elde edilen değerler Şekil 14 ile Şekil 15’te gösterilmiştir.



Şekil 14. Farklı adsorbent konsantrasyonlarında adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi (C_0 : 100 mg/L, K.H: 200 rpm, t: 60 dk, T:20° C, P.B: 0,2-0,5 mm, pH:11,3)

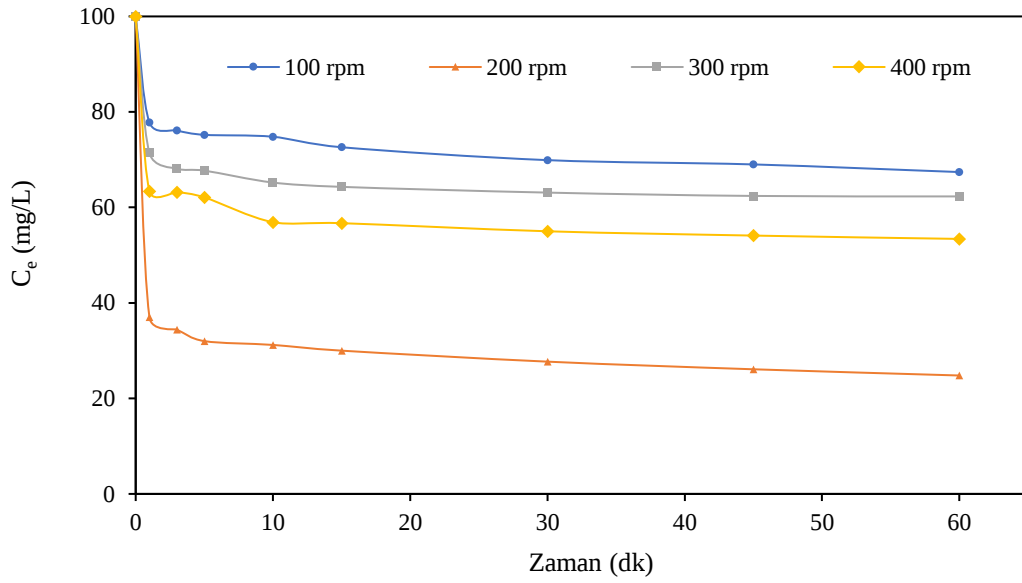


Şekil 15. Farklı adsorbent konsantrasyonlarının adsorpsiyon verimine etkisi (C_0 : 100 mg/L, K.H:200 rpm, t: 60 dk, T:20°C, P.B: 0,2-0,5 mm, pH:11,3)

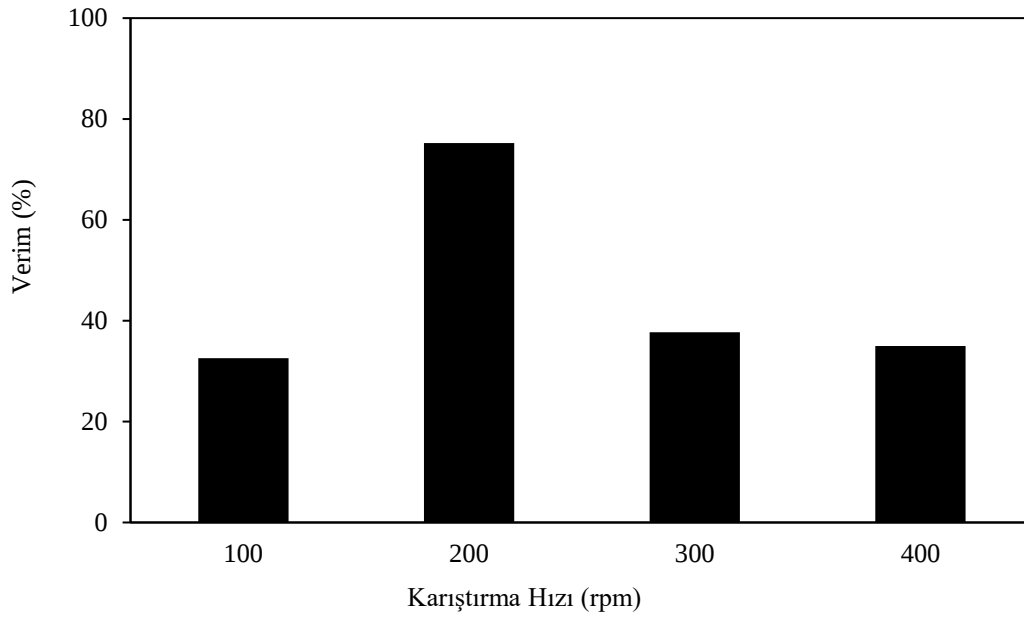
Şekil 14 ve Şekil 15 incelendiğinde 1 g/L için adsorpsiyon verimi %68,4 olarak belirlenmişken 2 g/L için bu değer %70,8'e ve 3 g/L için %75,2'ye yükselmiştir. Adsorbent konsantrasyonu 3 g/L'nin üzerine çıkarıldığında adsorpsiyon verimleri azalarak sabitlenmiştir. Maksimum adsorpsiyon veriminin 3 g/L'de gerçekleştiği göz önüne alınarak diğer çalışmalar için adsorbent konsantrasyonunun 3 g/L olmasına karar verilmiştir.

Karıştırma Hızının Adsorpsiyona Etkisi

Karıştırma hızının adsorpsiyon üzerindeki etkilerini gözlemlemek için deneyler 100, 200, 300 ve 400 rpm karıştırma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Zamana göre alınan numunelerin spektrofotometrik ölçümleri yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 16. Farklı karıştırma hızlarında adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, t : 60 dk, T : 20°C, P.B: 0,2-0,5 mm, pH:11,3)

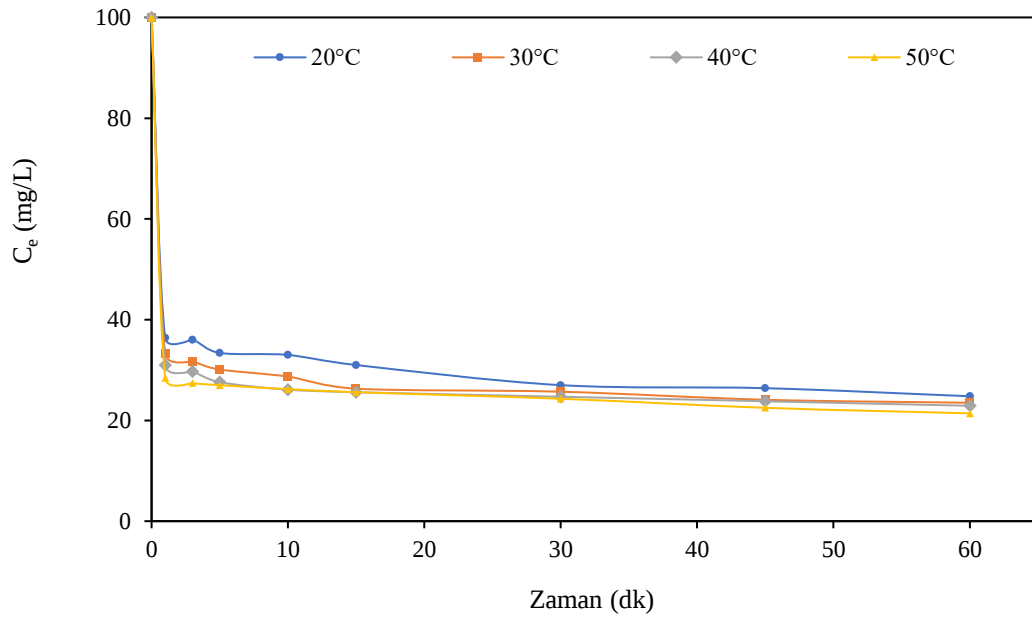


Şekil 17. Farklı karıştırma hızlarının adsorpsiyon verimine etkisi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, t : 60 dk, T : 20°C, P.B: 0,2-0,5 mm, pH:11,3)

