

## Aktivasyon Kimyasal Türlerinin Metilen Mavisi Adsorpsiyonuna Etkilerinin İzoterm ve Kinetik Modelleri Kullanılarak İncelenmesi

İsmail Yiğit SEÇKİN<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0003-1212-656X

### Makale Bilgileri

Geliş : 13.02.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665940

### Sorumlu Yazar

İsmail Yiğit SEÇKİN

yseckin@cu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Aktif karbon

Piroliz

Adsorpsiyon

**Atf şekli:** SEÇKİN, İ.Y., (2025). Aktivasyon Kimyasal Türlerinin Metilen Mavisi Adsorpsiyonuna Etkilerinin İzoterm ve Kinetik Modelleri Kullanılarak İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 141-151.

### ÖZ

Bu çalışmada, bazik, nötr ve asidik olmak üzere sırasıyla KOH, ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aktivasyon kimyasalları ile aktivasyon işlemine tabi tutulan atık zeytin çekirdeklerinden 3 farklı aktif karbon elde edilmiştir. Mevcut çalışma ile aktif karbon eldesinde kullanılan aktivasyon kimyasallarının türü ve tipinin metilen mavisi adsorpsiyon mekanizmasına etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sentezlenen aktif karbonlarla metilen mavisinin adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilerek giderim mekanizmalarına ve kimyasına etkileri incelenmiştir. Elde edilen kinetik ve izoterm verileri ile de metilen mavisi giderimindeki mekanizmalar ve kirletici-adsorban ilişkileri belirlenmiştir. KOH aktivasyonunun aktif karbon yüzeyinde yüksek miktarda aktif bölge oluşumu sağladığı, ZnCl<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aktivasyonlarında ise aktif karbon yüzeyinde adsorpsiyona direnç gösteren bir tabaka varlığı olduğu tespit edilmiştir. Direnç tabakasının H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aktivasyonunda ise daha kalın olduğu ve metilen mavisi adsorpsiyonuna daha yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, üç aktivasyon kimyasalıyla da elde edilen aktif karbonlar ile kimyasal ve tersinir adsorpsiyon gerçekleştirildiği sonucuna ulaşılmıştır.

## Investigation Effects of Activating Agent Types on Methylene Blue Adsorption with Using Isotherm and Kinetic Models

### Article Info

Received : 13.02.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665940

### Corresponding Author

İsmail Yiğit SEÇKİN

yseckin@cu.edu.tr

### Keywords

Activated carbon

Pyrolysis

Adsorption

**How to cite:** SEÇKİN, İ.Y., (2025). Investigation Effects of Activating Agent Types on Methylene Blue Adsorption with Using Isotherm and Kinetic Models. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 141-151.

### ABSTRACT

Three different activated carbons were obtained from waste olive stones through activation with KOH (basic), ZnCl<sub>2</sub> (neutral), and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (acidic), respectively. This study aimed to specify the effects of various activating agent types on the methylene blue dye adsorption mechanism. Adsorption experiments of methylene blue were conducted using these activated carbons to investigate their effects on removal mechanisms and adsorption chemistry. The kinetic and isotherm data obtained were used to determine the removal mechanisms of methylene blue and the pollutant-adsorbent interactions. It was found that KOH activation led to the formation of a high number of active sites on the activated carbon surface, whereas ZnCl<sub>2</sub> and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activation resulted in the presence of an adsorption-resistant layer on the surface. This resistance layer was observed to be thicker in H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activation, leading to greater resistance to methylene blue adsorption. Additionally, it was concluded that the activated carbons obtained with all three activation chemicals exhibited both chemical and reversible adsorption.

## 1. GİRİŞ

Tekstil, kağıt, deri ve boya üretimi endüstrilerinde boyar maddeler yaygın olarak kullanılan üretim maddeleridir. Boyar maddelerin insan sağlığına olumsuz etkileri ve mikroorganizmalar için toksik özellikleri olması nedeniyle bu endüstrilerden kaynaklı atıksulardan boyar madde giderimine verilen önem giderek artmaktadır [1]. Özellikle su tüketimi çok yüksek miktarlarda olan tekstil endüstrisinden kaynaklanan atıksular sucul yaşam ve çevre sağlığı açısından büyük endişe yaratmaktadır. Tekstil endüstrisinde oluşan atıksular ağartma, yıkama ve boyama işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu işlemlerde yer alan üretim kimyasalları, boyalar ve ham maddelerin çeşitliliği atıksu karakteristiğinde kompleks bir kimyasal içerik oluşturmaktadır. Özellikle boyama işleminde kullanılan asidik, bazik, reaktif ve direkt gibi boya tipleri, tekstil atıksularının karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir [2]. Metilen mavisi de boyama işleminde yaygın olarak kullanılan boyalardan bir tanesidir. Tekstil endüstrisinde pamuk, yün ve ipek boyamada sıklıkla kullanılmaktadır. Metilen mavisi insan ve hayvanlarda göz yanmasına, methemoglobinemiye, siyanoza, taşikardiye ve cilt tahrişlerine sebep olmaktadır [3].

Boya içeren atıksular, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri ile arıtılabilmektedirler. Adsorpsiyon, ekstraksiyon ve membran filtrasyon başlıca tercih edilen arıtma yöntemleri arasındadır [4-8]. Bu yöntemler içerisinde adsorpsiyon ile boya giderimi, kolay işletme, düşük maliyet ve verimlilik gibi özelliklerinden dolayı öncelikli olarak tercih edilen bir arıtma metodudur [9,10].

