

Kahve Telvesi Kullanılarak Boyar Madde Adsorpsiyonu İzoterm, Kinetik ve Termodinamik Çalışmaları

Züleyha REÇBER^{1*}

¹*İnşaat Mühendisliği Bölümü / Mühendislik Fakültesi, Iğdır Üniversitesi, Türkiye*

**(zuleyha.bingul@igdir.edu.tr)*

Özet – Bu çalışmada; katyonik formdaki kristal viyole boyar maddesinin kahve telvesine adsorpsiyonu araştırılmış ve başlangıç boyarmadde konsantrasyonu ile sıcaklığın adsorpsiyon kapasitesi ve boya giderme verimliliği üzerindeki etkileri optimize edilmiştir. Başlangıç boya konsantrasyonu arttıkça birim adsorban başına adsorplanan boya miktarı artarken, boya giderme verimi azalmıştır. Artan sıcaklığın adsorpsiyon kapasitesini artırdığı gözlenmiştir. Kristal viyole adsorpsiyonunda adsorpsiyon dengesinin matematiksel modellenmesi için Freundlich ve Langmuir modelleri kullanılmış ve izotermelerin uygunluk derecesi Langmuir > Freundlich olarak belirlenmiştir. Kinetik veriler için iki farklı kinetik model (yalancı birinci derece kinetik modeli ve yalancı ikinci derece kinetik modeli) kullanılmış ve hesaplanan kinetik parametre sabitleri ile adsorpsiyonun yalancı ikinci dereceden kinetik modele uyduğu tespit edilmiştir. Kristal viyole boyar maddesinin kahve telvesine adsorpsiyonunun termodinamik parametreleri, adsorpsiyon sürecinin kendiliğinden gerçekleştiğini ($\Delta G_0 < 0$) ve endotermik ($\Delta H_0 > 0$) olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler – Kristal Viyole, Adsorpsiyon, İzoterm, Kinetik, Termodinamik

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfusa paralel olarak sürekli ve hızla gelişen endüstri, başta çevre kirliliği olmak üzere birçok soruna da zemin hazırlamaktadır. Evsel, endüstriyel ve tarımsal faaliyetler sonucu oluşan atıkların bilinçsizce alıcı ortamlara verilmesi ile çevre ciddi tahribata uğramaktadır. Katı ve gaz halinde olan atıkların yanı sıra özellikle endüstriyel kaynaklı atıksular içeriklerinde çok çeşitli organik ve inorganik kirleticileri barındırdıklarından oldukça karmaşık bir karaktere sahiptirler. Su tüketimindeki artış eğilimine rağmen kullanılabilir su kaynaklarının kısıtlı ve azalıyor olması, kaynaklarının daha dikkatli yönetilmesini ve kirlenmeye karşı korunmasını zorunlu hale getirmiştir. Atıkların deşarjı ile su kaynaklarının kirlenmesi birçok çevre sorununu da beraberinde getirmekte, küresel olarak büyük bir tehdit ve endişe oluşturmaktadır.

Bu toksik kimyasal atıklar arasında yer alan sentetik boyar maddeler tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan önemli bir kirleticidir. Ayrıca,

deri, kağıt, boya, akrilik, gıda, elektronik, kozmetik, plastik, ilaç vb. endüstriler de ürünlerini renklendirmek için boyar madde kullanmakta ve aynı zamanda önemli miktarda su tüketmektedir ve sonuç olarak önemli miktarda renkli atıksu üretmektedirler. Üretim ve işleme operasyonları sırasında sentetik boyaların yaklaşık %12'sinin kaybolduğu ve bu kayıp boyaların %20'sinin endüstriyel atıksulara karıştığı tahmin edilmektedir [1]. Boyama sonrası oluşan atık su, kimyasal ve mikrobiyolojik stabilitesini arttıran karmaşık aromatik moleküler yapıya sahip olup, olumsuz ekotoksikolojik etkileri ve biyolojik birikimleri nedeniyle ciddi çevre sorunlarına neden olmaktadır [2].

Renk atıksuda duyuşal olarak belirlenen ilk kirleticidir ve bu renkli atıksular arıtılmadan alıcı ortama deşarj edildiğinde akarsu, göl, deniz ve yeraltı sularına karışarak içme ve kullanma suyu olarak kullanılan kaynakları kirlenmekte ve düşük konsantrasyonlarda bile istenmeyen estetik sorunlara yol açmaktadırlar. Bunun ötesinde buldukları alıcı ortamda bulanıklık oluşturarak

güneş ışınlarının geçirgenliğine engel olmakta ve fotosentetik aktiviteyi olumsuz yönde etkilemektedirler. Işık geçirgenliği ve gaz çözünürlüğü dengesi etkilendiğinden çözünmüş oksijen seviyesini azalmakta ve aerobik organizmalar için elverişsiz şartlar oluşmaktadır. Bu durum ise aneorobik süreci başlatarak su ekosistemini ciddi şekilde etkilemektedir [3], [4], [5].