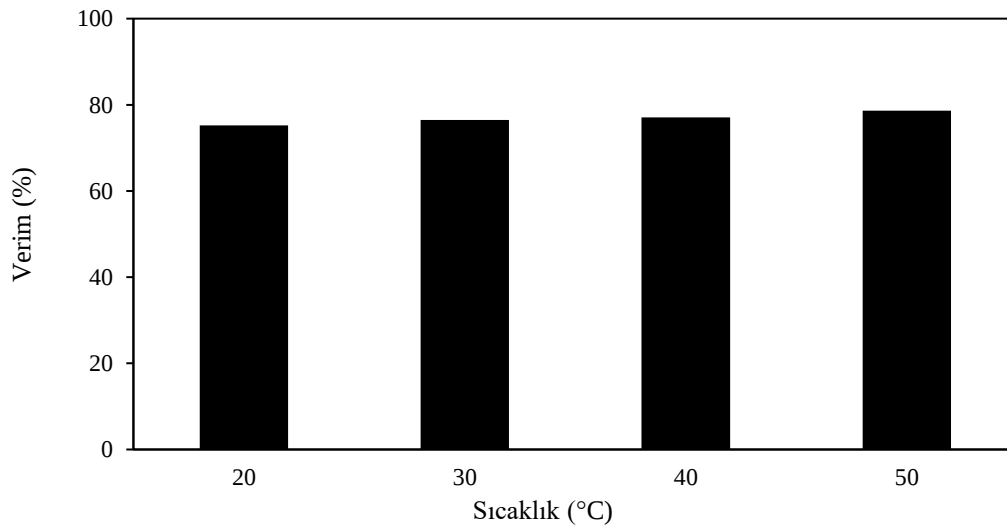
Şekil 16 ve Şekil 17 incelendiğinde 100 rpm karıştırma hızı için adsorpsiyon verimi %32,6 olarak belirlenmişken, karıştırma hızı 200 rpm'e çıkarıldığında giderim verimi %75,2 olarak belirlenmiştir. Karıştırma hızları 300 rpm ve 400 rpm'e yükseltildiğinde ise adsorpsiyon verimlerinde meydana gelen azalma ile birlikte verimler sırasıyla %37,7 ve %35 olarak belirlenmiştir. En yüksek adsorpsiyon veriminin 200 rpm'de elde edildiği düşünülerek sonraki çalışmalarda karıştırma hızının 200 rpm olarak ayarlanmasına karar verilmiştir.

Sıcaklığın Adsorpsiyona Etkisi

Sıcaklık, adsorpsiyon üzerindeki önemli etkenlerden birisi olup adsorpsiyonda reaksiyon hızını ve adsorpsiyon kapasitesini etkileyen bir faktördür. Adsorpsiyon durumunda reaksiyon hızı sıcaklığa karşılık gelir ve sıcaklığın adsorpsiyon verimliliği üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla deneyler 20°C, 30°C, 40°C ve 50°C sıcaklıklarda yürütülmüştür. Elde edilen veriler Şekil 18 ve Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 18. Farklı sıcaklıklarda adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, t : 60 dk, K.H: 200 rpm, P.B: 0,2-0,5 mm, pH:11,3)

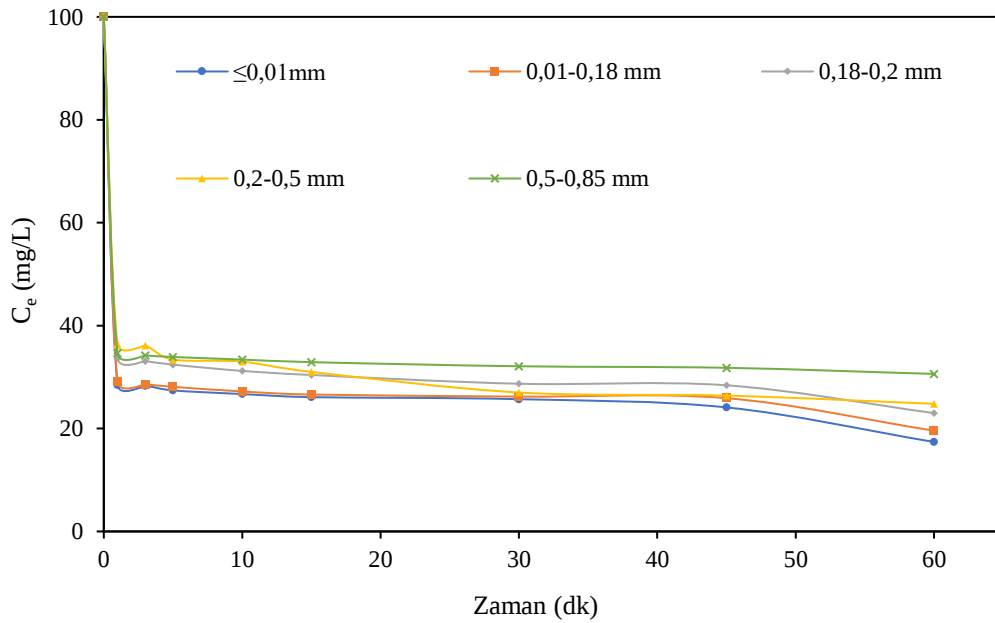


Şekil 19. Farklı sıcaklıkların adsorpsiyon verimine etkisi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, t : 60 dk, K.H: 200 rpm, P.B: 0,2-0,5 mm, pH:11,3)

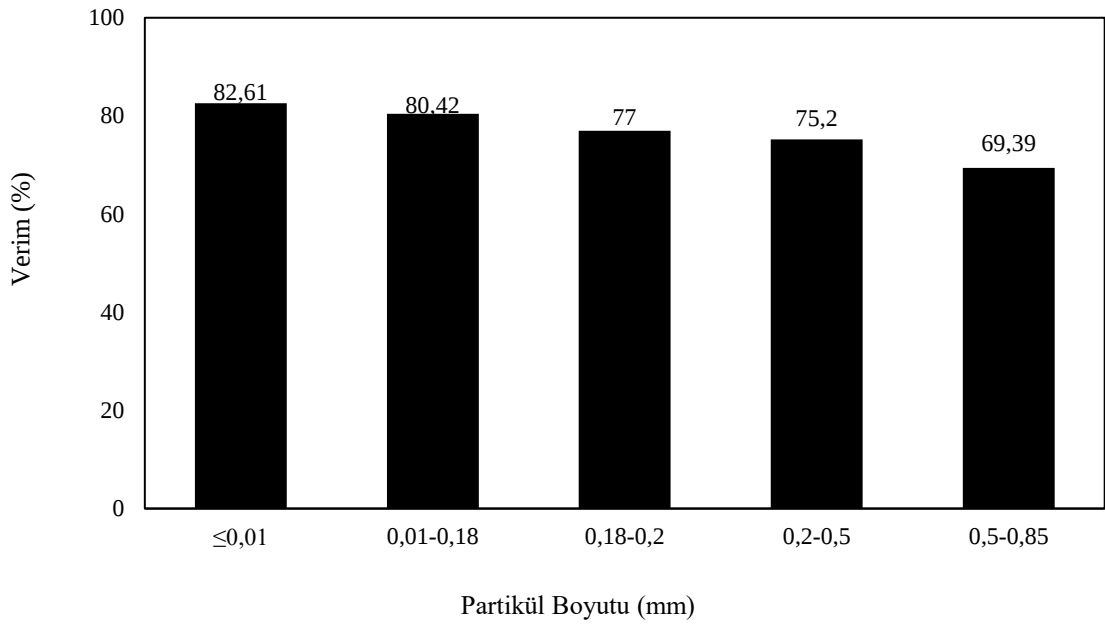
Şekil 18 ve Şekil 19 incelendiğinde bütün sıcaklıklar için ilk 15 dk'nın boyar maddenin adsorplanabilmesi için yeterli olduğu görülmüş, artan sıcaklıkla adsorpsiyon veriminin çok önemli ölçüde değişmediği gözlenmiştir. Artan sıcaklıkla adsorpsiyon etkinliğindeki hafif artış, kimyasal adsorpsiyonun verimsizliği yani etkin olmadığı yönünde yorumlanabilir. Bu durum sıcaklık artışıyla birlikte difüzyon hızının artması ile açıklanabilir.