Atıksulardan adsorpsiyon yöntemi ile boya giderimi, aktifleştirilmiş bitümlü kömür, kil, kenevirde elde edilmiş karbon, fosfat kayacı, bitki yaprakları, meyve çekirdekleri ve çekirdek kabukları, çeltik kabuğu, biyokütleden elde edilmiş aktif karbonlar gibi malzemelerle gerçekleştirilmektedir [11]. Aktif karbonlar, geniş yüzey alanları ve yüzeylerinde bulunan fonksiyonel gruplar sayesinde atıksulardan boya gideriminde en etkili adsorpsiyon malzemesidir. Aktif karbon üretimi karbonizasyon ve aktivasyon basamaklarına dayalı olarak gerçekleştirilmektedir [12,13]. Karbonizasyon işlemi ile aktif karbonun elde edileceği ham maddenin sahip olduğu uçucu içerik 300 °C ile 900 °C arasında değişen sıcaklıklarda uzaklaştırılmaktadır. Aktivasyon işleminde ise, elde edilen ürüne daha yüksek yüzey alanı, pürüzlülük ve kendine has kimyasal özellikler kazandırılmaktadır. Aktivasyon işlemi, fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak 3 farklı yolla gerçekleştirilebilmektedir[14]. Kimyasal aktivasyon, diğer aktivasyon işlemlerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda ve sürelerde gerçekleştirilebildiğinden enerji verimliliği ve düşük maliyet açısından avantajlı bir işlem olarak öne çıkmaktadır [15-19]. Kimyasal aktivasyon, aktif karbonun hammaddesi ile NaOH, KOH, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> gibi aktivasyon kimyasalları ile birlikte pirolize tabi tutulma işlemidir. Kullanılan aktivasyon kimyasalının tipi elde edilecek aktif karbonun özelliklerini belirleme açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde kimyasal aktivasyon işlemi ile aktif karbon sentezi gerçekleştirilen birçok çalışma yer almaktadır. Majoudi ve arkadaşları, ZnCl<sub>2</sub> aktivasyon kimyasalı kullanarak yağlı çamurdan aktif karbon eldesi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, 1258 cm<sup>2</sup>/g yüzey alanı elde etmeyi başarmışlardır [20]. Ruffor ve arkadaşları ise, FeCl<sub>3</sub>, ZnCl<sub>2</sub> ve MgCl<sub>2</sub> aktivasyon kimyasallarının elde edilen aktif karbonun grafitizasyon derecelerine (I<sub>B</sub>/I<sub>G</sub>) etkilerini kıyaslamışlardır ve ZnCl<sub>2</sub> ile en iyi grafitizasyon derecesini sağladıklarını belirtmişlerdir. Xi ve arkadaşları, potasyum bazlı aktivasyon kimyasallarının aktif karbon gözenek hacmine etkilerini incelemişlerdir. 900 °C sıcaklıkta K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aktivasyonu ile elde ettikleri aktif karbonda 2.03 cm<sup>3</sup>/g gözenek hacmi sağlayarak en yüksek değeri elde etmişlerdir [21]. Hapiz ve arkadaşları, ananas meyvesine ait taç yapraklarından ZnCl<sub>2</sub> aktivasyonu ile aktif karbon eldesi gerçekleştirerek metilen mavisi adsorpsiyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda 1070 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip aktif karbon eldesi gerçekleştirdiklerini bildirmişlerdir [22]. Yaacoubi ve arkadaşları ise zeytin çekirdeğinden elde edilmiş aktif karbon ile sodyum aljinatı kullanarak kompozit malzeme eldesi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri malzeme ile metilen mavisi adsorpsiyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada malzeme üzerinde gerçekleştirilen FTIR analizleri ile malzeme üzerinde tespit edilen hidroksil ve karbonil fonksiyonel gruplarının metilen mavisi adsorpsiyonunda etkili olduğunu vurgulamışlardır [23]. Hashem ve arkadaşları yerfistığı kabukları ile 600 °C'de ZnCl<sub>2</sub> kullanarak aktif karbon eldesi gerçekleştirmişlerdir. Sentezlenen aktif karbonun yüzey pH değerinin nötr olduğu bildirilmiştir [24]. Dalmaz ve Özak, atık sigara izmaritlerinden ZnCl<sub>2</sub> aktivasyonu ile aktif karbon sentezlemişlerdir. Aktif karbona ait yüzey taramalı elektron mikroskopu ile gerçekleştirilen analizlerde aktif karbon yüzeyinin düzensiz bir morfolojiye sahip olduğunu ve yüzeyde geniş dairesel gözeneklerin oluştuğunu belirtmişlerdir [25]. Bu çalışmalarda, genel olarak aktivasyon kimyasallarının aktif karbonların fizikokimyasal özelliklerine etkileri incelenmiştir. Buna karşın, aktivasyon kimyasallarının adsorpsiyon mekanizmasına etkisinin incelenmesi konusunda yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Adsorpsiyon işlemi esnasında aktif karbon ve kirletici arasındaki etkileşimin belirlenmesi, endüstriyel adsorpsiyon

proseslerinin tasarımı, optimizasyonu ve işletme problemlerinin çözülmesi konusunda kritik bir öneme sahiptir. Adsorpsiyon izoterm ve kinetik modelleri, kirletici ve aktif karbon arasındaki etkileşimi belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, tekstil endüstrisinde renk parametresine neden olan boyar maddelerin atık zeytin çekirdeğinden elde edilen aktif karbon ile gideriminde aktivasyon kimyasalı türünün adsorpsiyon mekanizmasına etkisi izoterm ve kinetik modelleri kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Asidik, nötr ve bazik olmak üzere 3 farklı aktivasyon kimyasalı kullanılmıştır. Çalışmada, katılara tutunma eğilimi yüksek olduğu ve organik kirletici içeren renkli atıksularda model kirletici olarak kabul gördüğü için boyar madde olarak metilen mavisi kullanılmıştır [26]. Çevresel açıdan büyük endişeler yaratan boyar maddelerin adsorpsiyonunda kullanılacak olan aktif karbonların üretiminde seçilecek aktivasyon kimyasalının türü büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma ile literatürde eksikliği bulunan boya gideriminde kullanılacak aktif karbonların üretimi için uygun aktivasyon kimyasalı seçimi konusuna katkı sağlanması amaçlanmıştır.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Aktif Karbon Sentezinde Kullanılan Ham Madde ve Kimyasallar

Çalışmada aktif karbon eldesi için Adana İli'nde faaliyet gösteren zeytinyağı üretim tesisinden atık olarak çıkan zeytin çekirdeği granülleri kullanılmıştır (Şekil 1). Zeytin çekirdeği granülleri saf suyla yıkandıktan sonra 70 °C'de 24 saat etüvde kurutulduktan sonra aktif karbon sentezine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 1. Zeytin çekirdeği granülleri

Kimyasal aktivasyon işlemi için ise analitik saflıktaki Merck marka KOH, ZnCl<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kimyasalları kullanılmıştır. Metilen mavisi çözeltilerinin hazırlanmasında ise deiyonize su ve AFG Bioscience marka metilen mavisi boyası kullanılmıştır.