Ayrıca boyar madde içeren atıksular geniş pH aralığına, yüksek sıcaklığa, yüksek KOİ, BOİ, ve toplam çözünmüş katı madde konsantrasyonuna, yüksek iletkenlik ve bazen de yüksek alkaliniteye sahip olup sıcaklığa ve mikrobiyal etkilere karşı son derece kararlıdır. Parçalanmaları sırasında toksik ve kanserojen yan ürünler oluşturduklarından insan sağlığı ve çevre ekolojisi üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır [6].

Kristal viyole, tekstil endüstrisinde pamuk ve ipeğin boyanmasında mor boya olarak kullanılan bir triarilmetan boyasıdır. Ayrıca boya ve baskı mürekkeplerinin üretiminde de uygulama alanı bulmaktadır [7], [8]. Kristal viyole gram boyanın aktif maddesi olup tıp camiasında biyolojik boya olarak, hayvan ve veteriner hekimliğinde bakteriyostatik ajan olarak kullanılmaktadır [7]. Kristal viyole ayrıca, insanlarda harici cilt dezenfektanı olarak ve küf, bağırsak parazitleri ve mantarların yayılmasını engellemek amacıyla kanatlı hayvan yemine katkı maddesi olarak da kullanılmaktadır [9]. Bununla birlikte kristal viyole kanserojendir ve mikroplar tarafından zayıf bir şekilde metabolize edildiği, biyolojik olarak parçalanmadığı ve çeşitli ortamlarda varlığını sürdürebildiği için inatçı bir molekül olarak sınıflandırılmıştır. Ürün katyonik boya içerdiğinden kornea ve konjonktivada kalıcı hasara da neden olabilmektedir. Kristal viyole, memeli hücreleri için son derece toksiktir ve deri yoluyla zararlı miktarlarda emilirse ciltte ve sindirim kanalında tahrişe neden olabilmekte ve aşırı durumlarda solunum ve böbrek yetmezliğine de yol açabilmektedir [7], [10], [11].

Koagülasyon, kimyasal çökeltme, membran filtrasyonu, solvent ekstraksiyonu, ters ozmoz, fotokatalitik bozunma, sonokimyasal bozunma, elektrokimyasal bozunma, entegre kimyasal-biyolojik bozunma ve adsorpsiyon gibi fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri oksidasyon yöntemleri boya içeren atık suların arıtımı için kullanılmaktadır [12].

Bu yöntemler arasında adsorpsiyon yüksek verimliliği, tasarımın basitliği, kullanım kolaylığı yüksek verimliliği ve karşılaştırılabilir düşük uygulama maliyeti nedeniyle atıksulardan organik ve inorganik kirleticileri gidermek için kullanılan en etkili ileri atıksu arıtım yöntemlerinden biridir [13]. Adsorpsiyon ikili fazlar ara yüzeylerinde gerçekleşen kütle transferi olayıdır ve boya/sorbent etkileşimi, adsorbanın yüzey alanı, partikül boyutu, sıcaklık, pH ve temas süresi gibi birçok fizikokimyasal faktörün etkisi altındadır.

Adsorpsiyon işleminin etkinliğini belirleyen en önemli faktörlerden biri kullanılan adsorbentdir. Adsorpsiyon uygulamalarında ekonomik ve yüksek verimli adsorbanların kullanılması oldukça önemlidir. Doğada bol miktarda bulunan, çok az işlem gerektiren, endüstriyel atık veya yan ürün olan adsorbanlar ekonomik adsorbanlar olarak tanımlanmaktadır [13]. Son yıllarda karbon içeren tarımsal yan ürün ve atıkların atıksu arıtımında alternatif adsorban olarak kullanımına yönelik birçok araştırma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda atık yeşil çay [13], alchemilla vulgaris atığı [14], zeytin çekirdeği [15], badem kabuğu [16], adaçayı [17], şeftali kabuğu gibi tarımsal atıklar [18] adsorban olarak kullanılmış ve adsorpsiyon kapasiteleri araştırılmıştır.