Partikül Boyutunun Adsorpsiyona Etkisi

Sıvı hal ile adsorbent arasındaki etkileşim yüzeyi, adsorpsiyon reaksiyonunda büyük ölçüde rol oynarken, partikül boyutundaki farklılıkların da adsorplama kapasitesinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Adsorbentin toplam yüzey alanı adsorpsiyon miktarını etkileyebileceğinden tanecik boyutu küçüldükçe adsorpsiyon kapasitesi artmaktadır. Arıtma çamurunun partikül boyutunun boyar madde giderim verimindeki etkisi, farklı 5 partikül boyutu seçilerek incelenmiş ($\leq 0,01$ mm, 0,01-0,18 mm; 0,18-0,2 mm; 0,2-0,5 mm; 0,5-0,85 mm) ve sonuçlar Şekil 20 ile Şekil 21'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 20. Farklı partikül boyutlarında adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, t : 60 dk, T : 20°C, K.H: 200 rpm, pH:11,3)



Şekil 21. Farklı partikül boyutlarının adsorpsiyon verimine etkisi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, t : 60 dk, T : 20°C, K.H: 200 rpm, pH:11,3)

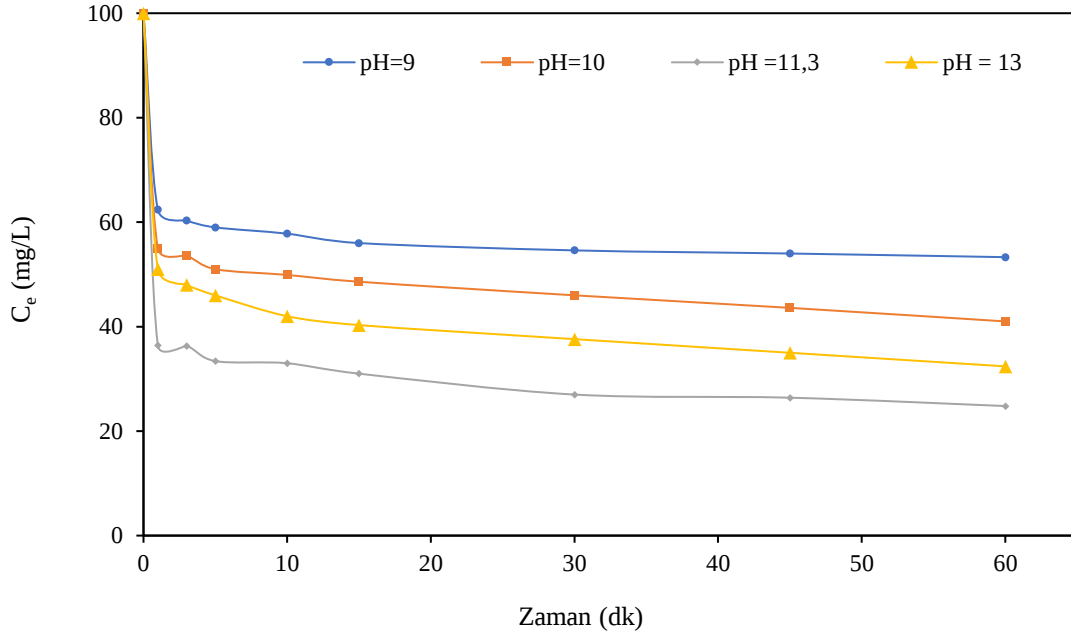
Boyutları $\leq 0,01$ mm olan en küçük tanecikler ile boyutları 0,5-0,85 mm aralığında değişim gösteren en büyük tanecikler karşılaştırıldığında giderim verimleri arasında ortalama olarak %13,22'lik bir farklılık bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan 0,2-0,5 mm partikül boyutuna sahip taneciklerin, en küçük çaplı taneciklere ($\leq 0,01$) göre boyar madde giderim verimi üzerinde farkının çok önemli ölçüde olmadığı gözlenmiştir. Bu sebeple en fazla miktarda adsorbent miktarı elde edilen ve büyük parçacıklar olması nedeniyle filtrelenmesi kolay olan 0,2-0,5 mm boyutundaki parçacıklarla deneylere yürütülmüştür.

pH Değerinin Adsorpsiyona Etkisi

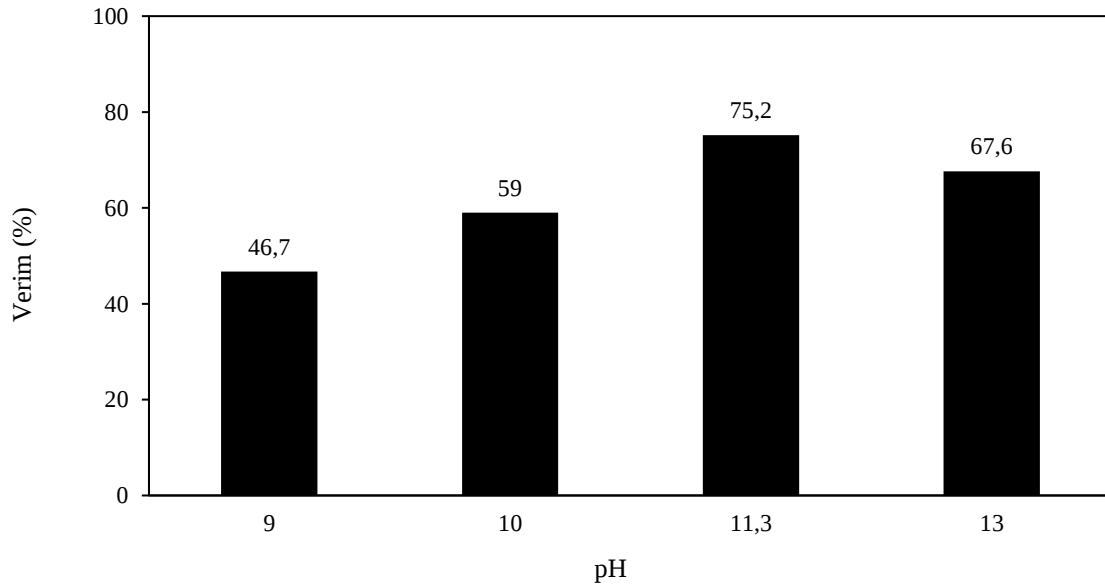
Adsorpsiyon işleminde ortam pH değeri adsorpsiyonu etkileyen parametrelerden biridir. Ortamın pH değeri, adsorpsiyon anında meydana gelen denge olaylarının yönünü belirlemesi ve adsorbanın yüzey yükünü, iyonlaşma derecesini ve adsorbe edilen türleri etkilemesi nedeniyle oldukça önemlidir.

Sıvı içerisinde bulunan kirlетici iyonlarının adsorpsiyonu çözeltinin kuvvetli bir şekilde adsorplanan hidrojen ve hidroksil iyonları ile geride kalan iyonların adsorpsiyonu çözeltinin pH'ından etkilenmektedir. Congo red boyar maddesinin arıtma çamuru ile adsorpsiyonunda pH'ın etkisi 9, 10, 11,3 (doğal) ve 13 pH aralığında incelenmiştir. Boya çözeltileri, 1 M NH_3 ve 1 M HCl kullanılarak istenilen pH değerlerine ayarlanmıştır. pH etkisi

belirlenirken, başlangıç boyar madde konsantrasyonu 100 mg/L, adsorbent konsantrasyonu 3 g/L ve sıcaklık 20°C olacak şekilde diğer tüm proses değişkenleri sabit tutulmuştur. Adsorbentin farklı pH değerlerinde boyar madde giderimi sağlayıp sağlamadığını belirlemek amacıyla adsorpsiyon deneyleri yapılmış ve elde edilen veriler Şekil 22 ile Şekil 23’de gösterilmiştir.