### 2.2. Aktif Karbon Eldesi

Çalışmada aktif karbon sentezi iki basamaklı piroliz yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, zeytin çekirdeği granülleri, 700 °C'de 2 saat boyunca pirolize tabi tutularak biyokömür eldesi sağlanmıştır. Biyokömürler ortam sıcaklığına gelene kadar piroliz ortamında bekletilmiş ve daha sonraki işlemler için desikatörde muhafaza edilmiştir.

Aktivasyon işlemi için 10'ar g alınan biyokömürler 250 mL hacmindeki cam erlenler içerisinde KOH, ZnCl<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> çözeltileri içerisinde, Velp marka inkübatörde 25°C'de, 24 saat süre ile manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak impregnasyon işlemine tabi tutulmuştur.

İmpregnasyon işlemi, 1:1 kütle oranında (aktivasyon kimyasalı/biyokömür), 1:10 g/mL (g biyokömür/mL çözelti) katı sıvı oranında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra çözelti ve biyokömür karışımı filtre edilerek ayrılan biyokömler 70 °C'de 24 saat kurularak aktif karbon sentezi için hazır hale getirilmiştir. Devamında impregnasyona tabi tutulmuş 10'ar g'lık biyokömlere ayrı ayrı 750 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca ikinci bir piroliz işlemi gerçekleştirilerek aktif karbon eldesi sağlanmıştır. Piroliz işlemlerinin tamamı Protherm marka yakma fırınında, ortalama 15 °C/dak ısınma hızında ve 8 L/sa'lik N<sub>2</sub> gaz atmosferi (inert ortam) altında gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen aktif karbonlar Çizelge 1'deki şekilde adlandırılmışlardır.

**Çizelge 1.** Sentezlenen aktif karbonlar

<b>Aktivasyon kimyasalı</b>	<b>Elde edilen aktif karbon</b>
KOH	AK-K
ZnCl <sub>2</sub>	AK-Zn
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	AK-P

### **2.3. Aktif Karbon Sentezinde Kullanılan Ham Madde ve Kimyasallar**

Elde edilen aktif karbonların sulu çözülden metilen mavisi giderimi verimleri kesikli reaktör çalışma prensibine dayalı olarak gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmaları ile belirlenmiştir. Adsorpsiyon çalışmaları, hidrolik bekleme süresi ve metilen mavisi başlangıç konsantrasyonu değişkenleri ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 2'de çalışmada kullanılan değişkenlere ait değerler verilmiştir. Metilen mavisi konsantrasyonları HACH DR6000 marka ve modele sahip UV spektrofotometre ile 665 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

**Çizelge 2.** Metilen mavisi adsorpsiyonu çalışmalarına ait değişkenler ve değerler

<b>Değişkenler</b>	<b>Değerler</b>
Süre (dak)	10 – 20 – 30 – 40 – 50 - 60
Başlangıç konsantrasyonu (mg/L)	9,2 - 18,7 – 27,5 – 40,3 – 50,2 – 60,3

Kesikli adsorpsiyon deneylerinde adsorpsiyon verimi ve birim adsorban kütlesi başına giderilen metilen mavisi miktarı t bekleme süresi için sırasıyla eşitlik (1) ve eşitlik (2) ile hesaplanmıştır.

$$Verim (\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) * V}{M} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde C<sub>0</sub>, başlangıç metilen mavisi konsantrasyonunu (mg/L), C<sub>t</sub>, belirlenen adsorpsiyon zamanı sonunda çözüde kalan metilen mavisi konsantrasyonunu (mg/L), V, adsorpsiyon işleminde kullanılan metilen mavisi çözeltisi hacmini (L), q<sub>t</sub>, belirlenen adsorpsiyon süresi sonunda birim adsorban kütlesi başına giderilen metilen mavisi miktarını (mg/g), M ise kullanılan adsorban miktarını (g) ifade etmektedir.

### **2.4. Adsorpsiyon Kinetik Modelleri**

Çalışmada elde edilen 3 farklı aktif karbon ile ayrı ayrı kinetik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, 50 mg/L metilen mavisi konsantrasyonuna sahip çözelti ile 250 mg aktif karbon 500 mL'lik erlen içerisinde biraraya getirilerek kinetik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kesikli reaktör prensibinde gerçekleştirilen işlem, çalkalayıcı içerisinde 250 dev/dak karıştırma hızında 60 dakika boyunca 10'ar dakika ara ile numune alınarak uygulanmıştır. Elde edilen data lar Elovich, Yalancı Birinci Dereceden, Yalancı İkinci Dereceden (Tip 1) ve Partikül İçi Difüzyon kinetik modellerinde uygulanmıştır. Kinetik modellerine ait doğrusal (lineer) ifadeler Çizelge 3'te verilmiştir [27-31].