Bu çalışmada kahve telvesinin sulu çözeltilerden adsorpsiyon yöntemiyle kristal viyole boyar maddesinin gideriminde kullanılabilirliği incelenmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Materyal

1. Adsorbent

Çalışmada adsorbent olarak kahve telvesi kullanılmıştır.

2. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Denemelerde adsorbat olarak katyonik bir boyar madde olan kristal viyole kullanılmıştır. Çözeltilerin pH ayarlaması 0,01 N HCl ve 0,01 N NaOH ile yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kimyasal maddeler analitik saflıktadır.

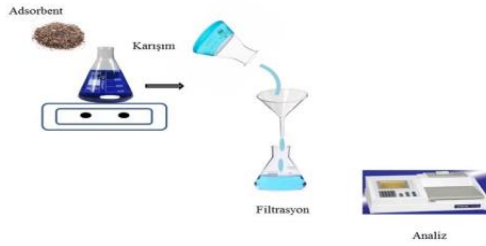
B. Yöntem

1. Adsorbentin hazırlanması

Kahve telvesi renksiz bir süzüntü suyu elde edilene kadar yıkanmış ve saf sudan geçirilerek 105 °C'de etüvde kurutulmuştur.

2. Deney sistemi

Adsorpsiyon denemeleri 250 mL erlenlerde 100 mL boya çözeltileri ile manyetik karıştırıcıda kesikli olarak yürütülmüştür. Deneylerin yürütüleceği deney düzeneği Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Denemelerde belirli zaman aralıklarında alınan numuneler filtre kağıdından süzildükten sonra numunede adsorplanmadan kalan boya miktarları Cecil CE4002 marka spektrofotometrede 579 nm dalga boyunda analiz edilerek belirlenmiştir.

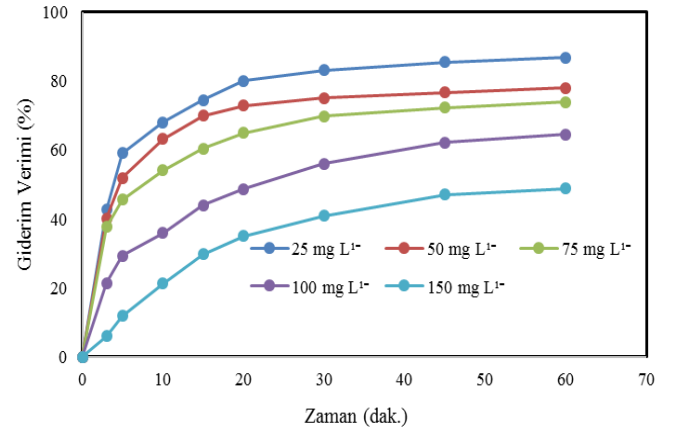


Şekil 1. Deney düzeneği

III. BULGULAR

A. Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonunun Adsorpsiyon Verimi Üzerine Etkisi

Başlangıç boyar madde konsantrasyonunun adsorbe edilen boya miktarı ve uzaklaştırılan boya yüzdesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Boya konsantrasyonu arttıkça adsorpsiyon bölgeleri doygun hale geldiğinden boya gideriminin etkinliği azalmaktadır. Başlangıç boya konsantrasyonunun adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisini belirlemek için 25 ile 150 mg L⁻¹ arasında değişen farklı kristal viyole başlangıç konsantrasyonlarında denemeler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Denemeler 1 g L⁻¹ adsorbent miktarı ve çözeltinin doğal pH'sında (5,58), 25 °C sabit sıcaklık ve 200 rpm karıştırma hızında yürütülmüştür.