Şekil 22. Farklı başlangıç pH değerlerinde adsorplanmadan kalan boyar madde konsantrasyonunun zamanla değişimi (C_o : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, t : 60 dk, T : 20°C, K.H: 200 rpm, P.B: 0,2-0,5mm)



Şekil 23. Başlangıç pH'sının adsorpsiyon verimine etkisi (C_o : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, t : 60 dk, T : 20°C, K.H: 200 rpm, P.B: 0,2-0,5mm)

Şekil 22 ve Şekil 23 incelendiğinde pH değeri arttıkça boyar madde adsorpsiyon veriminin yükseldiği görülmektedir. Ancak pH 13’de adsorpsiyon veriminin azaldığı gözlenmiştir. Yüksek pH değerlerinde çözeltideki hidroksil iyonlarının konsantrasyonunun artması, adsorbanın net yüzey yükünün negatif olmasına neden olur. Bu durumun sonucunda sulu çözeltide negatif yüklü iyonlar halinde bulunan anyonik Congo red boya, boya molekülleri ile adsorbent yüzeyi arasında elektrostatik bir etkileşim olmadığından adsorban yüzeyine yeterince bağlanamamıştır. Ancak düşük pH değerlerinde boyalar gibi organik maddelerin iyonlaşma derecesi büyük ölçüde azalır. Bu, Congo red boya molekülü ile adsorbent arasındaki etkileşimin azalmasına ve dolayısıyla giderim verimliliğinin düşük olmasına neden olmuştur. Sonuç olarak denemeler pH ayarı ve kimyasal sarfiyatı yapılmadan doğal pH’sı 11,3’de yürütülmüş olup boyar madde çözeltisinin arıtma çamuru ile adsorpsiyonunun tüm pH değerlerinde ilk 15 dakikada dengeye ulaştığı görülmüştür.

Adsorpsiyon Kinetiği

Elde edilen deney çalışmalarındaki veriler, farklı kinetik modellere uydurularak adsorpsiyon hızının, proses modelinin ve adsorbent ile adsorplanan arasındaki alıkoyma süresinin bulunmasına yardımcı olmaktadır. Adsorpsiyon kinetiği, bir adsorplananın adsorbent yüzeyinde adsorpsiyonunu hangi mekanizmanın etkilediğini göstermek için kullanılır. Bununla ilgili literatürde çeşitli kinetik modeller önerilmiştir. Bu modellemelerden en sık tercih edilenleri; yalancı birinci derece kinetik model, yalancı ikinci derece kinetik modelidir.

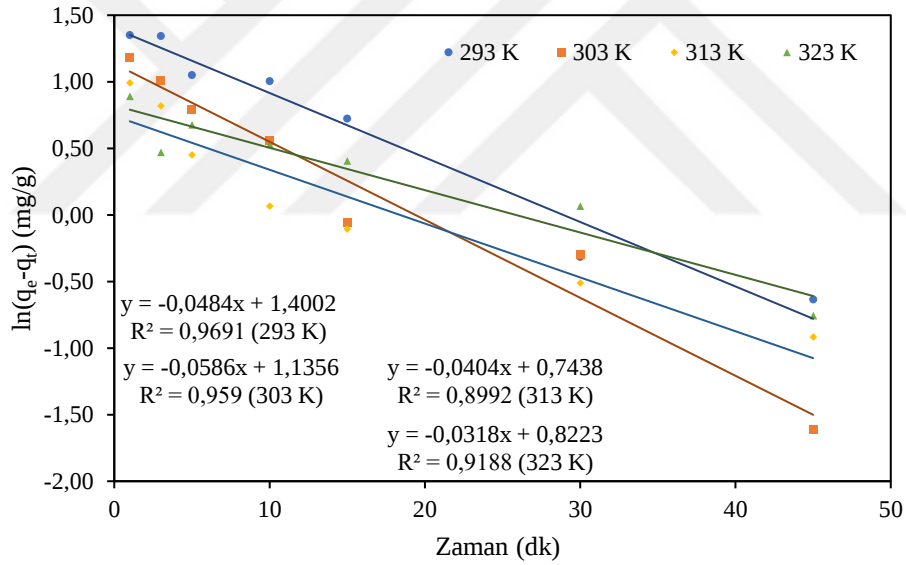
Congo Red Boyar Maddesi için Adsorpsiyon Kinetiği

Arıtma çamuru adsorbenti ile Congo red boyar maddesinin adsorpsiyonu için farklı sıcaklıklarda deneyler yapılarak kinetik çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada sıcaklıklar 293 K (20°C), 303 K (30°C), 313 K (40°C) ve 323 K (50°C), başlangıç boyar madde konsantrasyonu 100 mg/L, adsorbent konsantrasyonu 3 g/L, pH değeri 11,3, karıştırma hızı 200 rpm, parikül boyutu 0,2-0,5 mm ve temas süresi için değerler 1, 3, 5, 10, 15, 30, 45 ve 60 dk olarak belirlenmiştir. Yalancı birinci derece kinetik model için elde edilen sonuçlar Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7. Farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $q_e(\text{deneysel})$, $q_t(\text{deneysel})$ ve $\ln(q_e - q_t)$ değerlerinin değişimi (C_o : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Zaman (dk)	q_e				q_t				$\ln(q_e - q_t)$ (mg/g)			
	293 K	303 K	313 K	323 K	293 K	303 K	313 K	323 K	293 K	303 K	313 K	323 K
1	25,06	25,5	25,7	26,3	21,2	22,23	23	23,86	1,28	1,18	0,99	0,89
3	25,06	25,5	25,7	26,3	21,23	22,76	23,43	24,7	1,20	1,01	0,82	0,47
5	25,06	25,5	25,7	26,3	22,2	23,3	24,13	24,33	0,80	0,79	0,45	0,68
10	25,06	25,5	25,7	26,3	22,33	23,76	24,63	24,6	0,66	0,55	0,07	0,53
15	25,06	25,5	25,7	26,3	23	24,56	24,8	24,8	-0,15	-0,06	-0,11	0,41
30	25,06	25,5	25,7	26,3	24,33	24,76	25,1	25,23	-0,84	-0,30	-0,51	0,07
45	25,06	25,5	25,7	26,3	24,53	25,3	25,3	25,83	-1,83	-1,61	-0,92	-0,76
60	25,06	25,5	25,7	26,3	25,06	25,5	25,7	26,3				

Tablo 7’de verilen deneysel olarak bulunan q_e ve q_t değerleri kullanılarak çizilen t ’ye karşı $\ln(q_e - q_t)$ grafiği Şekil 24’de gösterilmiştir.



Şekil 24. Farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonuna ait birinci derece kinetik modeli (C_o : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Şekil 24 incelendiğinde $\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$ denklemi kullanılarak, $\ln q_e$ değerleri grafikten elde edilen denklemlerin kesim noktalarına, $-k_1$ değerleri ise eğimlere eşitlenmiş ve buradan farklı sıcaklıklardaki $q_e(\text{hesaplanan})$ ve k_1 değerleri bulunmuştur. Sonuçlar Tablo 8’de gösterilmiştir.

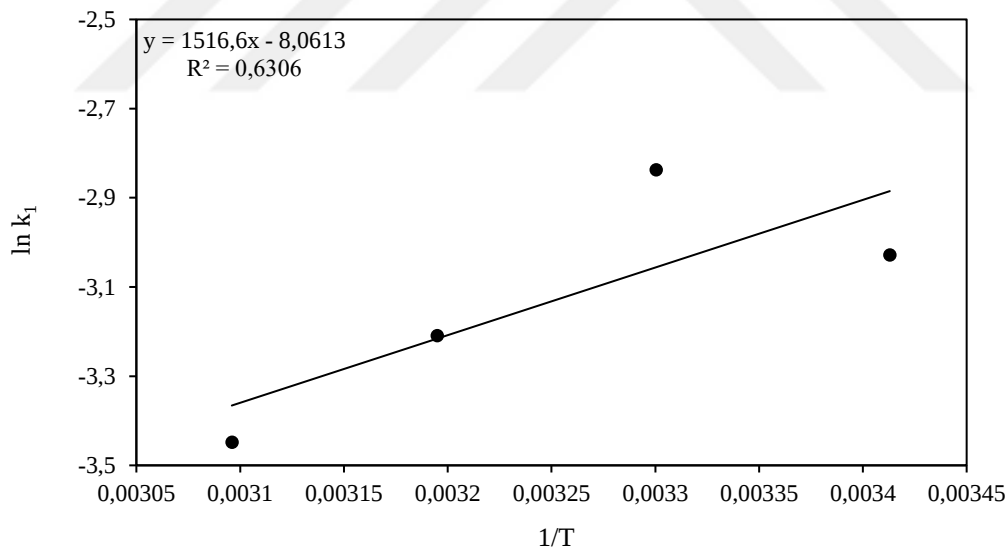
Tablo 8. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için Q_e (hesaplanan) ve k_1 değerlerinin değişimi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

k_1 (1/dk)				Q_e (hesaplanan) (mg/g)			
293 K	303 K	313 K	323 K	293 K	303 K	313 K	323 K
0,0484	0,0586	0,0404	0,0318	4,0560	3,1130	2,1039	2,2757

Yalancı birinci derece kinetik hız ifadesi için E_a hesaplanırken gerekli olan $1/T$ 'ye karşı $\ln k_1$ değerlerinin değişimi Tablo 9'da, elde edilen grafik Şekil 25'de gösterilmiştir.