**Çizelge 3.** Çalışmada kullanılan kinetik modellere ait bilgiler

Kinetik modeli	Lineer denklem	Eksenler (Y,X)	Parametreler
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$	$q_t, \ln t$	$\beta, \alpha$
Yalancı Birinci Derece	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$	$\ln(q_e - q_t), t$	$q_e, k_1$
Yalancı İkinci Derece (Tip 1)	$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	$\frac{1}{q_t}, t$	$q_e, k_2$
Partikül İçi Difüzyon	$q_t = k_p \sqrt{t} + C$	$q_t, \sqrt{t}$	$k_p$

## 2.5. Adsorpsiyon İzoterm Modelleri

Çalışmada elde edilen 3 farklı aktif karbonla ayrı ayrı izoterm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İzoterm çalışmaları farklı metilen mavisi başlangıç konsantrasyonlarında sabit aktif karbon kütlesi ile uygulanmıştır. Başlangıç konsantrasyonları Çizelge 2’de verilmiştir. Kullanılan aktif karbon kütlesi 50 mg olarak seçilmiştir. Adsorpsiyon çalışmaları 50 mL çözelti hacminde, 250 dev/dak karıştırma hızında, çalkalayıcı içerisinde yapılmıştır. Elde edilen datalar, Freundlich, Langmuir (Tip 1), Temkin ve Dubinin-Radushkevich izoterm modellerine uygulanmıştır. Modellere ait doğrusal (lineer) ifadeler Çizelge 4’te verilmiştir [31,32].

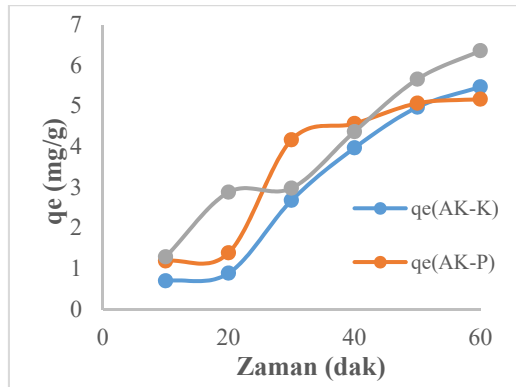
**Çizelge 4.** Çalışmada kullanılan izoterm modellerine ait bilgiler

İzoterm modeli	Lineer denklem	Eksenler (Y,X)	Parametreler
Freundlich	$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$	$\ln q_e, \ln C_e$	$K_f, n$
Langmuir (Tip1)	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} K_L} + \frac{C_e}{q_{max}}$	$\frac{C_e}{q_e}, C_e$	$q_e, K_L$
Temkin	$q_e = \frac{RT}{A_T} \ln K_T + \frac{RT}{A_T} \ln C_e$	$q_e, \ln C_e$	$q_e, K_T$
Dubinin-Radushkevich	$\ln q_e = \ln q_m - \beta \varepsilon^2$	$\ln q_e, \varepsilon^2$	$q_m, \beta$

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 3.1. Hidrolik Bekletme Süresinin Adsorpsiyon Performansına Etkisi

AK-K, AK-Zn, AK-P aktif karbonları ile 10, 20, 30, 40, 50 ve 60 dakikalık hidrolik bekletme sürelerinde elde edilen metilen mavisi adsorpsiyon kapasiteleri Şekil 2’deki grafikte gösterilmiştir.

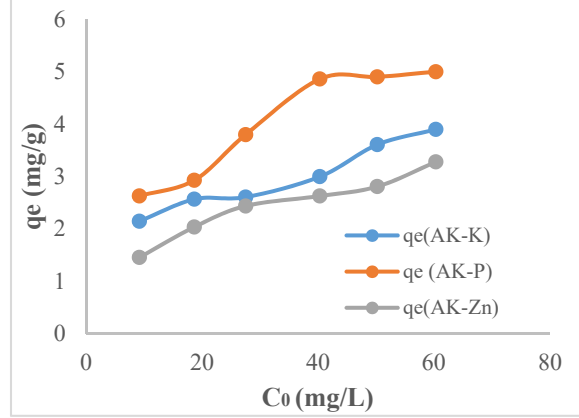
**Şekil 2.** Hidrolik bekletme süresinin adsorpsiyon kapasitesine etkisi

Yapılan çalışmalar sonucunda AK-P aktif karbonunun adsorpsiyon kapasitesinin 50. dakikadan itibaren önemli bir değişikliğe uğramadığı görülmektedir. Belirlenen süre sonunda en yüksek adsorpsiyon kapasitesine AK-Zn aktif karbonunun ulaştığı belirlenmiştir. 60 dakika sonunda AK-K, AK-P ve AK-Zn aktif karbonlarının adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 5,47 mg/g, 5,17 mg/g ve 6,36 mg/g olarak hesaplanmıştır.



### 3.2. Başlangıç Metilen Mavisi Konsantrasyonunun Aktif Karbon Adsorpsiyon Kapasitesine Etkisi

Sentezlenen 3 ayrı aktif karbon 6 farklı başlangıç konsantrasyonuna sahip metilen mavisi çözeltileri ile ayrı ayrı adsorpsiyon işlemine tabi tutulmuşlardır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar Şekil 3'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3. Başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon kapasitesine etkisi

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde başlangıç konsantrasyonu arttıkça üç aktif karbonun da adsorpsiyon verimlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, artan boya konsantrasyonunun yarattığı konsantrasyon gradyanının kütle transferine olan direnci, yaratılan itme kuvvetiyle azaltarak adsorpsiyon kapasitesinde artışa neden olmasıdır [33]. En yüksek adsorpsiyon kapasitesi AK-P ile 5 mg/g olarak sağlanırken, AK-K ve AK-Zn aktif karbonları ile de sırasıyla 3,90 mg/g ve 3,28 mg/g adsorpsiyon kapasitesi değerleri elde edilmiştir. 50 mg/L başlangıç konsantrasyonundan itibaren adsorpsiyon kapasitesindeki artış oranında azalma başladığı görülmektedir. Pua ve arkadaşları metilen mavisi adsorpsiyonu üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, metilen mavisinin başlangıç konsantrasyonunun artması ile boya moleküllerinin birleşme eğiliminin arttığını ve bu durumun adsorpsiyon mekanizmasını olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir [34].