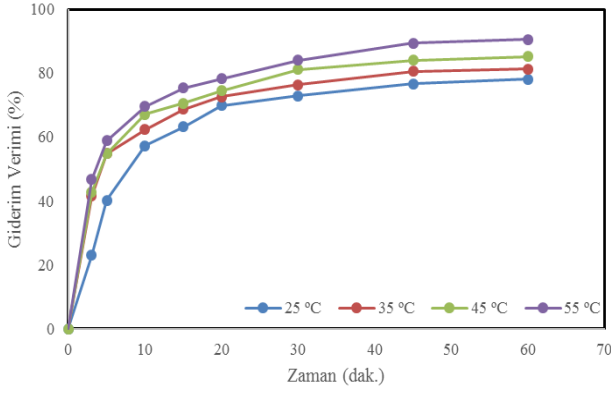


Şekil 2. Kristal viyole gideriminin başlangıç boya konsantrasyonu ile değişimi

Şekil 2'de görüldüğü gibi kristal viyole boya giderim verimi, başlangıç boya konsantrasyonunun 25 mg L⁻¹'den 150 mg L⁻¹'ye artmasıyla %86,76'dan %48,79'a düşmüştür. Bununla birlikte, adsorbe edilen boyar madde miktarı başlangıç konsantrasyonun 25 mg L⁻¹'den 150 mg L⁻¹'ye çıkarılmasıyla 39,69 mg g⁻¹'den 236,45 mg g⁻¹'ye artmıştır. Düşük başlangıç konsantrasyonlarında adsorbent yüzeyindeki aktif bölgelerin boya moleküllerine oranı yüksek olduğundan giderim verimi daha yüksek olmakta başlangıç boyar madde konsantrasyonu arttıkça bu oran düşeceğinden giderim verimi de düşmektedir [19], [20]. Başlangıç konsantrasyonu arttıkça adsorpsiyon kapasitesinin artması boya konsantrasyonu arttıkça boya moleküllerini tutacak aktif bölge sayısının değişmemesinden kaynaklanmaktadır [21]. Bingül ve Adar tarafından yapılan metilen mavisi ve maksilon sarısının atık adaçayına adsorpsiyonunda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [17].

B. Sıcaklığın Adsorpsiyon Verimine Etkisi

Sıcaklık, boya adsorpsiyon hızını etkilediğinden dolayı adsorpsiyon için önemli bir parametredir. Kristal viyolenin kahve telvesi üzerine adsorpsiyonuna sıcaklığın etkisi 25 °C-55 °C arasında değişen sıcaklıklarda incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3'de verilmiştir. Denemeler 1 g L⁻¹ adsorbent miktarı, 50 mg L⁻¹ başlangıç konsantrasyonu ve çözeltinin doğal pH'sında (5,58) yürütülmüştür. Karıştırma hızı 200 rpm'de sabit tutulmuştur.

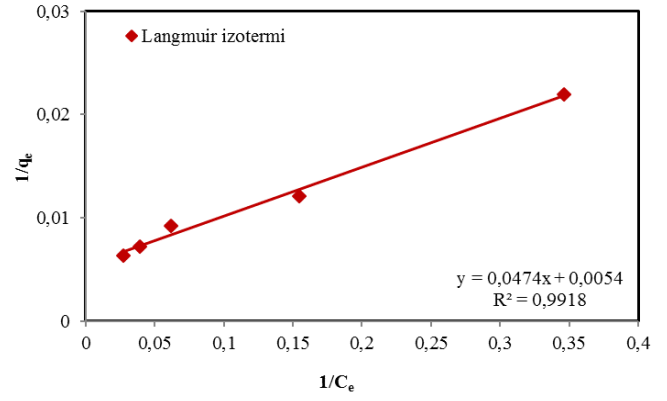


Şekil 3. Kristal viyole gideriminin sıcaklık ile değişimi

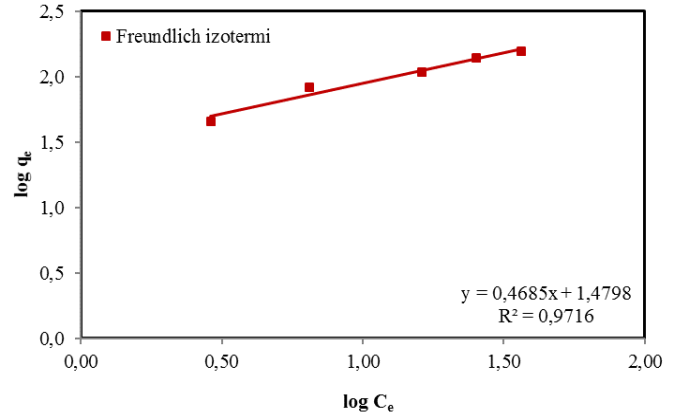
Şekil 3’de sıcaklık arttıkça adsorpsiyon veriminin arttığı ancak çok yüksek sıcaklıklarda önemli bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. 25 °C’de %78.04; 35 °C’de %81.255; 45 °C’de %85.22 ve 55 °C’de %90.59’luk boya giderim verimi elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça giderim veriminin artması adsorbantların hücre duvarı bileşenlerinin yeniden oryantasyonuna, hücre duvarı üzerindeki kimyasal parçaların iyonlaşmasına, adsorbatın dış sınır tabakası boyunca adsorbantın gözeneklerine difüzyon hızının artmasına bağlı olabilir [22]. Tahir ve ark. tarafından yapılan kristal viyolenin atık yer fıstığı kabuğuna adsorpsiyonunda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [23].

C. Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon izoterm parametreleri adsorbantın adsorpsiyon kapasitesi, adsorpsiyon sürecinin doğası ve adsorpsiyonun etkinliği hakkında bilgi verdiğinden adsorbentlerin kullanımını optimize etmede kritik bir öneme sahiptir [24]. Bu çalışmada, elde edilen verilere en uygun modeli bulmak için iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan Langmuir izotermi ile Freundlich izoterm modeli kullanılmıştır. Çalışmada, adsorbent adsorpsiyon kapasitesi ile kristal viyole moleküllerinin başlangıç konsantrasyonu arasındaki ilişkiye dayalı olarak Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon izotermi modellenmiş ve Şekil 4 ve Şekil 5’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. Kristal viyolenin kahve telvesine adsorpsiyonunda Langmuir izoterm modeli



Şekil 5. Kristal viyolenin kahve telvesine adsorpsiyonunda Freundlich izoterm modeli

Langmuir izoterm grafiğinin eğiminden ve y eksenini kesim noktasından K_L ve q_m değerleri, Freundlich izoterm grafiğinin eğiminden ve y eksenini kesim noktasından K_F ve n değerleri hesaplanmış ve Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Langmuir ve Freundlich izoterm sabitleri

Parametreler	q_m mg g ⁻¹	K_L L mg ⁻¹	R_L 25 mg L ⁻¹	R^2
Langmuir	185,185	0,1139	0,259	0,99
Parametreler	n	K_F	R^2	
Freundlich	2,14	30,186	0,97	

Langmuir izoterm modeli tek tabakalı adsorpsiyon modelidir. Çalışmada, Langmuir izotermine göre adsorpsiyon kapasitesi 185,185 mg g⁻¹ olarak belirlenmiştir. Boyutsuz bir sabit olan ve Langmuir adsorpsiyonuna uygunluğu gösteren R_L değeri de 0,259 (25 mg L⁻¹) olarak hesaplanmış olup 0’den büyük ve 1’den küçük olması adsorpsiyonun Langmuir izotermine uygun olduğunu göstermektedir [25].

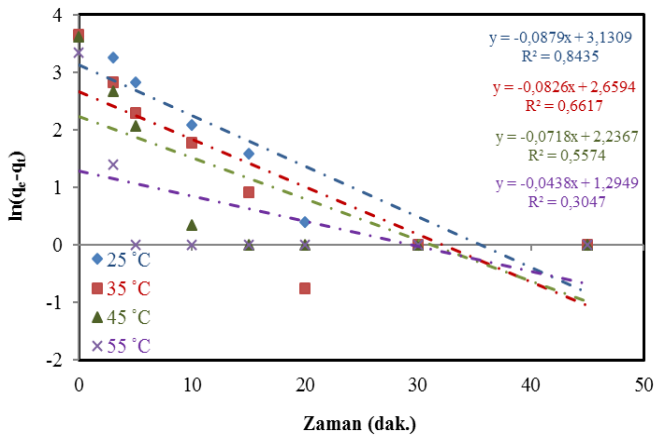
Freundlich izoterm modeli adsorpsiyonun fiziksel olup olmadığı konusunda ve adsorbent heterojenliği hakkında bilgi veren bir izotermidir.

Çalışmada, n değeri 2,14 olarak hesaplanmış olup, bu değer 1'den büyük olması adsorpsiyonun fiziksel olduğunu göstermektedir. $1/n$ değeri de 0,476 olarak hesaplanmış olup, bu değer 0'a yakın olması adsorbent heterojen olduğunu ifade eder [26].

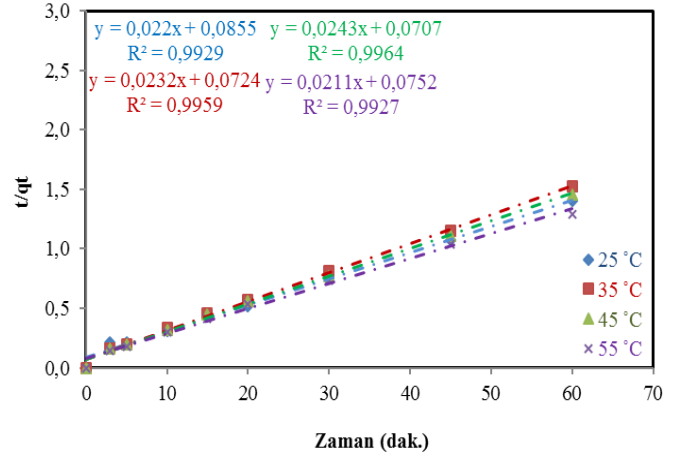
D. Adsorpsiyon Kinetikleri

Kirleticilerin sulu çözeltilerden giderilme hızını tahmin etmek için adsorpsiyon çalışmalarında kinetik çalışmalarının yapılması önemlidir. Çalışmada, adsorpsiyon sürecini tanımlamak için iyi bilinen iki kinetik model kullanılmıştır. Yalancı birinci dereceden kinetik model ve yalancı ikinci dereceden kinetik model.