Tablo 9. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $\ln k_1$ değerlerinin değişimi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

T (K)	1/T	k_1	$\ln k_1$
293	0,003413	0,0484	-3,02826
303	0,0033	0,0586	-2,83702
313	0,003195	0,0404	-3,20893
323	0,003096	0,0318	-3,44829

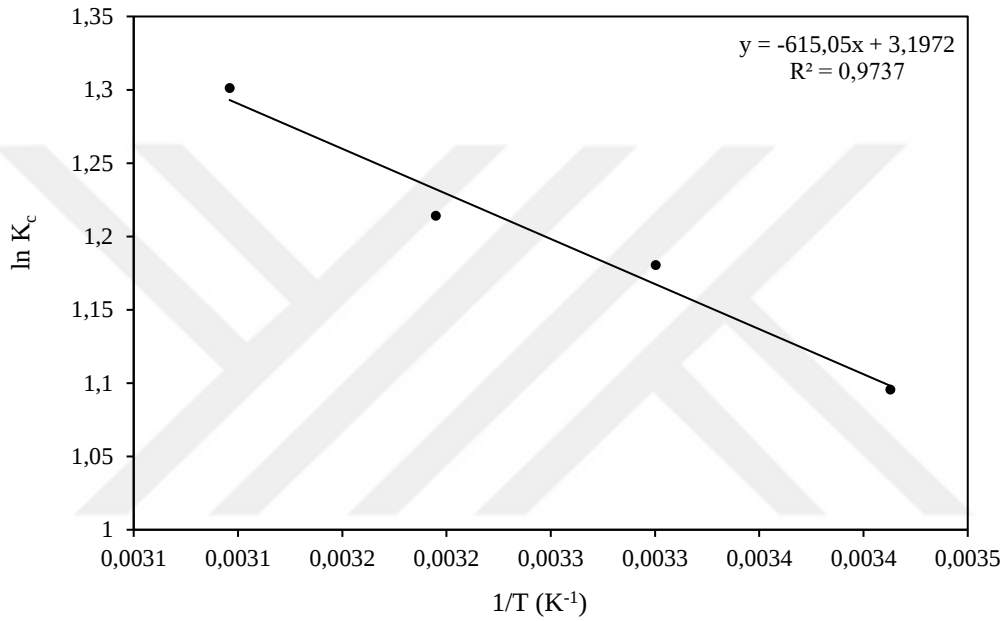


Şekil 25. Arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $1/T$ 'ye karşılık $\ln k_1$ eğrisi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Şekil 25'de gösterilen grafiğin eğimi yardımıyla yalancı birinci derece kinetik hız ifadesi için E_a değeri 12,6 kJ/mol olarak bulunmuştur. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için K_c ve ΔG^0 değerleri Tablo 10'da, elde edilen grafik ise Şekil 26'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için K_c ve ΔG^0 değerleri (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

T (K)	1/T (K ⁻¹)	C _e	C ₀	C = C ₀ -C _e	K _c = C/C _e	ln K _c	R (J/mol K)	ΔG (kJ/mol)
293	0,0034	25,06	100	74,9400	2,9904	1,0954	8,3145	-2,6686
303	0,0033	23,5	100	76,5000	3,2553	1,1803	8,3145	-2,9735
313	0,0032	22,9	100	77,1000	3,3668	1,2140	8,3145	-3,1593
323	0,0031	21,4	100	78,6000	3,6729	1,3010	8,3145	-3,4939



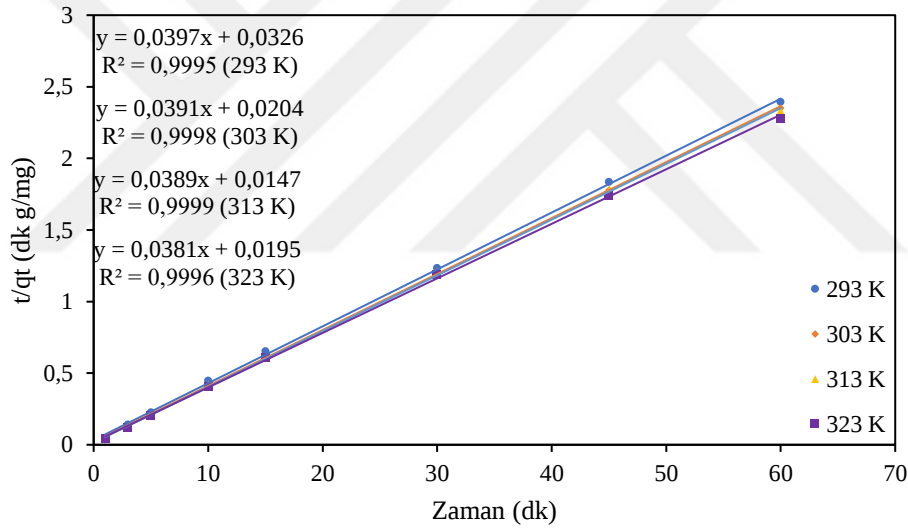
Şekil 26. Arıtma çamuru ile Congo red boyar maddesi adsorpsiyonu için 1/T'ye karşılık ln K_c eğrisi (C_0 : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, T: 20°C, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Şekil 26'dan $\Delta H^0=5,1138$ kJ/mol ve $\Delta S^0=0,0265$ kJ/mol.K olarak bulunmuş olup, termodinamik hesaplamalar sonucu reaksiyonun endotermik ve istemli olduğu görülmüştür. ΔG^0 'nin negatif olması reaksiyonun kendiliğinden oluşacağını ve prosesin bir enerji girişi olmadan gerçekleşeceğini ifade etmektedir.

Yalancı ikinci derece kinetik model, farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonuna uygulanmış ve t/q_t (dk.g/mg) değerleri Tablo 11'de verilmiştir. Yalancı ikinci derece kinetik hız ifadesi için t 'ye karşı $t/q_t(\text{deneysel})$ grafiği ise Şekil 27'de çizilerek $q_e(\text{hesaplanan})$ ve k_2 değerleri elde edilmiştir.

Tablo 11. Farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için t/q_t (dk.g/mg) değerleri (C_o : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Sıcaklık	$q_t(\text{deneysel}) = (C_o - C_t)/m$ (mg/g)				t/q_t (dk.g/mg)			
Zaman (dk)	293 K	303 K	313 K	323 K	293 K	303 K	313 K	323 K
1	21,2	22,23	23	23,86	0,047170	0,044984	0,043478	0,041911
3	21,23	22,76	23,43	24,7	0,141309	0,13181	0,128041	0,121457
5	22,2	23,3	24,13	24,33	0,225225	0,214592	0,207211	0,205508
10	22,33	23,76	24,63	24,6	0,447828	0,420875	0,406009	0,406504
15	23	24,56	24,8	24,8	0,652174	0,610749	0,604839	0,604839
30	24,33	24,76	25,1	25,23	1,233046	1,211632	1,195219	1,189061
45	24,53	25,3	25,3	25,83	1,834488	1,778656	1,778656	1,74216
60	25,06	25,5	25,7	26,3	2,394254	2,352941	2,33463	2,281369



Şekil 27. Farklı sıcaklıklarda zamana göre arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonuna ait ikinci derece kinetik modeli (C_o : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Burada; $t/q_t = 1/k_2 \cdot q_e^2 + t/q_e$ denklemini yardımı ile ; $1/k_2 \cdot q_e^2$ değeri grafikten elde edilen kesim noktalarına, t/q_e değeri ise eğimlere eşitlenmiş ve farklı sıcaklıklar için hesaplanan $q_e(\text{hesaplanan})$ ve k_2 değerleri Tablo 12’de gösterilmiştir.