### 3.3. Adsorpsiyon Kinetik Modelleri

KOH, ZnCl<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kimyasalları ile aktive edilmiş aktif karbonlara ait kinetik çalışmalarının verileri sırasıyla Çizelge 5, Çizelge 6 ve Çizelge 7'de verilmiştir. Kinetik çalışması verileri Elovich, Yalancı Birinci Derece, Yalancı İkinci Derece ve Partikül İçi Difüzyon kinetik modellerine uygulanmıştır. Kinetik modellerinden elde edilen doğru denklemleri ile tahmin edilen adsorpsiyon kapasitesi değerleri bulunarak ortalama bağıl hata değerleri hesaplanarak hangi kinetik modelin adsorpsiyonu daha iyi açıkladığı belirlenmiştir. Kinetik modellerin uygunluğu belirlenirken en düşük ortalama bağıl hata değerinin en iyi sonucu verdiği dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde KOH aktivasyonu ile gerçekleştirilen kinetik çalışmalarının Yalancı İkinci Derece kinetik modeliyle daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda 20 mg/L ile 100 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip Cr(VI), benzen, metil oranj, Cu(II), resorcinol, metilen mavisi gibi kirleticilerin giderimlerinde Yalancı İkinci Dereceden (Tip 1) kinetik modelinin proseslere uygunluk gösterdiği belirtilmiştir. Elde edilen sonucun literatürü desteklediği görülmüştür [35-39]. Ayrıca Yalancı İkinci Dereceden kinetik modeli aktif karbonun yüzeyinde bol miktarda aktif bölgenin varlığını işaret etmektedir. Literatürde gerçekleştirilen bir çalışmada, biyokömür ile aynı biyokömürün modifiye edilmiş halinin Pb (II) adsorpsiyonu araştırılmıştır ve modifiye edilmiş biyokömürün Yalancı İkinci Dereceden kinetik modeliyle uyumlu bir adsorpsiyon gerçekleştirdiği belirtilmiştir [40]. Sanou ve arkadaşları yarfıstığı kabuklarından H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aktivasyonu ile aktif karbon sentezlemişlerdir ve elde edilen aktif karbon ile metilen mavisi adsorpsiyonu çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yapılan kinetik model çalışmalarında metilen mavisi adsorpsiyonunu en iyi açıklayan modeli Yalancı İkinci Dereceden kinetik modeli olarak açıklamışlardır. Sanou ve arkadaşları, bu modelin hız sınırlayıcı basamağının kimyasal adsorpsiyon olduğunu ve metilen mavisi adsorpsiyonunun fizikokimyasal etkileşimlerle gerçekleştiğini bildirmişlerdir [41].

**Çizelge 5.** KOH aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait kinetik çalışması verileri

Kinetik model	Doğru denklemi	R <sup>2</sup>	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Elovich	$y = 2,9066x - 6,7664$	0,90	39,60	$\beta = 2,91$ $\alpha = 0,03$
Yalancı Birinci Derece	$y = -0,0456x + 2,0583$	0,85	166,59	-
Yalancı İkinci Derece	$y = -0,1572x + 18,673$	0,38	20,72	-
Partikül İçi Difüzyon	$y = 1,1658x - 3,5419$	0,95	30,25	$k_p = 1,17$ $I = -3,54$

**Çizelge 6.** ZnCl<sub>2</sub> aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait kinetik çalışması verileri

Kinetik model	Doğru denklemi	R <sup>2</sup>	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Elovich	$y = 2,7421x - 5,3957$	0,91	30,75	$\beta = 2,74$ $\alpha = 0,05$
Yalancı Birinci Derece	$y = -0,0397x + 2,0364$	0,87	62,13	-
Yalancı İkinci Derece	$y = 0,0378x + 7,3716$	0,37	30,75	-
Partikül İçi Difüzyon	$y = 1,0944x - 2,3231$	0,96	29,74	$k_p = 0,07$ $I = -2,32$

**Çizelge 7.** H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait kinetik çalışması verileri

Kinetik model	Doğru denklemi	R <sup>2</sup>	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Elovich	$y = 2,576x - 5,1626$	0,88	30,31	$\beta = 2,58$ $\alpha = 0,05$
Yalancı Birinci Derece	$y = -0,0765x + 2,1661$	0,89	90,79	-
Yalancı İkinci Derece	$y = 0,0119x + 9,6145$	0,007	28,43	-
Partikül İçi Difüzyon	$y = 1,0046x - 2,1414$	0,88	28,25	$k_p = 1,00$ $I = -2,14$

Çizelge 6 ve Çizelge 7 incelendiğinde ZnCl<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aktivasyonlarının Partikül İçi Difüzyon Modeli ile uyumlu bir adsorpsiyona neden olduğu görülmüştür. Partikül İçi Difüzyon kinetik modeli genellikle tasarım amaçlı adsorpsiyon mekanizmasını açıklar. Partikül içi difüzyonun adsorpsiyona karşı oluşturduğu direnci yorumlamak için de bu modele ait denklem kullanılmaktadır. Çizelge 3'te de belirtildiği gibi t<sup>0,5</sup>'e karşı q<sub>t</sub> değerleri ile elde edilen lineer grafikte eğim k<sub>p</sub> değerini verirken, elde edilen doğrunun y eksenini kestiği nokta değeri I olarak adlandırılmaktadır [42]. Elde edilen k<sub>p</sub> değeri (mg g<sup>-1</sup> min<sup>-1/2</sup>) partikül içi difüzyon hız sabitini ifade ederken, I değeri ise sınır tabaka kalınlığını ifade etmektedir. I değeri büyüdükçe sınır tabakasının adsorpsiyona etkisi artmaktadır [43]. Buna göre, AK-Zn ve AK-P aktif karbonları kıyaslandığında, AK-P aktif karbonunun daha büyük I değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, AK-P aktif karbonunun metilen mavisi adsorpsiyonuna direnci AK-Zn aktif karbonuna göre daha yüksektir. AK-Zn aktif karbonu ile daha kısa sürede daha yüksek metilen mavisi giderimi beklenmektedir.