Kristal viyole boyar maddesinin kahve telvesine adsorpsiyonu çalışmalarında farklı sıcaklıklarda yapılan denemelerde elde edilen verilerin yalancı-birinci derece kinetik modeline uygunluğu, $\ln(q_e - qt)$ 'ye karşı t değerlerinin grafiği çizilerek, yalancı-ikinci derece kinetik modeline uygunluğu da t/qt 'ye karşı t değerlerinin grafiği çizilerek değerlendirilmiş ve Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Elde edilen doğruların eğim ve y eksenini kesim noktalarından q_e ve k_1 ve k_2 değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2 ve Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde, kristal viyolenin kahve telvesine adsorpsiyon denemelerinde tüm sıcaklıklarda deneysel olarak elde edilen q_e değerleri ile hesaplanan q_e değerlerinin birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir. Bu durum kristal viyole boyar maddesinin kahve telvesi ile adsorpsiyonunun yalancı birinci derece kinetiğine uygun olmadığını göstermektedir.



Şekil 6. Kristal viyolenin kahve telvesine adsorpsiyonunda yalancı-1. derece kinetik modeli



Şekil 7. Kristal viyolenin kahve telvesine adsorpsiyonunda yalancı-2. derece kinetik modeli

Tablo 2. Kristal viyolenin kahve telvesi üzerine adsorpsiyonunda yalancı 1. derece kinetik sabitleri

Parametre	q_e (mg g ⁻¹) (hesaplanan)	q_e (mg g ⁻¹) (deneysel)	k_1	R^2
25 °C	22,895	42,730	0,0879	0,84
35 °C	14,288	41,457	0,0826	0,66
45 °C	9,362	41,274	0,0718	0,56
55 °C	3,651	46,370	0,3047	0,31

Tablo 3. Kristal viyolenin kahve telvesi üzerine adsorpsiyonunda yalancı 2. derece kinetik sabitleri

Parametre	q_e (mg g ⁻¹) (hesaplanan)	q_e (mg g ⁻¹) (deneysel)	k_2	R^2
25 °C	45,455	42,730	0,00567	0,99
35 °C	43,103	41,457	0,00743	0,99
45 °C	41,152	41,274	0,00835	0,99
55 °C	47,393	46,370	0,00592	0,31

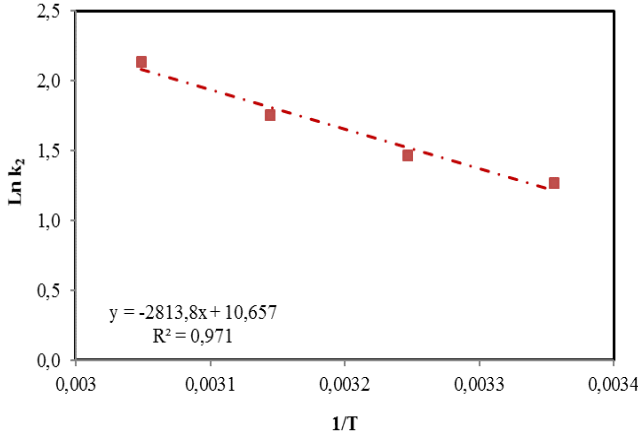
Tablo 2 incelendiğinde, çalışılan sıcaklık aralığında yalancı ikinci derece kinetic modeli için R^2 değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca hesaplanan q_e değerleri ile deneysel olarak elde edilen q_e değerleri oldukça yakın olup bu durum kristal viyole boyar maddesinin kahve telvesi üzerine adsorpsiyonunun yalancı ikinci derece kinetiğine uygun olduğunu göstermektedir.

E. Adsorpsiyon Termodinamiği

Bir adsorpsiyon prosesinin termodinamik değerlendirmesi, prosesin kendiliğinden olup olmadığına karar vermek için gereklidir. Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG°), bir kimyasal reaksiyonun kendiliğindenliğinin bir göstergesidir [27]. Standart serbest enerji değişiminin işareti ve büyüklüğü, standart entalpi ve entropi değişimi gibi termodinamik parametrelere bağlıdır. Entalpideki değişimler (ΔH°) adsorpsiyon sürecinin türünü

gösterirken, entropideki değişimler (ΔS°) katı-çözümlü arayüzündeki artan rasgeleliği yansıtır [28].