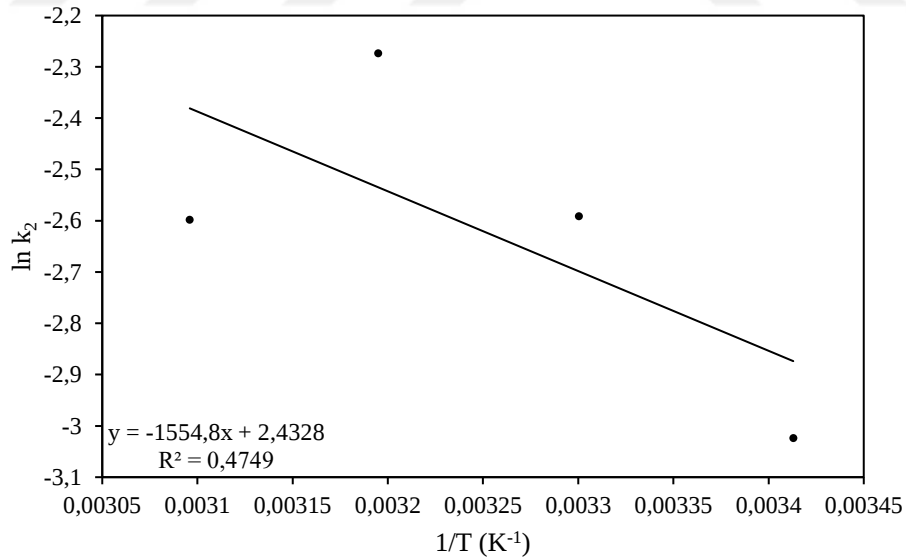
Tablo 12. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için q_e (hesaplanan) ve k_2 değerleri (C_o : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

k_2 (g/mg.dk)				q_e (hesaplanan) (mg/g)			
293 K	303 K	313 K	323 K	293 K	303 K	313 K	323 K
0,0486	0,0749	0,1029	0,0744	25,1889	25,5754	25,7069	26,2467

Yalancı ikinci derece kinetik hız ifadesi için E_a bulunurken kullanılan bilgiler Tablo 13'te verilmiş olup, $1/T$ 'ye karşı $\ln k_2$ değerleri ise Şekil 28'de verilmiştir.

Tablo 13. Farklı sıcaklıklarda arıtma çamuru ile KK boyar maddesi için $\ln k_2$ değerleri (C_o : 100 mg/L, pH: 5, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, T : 20°C , t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm)

T (K)	1/T	k_2	$\ln k_2$
293	0,003413	0,0486	-3,02413
303	0,0033	0,0749	-2,59160
313	0,003195	0,1029	-2,27400
323	0,003096	0,0744	-2,59830



Şekil 28. Arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonu için $1/T$ 'ye karşı $\ln k_2$ eğrisi (C_o : 100 mg/L, m : 0,3 g/L, K.H: 200 rpm, t : 60 dk, P.B: 0,2-0,5 mm, pH: 11,3)

Şekil 28'de verilen doğrunun eğimi yardımıyla yalancı ikinci derece kinetik hız ifadesi için E_a değeri 12,92 kJ/mol.K olarak bulunmuştur. Adsorpsiyon reaksiyonunun yalancı birinci

dereceden ve yalancı ikinci dereceden kinetik denklemlerinin uyumlu olup olmadığı Şekil 24 ve 27'de çizilen grafiklerin düz bir çizgi vermesinden anlaşılmaktadır. Elde edilen verilerden, Congo red boyanın arıtma çamuru üzerine adsorpsiyonunun, 0,999'luk bir regresyon katsayısı ile görünen ikinci dereceden kinetik modele oldukça iyi bir uyum sağladığını göstermiştir. Ayrıca yalancı ikinci dereceden kinetik modelden hesaplanan q_e değerlerinin deneysel q_e değerlerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. E_a değerlerine bakılarak sistemin fiziksel ya da kimyasal adsorpsiyon olduğuna karar verilmektedir. E_a değerleri 5 ile 40 kJ/mol arasında olan etkileşimler için fiziksel, 40 ile 800 kJ/mol arasında olan etkileşimler için ise kimyasal adsorpsiyon olduğunu ifade etmektedir. Bu çalışmanın fiziksel adsorpsiyon olduğuna karar verilmiştir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Boyalar, boya, gıda, tekstil ve kâğıt endüstrilerinde fazla miktarda kullanılan organik bileşiklerdir. Boya barındıran atıksuların bu alanlardan akarsu ve nehirlere boya açısından zengin kanalizasyon deşarjı her zaman büyük bir sorun olmuştur. Çünkü boyalar, su yaşamı için zehirlidir ve bozulmaya karşı oldukça dayanıklı olan bu bileşenler canlı sağlığına zararlı etki göstermektedir. Bu nedenle bu zehirli maddelerin su ortamından uzaklaştırılması çok önemlidir. Bu amaçla birçok gelişmiş arıtma yöntemi kullanılsa bile bu arıtma yöntemleri çoğunlukla vakit alan, pahalı ve arıtmada tam anlamıyla etkili olmayan yöntemlerdir.

Adsorpsiyon yöntemi, boyalar gibi kalıcı organik kirleticileri gidermek için tercih edilebilecek en etkili aynı zamanda oldukça çevre dostu yöntemdir. Bu arıtma işleminde birçok farklı ticari adsorbent kullanılabilse de yüksek maliyetleri ve sınırlı mevcudiyetleri, yaygın kullanımlarını çoğu zaman sınırlandırmaktadır.

Bu tez çalışmasında Congo red boyar maddesinin, şeker fabrikasından pancar üretimi sonucunda açığa çıkan atıksuların aerobik ve anaerobik olarak biyolojik arıtımı sonucunda oluşan arıtma çamurları ile adsorpsiyonu incelenmiştir. Adsorpsiyona etki eden; pH, başlangıç boyar madde konsantrasyonu, adsorbent konsantrasyonu, karıştırma hızı, sıcaklık, temas süresi ve partikül boyutu gibi parametrelerin etkileri çalışılmış ve maksimum adsorpsiyon elde etmek amacıyla optimum koşullar belirlenmiştir.

Çalışmada pH değerleri 9, 10, 11,3 ve 13 ile deneyler yürütülmüştür. pH 9 için giderim verimi %46,7, pH 10 için giderim verimi %59, pH=11,3 için giderim verimi %75,2'dir. Yani pH değeri arttıkça boyar madde adsorpsiyon veriminin yükseldiği görülmüştür. Ancak pH 13 olduğunda giderim verimi %67,6'ya düşmüştür. Bu durum çözeltideki hidroksil iyonlarının yüksek pH değerlerinde artan konsantrasyonlarının, adsorbentin net yüzey yükünün negatif olmasına neden olması ile açıklanabilir. Arıtma çamuru ile Congo red boyar madde adsorpsiyonunda en yüksek giderim verimi doğal pH'sında yani 11,3'te elde edilmiştir.