### 3.4. Adsorpsiyon İzoterm Modelleri

KOH, ZnCl<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kimyasalları ile aktive edilmiş aktif karbonlara ait izoterm çalışması verileri sırasıyla Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10'da verilmiştir.

**Çizelge 8.** KOH aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait izoterm çalışması verileri

İzoterm modeli	Doğru denklemi	R <sup>2</sup>	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Freundlich	$y = 0,273x + 0,1856$	0,90	6,00	n = 3,66 K <sub>f</sub> = 1,20
Langmuir (Tip 1)	$y = 0,2242x + 2,7663$	0,94	10,15	q <sub>m</sub> = 4,46 K <sub>L</sub> = 0,08 R <sub>L</sub> = 0,20
Temkin	$y = 0,7903x + 0,416$	0,85	7,39	-
Dubinin-Radushkevich	$y = -0,0414x + 1,1714$	0,57	11,94	-

**Çizelge 9.** ZnCl<sub>2</sub> aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait izoterm çalışması verileri

İzoterm modeli	Doğru denklemi	R <sup>2</sup>	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Freundlich	$y = 0,3776x - 0,3726$	0,98	6,00	n = 2,65 K <sub>f</sub> = 0,69
Langmuir (Tip 1)	$y = 0,2581x + 3,8127$	0,97	10,14	q <sub>m</sub> = 3,87 K <sub>L</sub> = 0,07 R <sub>L</sub> = 0,23
Temkin	$y = 0,8337x - 0,2818$	0,97	24,75	-
Dubinin-Radushkevich	$y = -0,0767x + 1,0254$	0,88	26,99	-

**Çizelge 10.** H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait izoterm çalışması verileri

İzoterm modeli	Doğru denklemi	R <sup>2</sup>	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Freundlich	$y = 0,3443x + 0,2582$	0,92	6,00	n = 2,90 K <sub>f</sub> = 1,29
Langmuir (Tip 1)	$y = 0,1607x + 2,0713$	0,97	10,15	q <sub>m</sub> = 6,22 K <sub>L</sub> = 0,85 R <sub>L</sub> = 0,02
Temkin	$y = 1,2767x - 0,0633$	0,90	25,70	-
Dubinin-Radushkevich	$y = -0,0477x + 1,4907$	0,63	25,10	-

Üç aktif karbona ait izoterm verileri incelendiğinde, bu aktif karbonlarla gerçekleştirilen adsorpsiyon işlemini en iyi açıklayan izoterm modelinin Freundlich izoterm modeli olduğu saptanmıştır.

Freundlich izotermi ampirik bir modeldir ve farklı enerjilere sahip adsorpsiyonların gerçekleştiği heterojen bir süreci tanımlamaktadır. Ayrıca Freundlich izotermi adsorpsiyon esnasında sınırsız sayıda tek katman oluşumunu ve tersinir adsorpsiyon mekanizmasının varlığını ifade etmektedir [32]. Freundlich izoterm modeli ile elde edilen n değeri, adsorpsiyonun fiziksel ya da kimyasal olarak gerçekleştiği hakkında bilgi vermektedir. N değeri 1'den küçük olduğunda fiziksel adsorpsiyonun, n değeri 1'den büyük olduğunda ise kimyasal adsorpsiyonun gerçekleştiği anlamına gelmektedir [44]. Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10 incelendiğinde üç aktif karbon ile gerçekleştirilen metilen mavisi giderimlerinin kimyasal adsorpsiyon ile gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Kimyasal adsorpsiyonun gerçekleştiği durumlarda Freundlich İzoterm Modeline uyum gösteren adsorpsiyon proseslerinde tek tabakalı adsorpsiyonun gerçekleştiği bildirilmektedir [45]. Dimbo ve arkadaşları H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aktivasyonu ile afrika lale ağacı saplarından aktif karbon eldesi gerçekleştirerek metilen mavisi adsorpsiyonu üzerine çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri izoterm verileri ile metilen mavisi adsorpsiyonunun Freundlich izotermine uyumlu olarak gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Freundlich izoterm modeline ait n ve K<sub>f</sub> değerlerini sırasıyla 3 ve 28,43 Lg/L bulmuşlar ve adsorpsiyonun kimyasal olarak gerçekleştiğini bildirmişlerdir [46].