Kristal viyolenin kahve telvesi üzerine adsorpsiyonunun termodinamik sabitlerinin bulunması için $\ln k_c$ 'ye karşı $1/T$ grafiği çizilmiş ve Şekil 8'de gösterilmiştir. $\ln k_c$ 'ye karşı $1/T$ grafiğinin eğim ve kesim noktasından ΔH° ve ΔS° değerleri, hesaplanmış ve Tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 8. Kristal viyolenin kahve telvesi üzerine adsorpsiyonunda termodinamik sabitler

Tablo 3. Termodinamik sabitler

T (K)	ΔG (Kj mol ⁻¹)	ΔH (Kj mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔS (Kj mol ⁻¹)
298	-3,144		
303	-3,695	23,394	0,0886
308	-4,560		
313	-5,649		

ΔG° değerinin negatif olması adsorpsiyonun kendiliğinden olduğunu, ΔH° değerinin pozitif olması da adsorpsiyonun endotermik olduğunu ifade etmektedir [29].

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada; kahve telvesinin adsorpsiyon kapasitesi ve sulu çözeltilerden boyar madde gideriminde adsorbent olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kristal viyole boyasının giderim verimi başlangıç boya konsantrasyonunun artmasıyla azalırken birim adsorbent başına adsorplanan boyar madde miktarı arttı. Sıcaklığın 25 °C'den 55°C'ye çıkmasıyla giderim verimi de %78,04'den %90,56'ya yükseldi. Kristal viyole boyasının kahve telvesi üzerine adsorpsiyonunda Langmuir izoterminin Freundlich izoterm modelinden daha uygun olduğu, adsorpsiyonun fiziksel ve adsorbentin heterojen olduğu belirlendi. Kinetik çalışmalara göre deneysel bulgular yalancı ikinci dereceden kinetik modele uyum sağladı.

Entropi, entalpi ve serbest enerjideki değişiklikler, kristal viyole boyasının kahve telvesi üzerine adsorpsiyonunun endotermik, kendiliğinden ve fiziksel adsorpsiyon olduğunu gösterdi. Elde edilen sonuçlar, kahve telvesinin atık sudan boya giderimi için düşük maliyetli bir adsorbent olarak kullanılabileceğini belirledi.

KAYNAKLAR

- [1] S. Chowdhury, Mishra, R., Saha, P., & Kushwaha, P. (2011). Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk. *Desalination*, 265(1-3), 159-168.
- [2] Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S. K., & Gupta, A. K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: A critical review. *Materials Advances*, 2(14), 4497-4531.
- [3] Radhika, R., Jebapriya, G.R., Gnanadoss J.J., (2014). Decolourization of synthetic textile dyes using the edible mushroom fungi *Pleurotus*. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 17, 248-253.
- [4] Lima, E.C.C, Royer, B., Vaghetti J.C.P., Simon, N.M., Cunha, B.M., Pavan, F.A., Benvenutt, E.V., Cataluna-Veses, R., Airoldi, C., (2008). Application of Brazilian pine-fruit shell as a biosorbent to removal of reactive red 194 textile dye from aqueous solution: kinetics and equilibrium study. *Journal of Hazardous Materials*, 155 (39), 536-550.
- [5] Barka, N., Qourzal, S., Assabbane A., Nounah, A., Ait-Ichou, Y., (2011). Remonval of reactive yellow 84 from aqueous solutions by adsorption onto hydroxyapatite. *Journal of Saudi Chemical Society*, 15(3), 263-267.
- [6] Mohammed, B.B., Yamni, K., Tijani, N., Alrashdi, A.A., Zouhri, H., Dehmani, Y., Chung, I.M., Kim, S.H., Lgaz, H., (2019). Adsorptive removal of phenol using faujasite-type Y zeolite: Adsorption isotherms, kinetics and grand canonical Monte Carlo simulation studies. *Journal of Molecular Liquids*, 296, 111997.
- [7] Mittal, A., Mittal, J., Malviya, A., Kaur, D., & Gupta, V. K. (2010). Adsorption of hazardous dye crystal violet from wastewater by waste materials. *Journal of colloid and interface science*, 343(2), 463-473.
- [8] Senthilkumaar, S., Kalaamani, P., & Subburaam, C. V. (2006). Liquid phase adsorption of crystal violet onto activated carbons derived from male flowers of coconut tree. *Journal of hazardous materials*, 136(3), 800-808.
- [9] Kumar, R., & Ahmad, R. (2011). Biosorption of hazardous crystal violet dye from aqueous solution onto treated ginger waste (TGW). *Desalination*, 265(1-3), 112-118.
- [10] Ahmad, R. (2009). Studies on adsorption of crystal violet dye from aqueous solution onto coniferous pinus bark powder (CPBP). *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 767-773.
- [11] Saeed, A., Sharif, M., & Iqbal, M. (2010). Application potential of grapefruit peel as dye sorbent: kinetics, equilibrium and mechanism of crystal violet adsorption. *Journal of hazardous materials*, 179(1-3), 564-572.