Arıtma çamuru ile 30, 50, 70, 100 ve 150 mg/L başlangıç boyar madde konsantrasyonlarında çalışılmış ve deneyler 100 mg/L boyar madde konsantrasyonunda sürdürülmüştür. Adsorbent konsantrasyonunun, adsorpsiyon üzerindeki etkisini incelemek için 100 mg/L başlangıç konsantrasyonunda, 100 mL'lik boya çözeltisi hazırlanmış erlenlere 0,1 g, 0,2 g, 0,3 g, 0,4 g, 0,5 g, 0,7 g ve 1 g adsorbent eklenerek deneyler yürütülmüş ve adsorbent konsantrasyonunun artması ile giderim verimi artış göstermiştir. Adsorpsiyon işleminde, adsorbent miktarının artması yüzey alanının artması, dolayısıyla giderim veriminin

de artması anlamına gelir. Ancak bu çalışmada yüksek adsorbent konsantrasyonlarında arıtma çamurundaki tanecikler bir araya gelerek topaklanma oluşturmuş ve adsorbentin yüzey alanındaki azalmaya bağlı olarak giderim veriminde düşüş gözlenmiştir. Denemelerde 0,3 g/L'den yüksek adsorbent konsantrasyonlarında giderim verimleri birbirine yaklaşıp hafif düşüşe geçerek sabit kalmıştır.

Langmuir ve Freundlich izoterm eşitliklerinin lineer ilişkilerinden yararlanılarak izoterm sabitleri hesaplanmış ve regresyon katsayılarına (R^2) bakıldığında en iyi Freundlich izotermine uyum gösterdiği görülmüştür. Freundlich için R^2 ifadesi 0,9751 iken Langmuir izotermi için bu değer 0,9552 olarak hesaplanmıştır. Adsorpsiyon izotermilerindeki verilere göre çalışılan adsorpsiyonun Freundlich izoterm modeline daha iyi uyum sağladığı görülmektedir. Elde edilen göre arıtma çamuru için Congo red boyar madde adsorplama kapasitesi K_F değeri 6,8801 mg/g olarak bulunmuştur.

Arıtma çamuru ile Congo red boyar maddesi adsorpsiyonunda 100, 200, 300 ve 400 rpm karıştırma hızlarında çalışılmıştır. 100 rpm karıştırma hızı için adsorpsiyon verimi %32,6 olarak belirlenmişken, karıştırma hızı 200 rpm'e çıkarıldığında giderim verimi %75,2 olarak belirlenmiştir. Karıştırma hızı 300 rpm ve 400 rpm'e çıkarıldığında ise adsorpsiyon verimlerinde meydana gelen azalma ile birlikte verimler sırasıyla %37,7 ve %35 olarak belirlenmiştir. Por difüzyonu hız sınırlayıcı faktör olduğundan, 200 rpm'den daha yüksek karıştırma hızlarında giderim veriminde düşüş olduğu görülmüştür. Denemelerin sonucunda en uygun karıştırma hızı 200 rpm olarak seçilmiştir.

Yapılan deneylerde partikül boyutunun adsorpsiyon üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Ancak çok küçük partiküllerin sudan filtrelenmesinin zorluğu ve giderim verimlerinde büyük bir fark oluşmaması nedeniyle elek analizi sonucunda en fazla adsorbent miktarının elde edildiği 0,2-0,5 mm arasındaki boyutlarda değişen taneler ile deneylere devam edilmiştir. Çalışmada 20°C, 30°C, 40°C ve 50°C sıcaklık değerlerinde deneyler yapılmış ve çalışma sıcaklığı olarak 20°C seçilmiştir.

Yapılan kinetik model çalışmalarında deneysel sonuçların ikinci dereceden kinetik modele uygun olduğu tespit edilmiştir. Congo red boyar maddesinin arıtma çamuru üzerindeki adsorpsiyonu, yalancı ikinci derece kinetik modeline 0,999 regresyon katsayısı ile büyük bir uyum sağlamıştır. Ayrıca yalancı ikinci derece kinetik modeline göre hesaplanan q_e değerlerinin deneysel q_e değerlerine çok yakın olduğu sonucuna varılmıştır. ΔH° değeri 5,1138 kJ/mol ve ΔS° değeri 0,0265 kJ/mol.K olarak bulunmuştur. ΔG° 'nin negatif olması prosesin gerçekleşeceğini ve reaksiyonun kendiliğinden oluşacağını ifade etmektedir. Yani termodinamik hesaplamalar reaksiyonun endotermik ve istemli olduğunu göstermektedir.

Yalancı ikinci derece kinetik modeline göre hesaplanan E_a değeri 12,92 kJ/mol.K olarak bulunmuş ve Congo red boyar madde adsorpsiyonun fiziksel olarak gerçekleştiği şeklinde yorumlanmıştır. Yapılan bu çalışmada adsorpsiyon 60 dk. boyunca izlendiğinde, pH 11,3'de, 200 rpm karıştırma hızında, 20°C sıcaklıkta, 0,2-0,5 mm partikül boyutunda ve 3 g/L adsorbent ilavesiyle optimum çalışma koşulları belirlenmiş ve 100 mg/L başlangıç konsantrasyonunda %75,2 giderim verimine ulaşılmıştır.

Çalışmanın sonucunda elde edilen değerler, kullanılan arıtma çamurunun boyar madde adsorpsiyonunda oldukça etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Mühendislik açısından çevreye olası bir zarar vermeden atığı başka bir atık ile yok etme prensibine dayanan, düşük maliyetli oluşu ve kolay uygulanışı nedeniyle tercih edilen bir yöntem olan adsorpsiyon işleminin günümüzde pek çok kirletici için kullanılması yarar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abak, H. 2008. Sulu Çözeltilerden Metilen Mavisinin Fındık Kabuğu Yüzeyine Adsorpsiyon ve Adsorpsiyon Kinetiği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Alver, E., Bulut, M., Metin, A.Ü. ve Çiftçi, H. 2017. One step effective removal of Congo Red in chitosan nanoparticles by encapsulation. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 171(5), 132–138.
- Bahar, N. 2011. Şeker Pancarı Küspesi Modifiye Ürünleriyle Sulu Ortamlardan Bazik Boyarmaddelerin Giderilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Başer, İ. ve İnanıcı, Y. 1990. *Boyarmadde kimyası*. İstanbul: Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi.
- Benkhaya, S., M'rabet, S. and El Harfi, A. 2020. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, 115, 1-35.
- Berkan, P. 2010. Sulu Çözeltilerden Adsorpsiyon Yöntemiyle Cr(III)'Ün Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Bozdoğan A. 1984. Atıksulardaki Tekstil Boyarmaddeleri Renginin Devrettirilen Koagülant (CaO-MgCO₃) ile Giderilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Chakraborty, J. N. 2015. *Dyeing with acid dye*. In Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles (pp. 199-208). WPI Publishing.
- Chen, X. 2015. Modeling of experimental adsorption isotherm data. *Information, Directory of Open Access Journals*, 6, 14-22.
- Chuah, T., Jumariah, A., Azni, I., Katayon S. and Thomas Choong, S. Y. 2005. Rice husk as a potentially low-cost biosorbent for heavy metal and dye removal: An overview. *Desalination*, 175, 305-316.
- Couto, S. R. 2009. Dye removal by immobilised fungi. *Biotechnology Advances*, 27(3), 227-235.
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061-1085.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J. And Tchobanoglous, G. 2012. *MWH's water treatment - principles and design*. Hoboken, New Jersey: WILEY, John Wiley ve Sons, Inc.