#### 4. SONUÇLAR

KOH, ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kimyasalları kullanılarak atık zeytin çekirdeğinden 3 farklı aktif karbon eldesi gerçekleştirilmiştir. Bu aktif karbonlarla metilen mavisinin adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilerek aktivasyon kimyasal türlerinin metilen mavisi giderim mekanizmalarına ve kimyasına etkileri incelenmiştir. Kinetik model çalışmalarında bekletme süresinin metilen mavisine giderimi etkileri de incelenmiştir. 60 dakikalık süre boyunca gerçekleştirilen çalışmada, en yüksek adsorpsiyon kapasitesinin nötr aktivasyon kimyasalı olan ZnCl<sub>2</sub> ile elde edilen AK-Zn aktif karbonu ile elde edildiği görülmüştür. AK-P aktif karbonu ise 40. dakikadan itibaren metilen mavisi adsorpsiyonu gerçekleştirilmemiştir. İzoterm çalışmaları için farklı başlangıç konsantrasyonlarında sabit aktif karbon kütleleri ile metilen mavisi adsorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise, başlangıç konsantrasyonu arttıkça AK-P aktif karbonunun diğerlerine göre daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine ulaştığı görülmüştür. Gerçekleştirilen kinetik çalışmalarında ise AK-K aktif karbonunun yalnızca ikinci dereceden kinetik modele uyumlu olarak adsorpsiyon yaptığı bunun sonucunda ise AK-K aktif karbonunun yüzeyinde bol miktarda aktif bölgenin olduğu anlaşılmıştır. AK-Zn ve AK-P aktif karbonları ise partikül içi difüzyon kinetik modeline uyumlu olarak adsorpsiyon gerçekleştirmişlerdir. Partikül içi difüzyon kinetik modeli çalışması yardımıyla AK-Zn ve AK-P aktif karbonlarının metilen mavisi adsorpsiyonuna gösterdikleri dirençler I değeri üzerinden kıyaslanmıştır. Daha yüksek I değerine sahip AK-P aktif karbonunun AK-Zn aktif karbonuna göre metilen mavisi adsorpsiyonuna karşı daha yüksek bir yüzey direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, AK-Zn aktif karbonunun AK-P aktif karbonuna göre daha kısa sürelerde daha verimli metilen mavisi adsorpsiyonu gerçekleştirmesi beklenmektedir. İzoterm çalışmalarında ise üç aktif karbonun tamamının Freundlich izotermine uyumlu olarak adsorpsiyon gerçekleştirdiği görülmüştür. Buna bağlı olarak üç aktif karbonla da gerçekleştirilen adsorpsiyon işleminin kimyasal ve tersinir olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Aynı zamanda aktif karbon yüzeylerinde tek tabakalı adsorpsiyon gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Çalışma sonuçları incelendiğinde yüksek metilen mavisi konsantrasyonlarında H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile aktive edilmiş aktif karbonların kullanılmaması önerilmektedir. İzoterm ve kinetik modelleri çalışma verileri ele alındığında ise KOH ve ZnCl<sub>2</sub>, metilen mavisi adsorpsiyonunda kullanılacak aktif karbonların sentezinde uygun kimyasallar olarak öne çıkmaktadır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Weng, C.H. & Pan, Y.F. (2007). Adsorption of a cationic dye (methylene blue) onto spent activated clay. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1), 355-362.
2. El Qada, E.N., Allen, S.J. & Walker, G.M. (2006). Adsorption of Methylene Blue onto activated carbon produced from steam activated bituminous coal: A study of equilibrium adsorption isotherm. *Chemical Engineering Journal*, 124(1),103-110.
3. Senthilkumaar, S., Varadarajan, P.R., Porkodi, K. & Subbhuraam, C.V. (2005). Adsorption of methylene blue onto jute fiber carbon: kinetics and equilibrium studies. *Journal of Colloid and Interface Science*, 284(1), 78-82.
4. Li, W., Mu, B. & Yang, Y. (2019). Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology. *Bioresource Technology*, 277, 157-170.
5. Maiti, D., Mukhopadhyay, S. & Devi, P.S. (2017). Evaluation of mechanism on selective, rapid, and superior adsorption of congo red by reusable mesoporous  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorods. *ACS Sustainable Chemical Engineering*, 5(12), 11255-67.
6. Sharma, V., Vinoth Kumar, R., Pakshirajan, K. & Pugazhenth, G. (2017). Integrated adsorption-membrane filtration process for antibiotic removal from aqueous solution. *Powder Technology*, 321, 259-269.
7. Bestani, B., Benderdouche, N., Benstaali, B., Belhakem, M. & Addou, A. (2008). Methylene blue and iodine adsorption onto an activated desert plant. *Bioresource Technology*, 99(17), 8441-4.
8. Ahmad, A.L., Loh, M.M. & Aziz, J.A. (2007). Preparation and characterization of activated carbon from oil palm wood and its evaluation on Methylene blue adsorption. *Dyes and Pigments*, 75(2), 263-272.
9. Arulkumar, M., Sathishkumar, P. & Palvannan, T. (2011). Optimization of Orange G dye adsorption by activated carbon of *Thespesia populnea* pods using response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 827-834.
10. Wang, J. & Wang, S. (2016). Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*, 182, 620-640.

11. Vargas, A.M.M., Cazetta, A.L., Kunita, M.H., Silva, T.L. & Almeida, V.C. (2011). Adsorption of methylene blue on activated carbon produced from flamboyant pods (*Delonix regia*): Study of adsorption isotherms and kinetic models. *Chemical Engineering Journal*, 168(2), 722-730.
12. Ayinla, R.T., Dennis, J.O., Zaid, H.M., Sanusi, Y.K., Usman, F. & Adebayo, L.L. (2019). A review of technical advances of recent palm bio-waste conversion to activated carbon for energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1427-1442.
13. Kleszyk, P., Ratajczak, P., Skowron, P., Jagiello, J., Abbas, Q. & Frąckowiak, E. (2015). Carbons with narrow pore size distribution prepared by simultaneous carbonization and self-activation of tobacco stems and their application to supercapacitors. *Carbon*, 81, 148-157.
14. Gao, Y., Yue, Q., Gao, B. & Li, A. (2020). Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review. *Science of The Total Environment*, 746, 141094.
15. Gil, R., Ruiz, B., Lozano, M. & Fuente, E. (2014). Influence of the pyrolysis step and the tanning process on KOH-activated carbons from biocollagenic wastes. Prospects as adsorbent for CO<sub>2</sub> capture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 194-204.
16. Nowicki, P., Kazmierczak, J. & Pietrzak, R. (2015). Comparison of physicochemical and sorption properties of activated carbons prepared by physical and chemical activation of cherry stones. *Powder technology*, 269, 312-319.
17. Mousazadeh, B., Mohammadi, N. & Khosravi-Nikou, M.R. (2024). Synthesis and characterization of porous activated carbons derived from lotus nut and their performance for CO<sub>2</sub> adsorption. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(6), 5379-5394.
18. Tounsadi, H., Khalidi, A., Abdennouri, M. & Barka, N. (2016). Activated carbon from *Diplotaxis Harra* biomass: Optimization of preparation conditions and heavy metal removal. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 59, 348-358.
19. Chiu, Y.H. & Lin, L.Y. (2019). Effect of activating agents for producing activated carbon using a facile one-step synthesis with waste coffee grounds for symmetric supercapacitors. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 101, 177-185.
20. Mojoudi, N., Soleimani, M., Mirghaffari, N., Belver, C. & Bedia, J. (2019). Removal of phenol and phosphate from aqueous solutions using activated carbons prepared from oily sludge through physical and chemical activation. *Water Science and Technology*, 80(3), 575-586.
21. Xi, Y., Yang, D., Qiu, X., Wang, H., Huang, J. & Li, Q. (2018). Renewable lignin-based carbon with a remarkable electrochemical performance from potassium compound activation. *Industrial Crops and Products*, 124, 747-754.
22. Hapiz, A., Jawad, A.H., Wilson, L.D. & AlOthman, Z.A. (2024). High surface area activated carbon from a pineapple (*Ananas comosus*) crown via microwave-ZnCl<sub>2</sub> activation for crystal violet and methylene blue dye removal: adsorption optimization and mechanism. *International Journal of Phytoremediation*, 26(3), 324-338.
23. Yaacoubi, F.E., Sekkouri, C., Ennaciri, K., Rabichi, I., Izghri, Z. & Baçaoui, A. (2024). Synthesis of composites from activated carbon based on olive stones and sodium alginate for the removal of methylene blue. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127706.
24. Hashem, H.M., El-Maghrabey, M. & El-Shaheny, R. (2024). Inclusive study of peanut shells derived activated carbon as an adsorbent for removal of lead and methylene blue from water. *Scientific Reports*, 14(1), 13515.
25. Dalmaz, A. & Sivrikaya Özak, S. (2024). Methylene blue dye efficient removal using activated carbon developed from waste cigarette butts: Adsorption, thermodynamic and kinetics. *Fuel*, 372, 132151.
26. Hameed, B.H., Din, A.T.M. & Ahmad, A.L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819-825.
27. Nandi, B.K., Goswami, A. & Purkait, M.K. (2009). Removal of cationic dyes from aqueous solutions by kaolin: Kinetic and equilibrium studies. *Applied Clay Science*, 42(3), 583-590.
28. Xia, F., Ou, E., Wang, L. & Wang, J. (2008). Photocatalytic degradation of dyes over cobalt doped mesoporous SBA-15 under sunlight. *Dyes and Pigments*, 76(1), 76-81.
29. Amin, N.K. (2009). Removal of direct blue-106 dye from aqueous solution using new activated carbons developed from pomegranate peel: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1), 52-62.
30. Ho, Y.S., Chiang, T.H. & Hsueh, Y.M. (2005). Removal of basic dye from aqueous solution using tree fern as a biosorbent. *Process Biochemistry*, 40(1), 119-124.
31. Kayranli, B. (2011). Adsorption of textile dyes onto iron based waterworks sludge from aqueous solution; isotherm, kinetic and thermodynamic study. *Chemical Engineering Journal*, 173(3), 782-791.

32. Freundlich, H. (1907). Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57U(1), 385-470.
33. Abbas, M. & Trari, M. (2020). Removal of methylene blue in aqueous solution by economic adsorbent derived from apricot stone activated carbon. *Fibers Polymers*, 21(4), 810-820.
34. Pua, F., Sajab, M.S., Chia, C.H., Zakaria, S., Rahman, I.A. & Salit, M.S. (2013). Alkaline-treated cocoa pod husk as adsorbent for removing methylene blue from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3), 460-465.
35. Agarwal, S. & Rani, A. (2017). Adsorption of resorcinol from aqueous solution onto CTAB/NaOH/flyash composites: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 526-538.
36. Darwish, A.A.A., Rashad, M. & AL-Aoh, H.A. (2019). Methyl orange adsorption comparison on nanoparticles: Isotherm, kinetics, and thermodynamic studies. *Dyes and Pigments*, 160, 563-571.
37. Khan, S.U., Islam, D.T., Farooqi, I.H., Ayub, S. & Basheer, F. (2019). Hexavalent chromium removal in an electrocoagulation column reactor: Process optimization using CCD, adsorption kinetics and pH modulated sludge formation. *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 118-130.
38. Stähelin, P.M., Valério, A., Guelli Ulson de Souza, S.M. de A, da Silva, A., Borges Valle, J.A. & Ulson de Souza, A.A. (2018). Benzene and toluene removal from synthetic automotive gasoline by mono and bicomponent adsorption process. *Fuel*, 231, 45-52.
39. Gunasundari, E. (2017). Adsorption isotherm, kinetics and thermodynamic analysis of Cu(II) ions onto the dried algal biomass (*Spirulina platensis*). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 56, 129-144.
40. Xia, Y., Yang, T., Zhu, N., Li, D., Chen, Z. & Lang, Q.(2019). Enhanced adsorption of Pb(II) onto modified hydrochar: Modeling and mechanism analysis. *Bioresource Technology*, 288, 121593.
41. Sanou, I., Bamogo, H., Sanou, A., Ouedraogo, M., Saadi, L. & Waqif, M. (2024). Adsorption of methylene blue in aqueous medium by activated carbon from peanut shells. *Chemistry Africa*, 7(5), 2777-2794.
42. Weber, W.J. & Morris, J.C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31-59.
43. Vimonses, V., Lei, S., Jin, B., Chow, C.W.K. & Saint, C. (2009). Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials. *Chemical Engineering Journal*, 148(2), 354-364.
44. Wu, C.H. (2007). Adsorption of reactive dye onto carbon nanotubes: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1), 93-100.
45. Chen, X., Hossain, M.F., Duan, C., Lu, J., Tsang, Y.F. & Islam, M.S. (2022). Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review. *Chemosphere*, 307, 135545.
46. Dimbo, D., Abewaa, M., Adino, E., Mengistu, A., Takele, T. & Oro, A. (2024). Methylene blue adsorption from aqueous solution using activated carbon of *spathodea campanulata*. *Results in Engineering*, 21, 101910.