- [12] Bingül, Z. (2021). The use of waste green tea leaves for crystal violet adsorption: kinetic, equilibrium and thermodynamics studies. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(4), 2645-2659.
- [13] Saha, P., Chowdhury, S., Gupta, S., & Kumar, I. (2010). Insight into adsorption equilibrium, kinetics and thermodynamics of Malachite Green onto clayey soil of Indian origin. *Chemical Engineering Journal*, 165(3), 874-882.
- [14] Reçber, Z. (2022). Adsorption of methylene blue onto spent *Alchemilla vulgaris* leaves: Characterization, isotherms, kinetic and thermodynamic studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), 4803-4814.
- [15] Jamshidi B, Ehrampoush MH, Dehvari M, 2013. Utilization of olive kernel ash in removal of RB19 from synthetic textile wastewater. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 1(3): 151-157.
- [16] Duran C, Ozdes D, Gundogdu A, Senturk HB, 2011. Kinetics and isotherm analysis of basic dyes adsorption onto almond shell (*prunus dulcis*) as a low cost adsorbent. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 56: 2136–2147.
- [17] Bingul, Z., Adar, E. (2023). Usability of spent *Salvia officinalis* as a low-cost adsorbent in the removal of toxic dyes: waste assessment and circular economy. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(18), 6130-6145.
- [18] Markovic S, Stankovic A, Lopicic Z, Lazarevic S, Stojanovic M, Uskokovic D, 2015. Application of raw peach shell particles for removal of methylene blue. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2): 716-724.
- [19] Bingul Z, Gurbuz H, Aslan A, Ercisli S, 2016. Biosorption of zinc (II) from aqueous solutions by nonliving lichen biomass of *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. *Environmental Engineering and Management Journal*, 15(12): 2733-2740.
- [20] Hamzezadeh A, Rashtbari Y, Afshin S, Morovati M, Vosoughi M, 2020. Application of low-cost material for adsorption of dye from aqueous solution. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-16.
- [21] Birhanu Y, Leta S, Adam G, 2020. Removal of chromium from synthetic wastewater by adsorption onto Ethiopian low-cost *Odaracha* adsorbent. *Applied Water Science*, 10(11): 1-11.
- [22] Al-Qodah, Z. (2000). Adsorption of dyes using shale oil ash. *Water research*, 34(17), 4295-4303.
- [23] Tahir, N., Bhatti, H. N., Iqbal, M., & Noreen, S. (2017). Biopolymers composites with peanut hull waste biomass and application for Crystal Violet adsorption. *International Journal of Biological Macromolecules*, 94, 210-220.
- [24] Öztürk, A., (2016). Sürekli ve Kesikli Adsorpsiyon Sistemlerinde Basic Yellow 2 Gideriminin İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.99.
- [25] Naseem, K., Imran, Q., Ur Rehman, M. Z., Tahir, M. H., Najeeb, J., (2022). Adsorptive removal of heavy metals and dyes from wastewater using *Azadirachta indica* biomass. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-24.
- [26] Saadi, R., Saadi, Z., Fazaeli, R., Fard, N.E., (2015). Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(5), 787-799.
- [27] Hong, S., Wen, C., He, J., Gan, F., Ho, Y.S., (2009). Adsorption thermodynamics of methylene blue onto bentonite. *Journal of Hazardous Materials*, 167 (1-3), 630-633.
- [28] Sahmoune, M.N., (2019). Evaluation of thermodynamic parameters for adsorption of heavy metals by green adsorbents. *Environmental Chemistry Letters*, 17 (2), 697-704.
- [29] Raghav, S., Kumar, D., (2018). Adsorption equilibrium, kinetics, and thermodynamic studies of fluoride adsorbed by tetrametallic oxide adsorbent. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 63(5), 1682-1697.