- Çiftci, B. 2021. Odun Külünden Elde Edilen Nanomanyetit Kompozitin Endüstriyel Atıksulardan Adsorpsiyon Yöntemi İle Fe, Mn Gideriminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin.
- Elbağlı, O. G. 2016. Aktif Karbon-Kil-Aljinat Kompozit Malzemesinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Adsorbent Özelliklerinin Belirlenmesi: Metilen Mavisi Boyar Maddesinin Adsorpsiyonunun Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin.
- Etcı, Ö. 2008. Ağır Metal İçeren Atıksulardan Doğal Kil Minerali Beydellit ile Kadmiyum ve Kurşun Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli.
- Foo, K. and Hameed, B. 2010. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems-Review. *Chemical Engineering Journal*, 2-10.
- Freundlich, H. M. F. 1906. Over the adsorption in solition. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57, 385-470.
- Goh, P. S., Wong, K. C. and Ismail, A. F. 2022. Membrane technology: A versatile tool for saline wastewater treatment and resource recovery. *Desalination*, 521, 15-37.
- Güneş, S. 2016. Portakal (*Citrus sinensis* L;) Küspesinden Üretilen Aktif Karbonun Sulu Çözeltilerden Reaktif Boyar Madde Adsorpsiyonunda Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Güneş, Ş. 2018. Fonksiyonel Polimerlerle Sezyum İyonu Adsorpsiyonunun İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Hassani, A., Malhotra, M., Karim, A. V., Krishnan, S. and Nidheesh, P. V. 2022. Recent progress on ultrasound-assisted electrochemical processes: A review on mechanism, reactor strategies, and applications for wastewater treatment. *Environmental Research*, 205, 1-26.
- Haymaker, J. W. and Thompson, J. M. 1972. *Adsorption*. In Organic Chemicals in the Soil Environment, (Eds. Goring, C. M. and Haymaker, J. M.,). New York: John Wiley.
- Henning, L. M., Simon, U., Abdullayev, A., Schmidt, B., Pohl, C., Nunez Guitar, T. and Gurlo, A. 2022. Effect of fomes fomentarius cultivation conditions on its adsorption performance for anionic and cationic dyes. *ACS Omega*, 7, 4158-4169.
- Ho, Y. S. 2004. Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions *Scientometrics*, 59, 171-177.
- Ho, Y.S. and McKay, G. 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process-Biochemistry*, 34, 451-465.

- Ismail, G. A. and Sakai, H. 2021. Review on effect of different type of dyes on advanced oxidation processes (AOPs) for textile color removal. *Chemosphere*, 291, 1-13.
- Jabbar, K. Q., Barzinjy, A. A. and Hamad, S. M. (2022). Iron oxide nanoparticles: Preparation methods, functions, adsorption and coagulation/flocculation in wastewater treatment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 1-13.
- Kayacan, S. 2007. Kömür Koklarla Sulu Çözeltilerden Boyar Maddelerin Uzaklaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Khani, R., Sobhani, S. and Beyki, M. H. 2016. Highly selective and efficient removal of lead with magnetic nano-adsorbent: multivariate optimization, isotherm and thermodynamic studies. *Journal of Colloid and Interface Science*, 466, 198–205.
- Khatri, A., Peerzada, M. H., Mohsin, M. and White, M. 2015. A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution. *Journal of Cleaner Production*, 87, 50-57.
- Kim, S., Nam, S. N., Jang, A., Jang, M., Park, C. M., Son, A. and Yoon, Y. 2022. Review of adsorption–membrane hybrid systems for water and wastewater treatment. *Chemosphere*, 286, 1-19.
- Koçer, O. 2013. Zeytin Posası (Pirina) Üzerine Malaşit Yeşili'nin Sulu Çözeltiden Adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis.
- Koh, J. 2011. Dyeing of cellulosic fibres. In Handbook of textile and industrial dyeing. *Woodhead Publishing Series in Textiles*, 2, 129-146.
- Kuvancı, A. A. 2021. Tekstil Endüstrisi Boyar Maddelerinin Sulu Çözeltilerinden Fenton Yöntemi ile Renk Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- Lagergren, S. 1898. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe: Kungliga Svenska vetenskapsakademiens. *Handlingar*, 24, 1–39.
- Lin, C. C., and Liu, H. S. 2000. Adsorption in a Centrifugal Field: Basic Dye Adsorption by Activated Carbon. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 39(1), 161- 167.
- Noll, K. E., Gounaris, V. and Hou, W. 1992. *Adsorption technology for air and water pollution control*. Michigan: Lewis Publishers Inc.
- Özer, A. 2004. Adsorpsiyon kinetikleri ders notları. Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Mersin Üniversitesi, Mersin.

- Öztürk, G. 2018. Farklı Adsorbanlar Kullanılarak Atık Sulardan Reaktif Boyaların Gideriminde Adsorpsiyon Koşullarının Araştırılması. , Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Üniversitesi, Bilecik.
- Roostaei, N., Tezel, and F. H. 2004. Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption. *Journal of Environmental Management*, 70(2), 64-157.
- Salleh, M. A. M., Mahmoud, D.K., Abdul Karim, W.A.W. and Idris, A. 2011. Cationic anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280, 1-13.
- Sardar, M., Manna, M., Maharana, M. and Sen, S. 2021. *Remediation of dyes from industrial wastewater using low-cost adsorbents*. In Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water. Switzerland: Springer
- Sarıkaya, Y. S. 2011. *Fizikokimya*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Sarıkaya, Y. and Aybar, S. 1978. The Adsorption NH₃, N₂O and CO₂ gases on the 5A molecular Sieve. *The Journal of Ankara Üniversitesi Fen Fak.*, 24, 33-39.
- Selçuk, H. 2004. Decolorization and detoxification of textile wastewater by ozonation and coagulation processes. *Dyes Pigments*, 64, 217-222.
- Shabir, M., Yasin, M., Hussain, M., Shafiq, I., Akhter, P., Nizami, A. S., ... and Park, Y. K. 2022. A review on recent advances in the treatment of dye-polluted wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 112, 1-19.
- Shkir, M., Palanivel, B., Khan, A., Kumar, M., Chang, J. H., Mani, A. and AlFaify, S. 2022. Enhanced photocatalytic activities of facile auto-combustion synthesized ZnO nanoparticles for wastewater treatment: An impact of Ni doping. *Chemosphere*, 291, 1-15.
- Sunguray, G. 2010. Dispers Boyarmaddelerle Boyanmış Poliester Materyallerinin Renk Haslık Özelliklerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Sülkü, A. S. 2012. Atık Sulardan Boyarmaddelerin Adsorpsiyon Yöntemiyle Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Tchernev, D. I. 1979. Solar air conditioning and refrigeration utilizing zeolites. *International Institute of Refrigeration*, 209-215.
- Uslu, F. M. 2014. Akridin Oranj'ın Ulva Lactuca ve Lemna Gıbba Kullanılarak Sıvı Çözeltilerden Adsorpsiyon ile Uzaklaştırılması ve Adsorpsiyon Kinetiğinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana,

- Uysal, R. 2010. Sulu Ortamdan Asit Kırmızısı 88 (AK88) Boyar Maddesinin Giderimi için Montmorillonit Türü Kil Mineralinin Adsorpsiyon Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Eskişehir.
- Uzgör, R. 2008. Portakal Kabuğu Külü Üzerine Mavi Tekstil Boyasının Adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Vieira, Y., Netto, M. S., Lima, É. C., Anastopoulos, I., Oliveira, M. L. and Dotto, G. L. 2022. An overview of geological originated materials as a trend for adsorption in wastewater treatment. *Geoscience Frontiers*, 13(1), 1-21.
- Weber, C., Current J. and Benton, W. 1991). Vendor selection criteria and methods. *European Journal of Operational Research, Elsevier*, 50(1), 2-18.
- Weber, J. W. J. 1972. *Physicochemical processes for water quality control*. New York: John Wiley & Sons.
- Yang, B., Xu, H., Wang, J., Yan, D., Zhong, Q. and Yu, H. 2018. Performance evaluation of anaerobic baffled reactor (ABR) for treating alkali-decrement wastewater of polyester fabrics at incremental organic loading rates. *Water Science Technology*, 77, 2445–2453.
- Yıldırım, E. 2003. Tekstil Atıksularından Adsorpsiyon Yöntemiyle Boyarmadde Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Yıldız, A. 2008. Reaktif Azo Boyanın Kitosan ile Adsorpsiyon Kinetiğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Yuana, H., Zhanga, J., Lua, Z., Mina, H., and Wuc, C. 2009. Studies on biosorption equilibrium and kinetics of Cd²⁺ by *Streptomyces* sp. K33 and HL-12. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2-3), 423-431.
- Zeytuncu B. 2014. Elektrosponning Tekniği ve UV Işımasının Eş Zamanlı Olarak Uygulanması ile Nanofiber Membranların Hazırlanması ve Kıymetli Metallerin Adsorpsiyonunda Uygulanması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Sude KİBRİTÇİOĞLU YILDIRIM
Doğum tarihi:	...
Doğum Yeri:	...
Uyruğu:	T.C.
Adres:	...
Tel:	...
E-mail:	...
Eğitim	
Lise:	...
Lisans:	...
Yüksek lisans:	...
Doktora:	...
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi