


Statistical evaluation of CO₂ adsorption by biomass-based carbon foam depending on synthesis parameters and modeling of equilibrium isotherms

Adife Şeyda Yargıç 

ARTICLE INFO

Dates:

Received: 01.03.2026

Accepted: 10.06.2026

Doi:

10.65206/pajes.1900518

Corresponding author:

Adife Şeyda Yargıç
(seyda.guler@bilecik.edu.tr)

Author addresses:

Department of Chemical
Engineering, Faculty of
Engineering, Bilecik Şeyh Edebali
University, Bilecik, 11100,
Türkiye
(seyda.guler@bilecik.edu.tr)

ABSTRACT

Context—With increasing awareness of the environmental problems caused by the rise in greenhouse gas and especially CO₂ emissions, the need to develop efficient, sustainable systems based on the use of alternative fuels to fossil fuels, along with the application of CO₂ capture and storage technologies, has come to the forefront. Carbon foams are among the advanced technology materials used as a significant alternative to traditional materials in many applications due to their lightweight and unique properties. The utilization of biomass-based carbon foams in CO₂ adsorption is an important research area, as it enables the use of low-cost and abundant resources, and also it contributes to the improvement of CO₂ capture processes.

Objective—In this study, it is aimed to evaluate the CO₂ adsorption behavior of biomass-based carbon foams, which offer a more environmentally friendly route compared to conventional fossil fuel-derived carbon foams, using isotherm and statistical analyses.

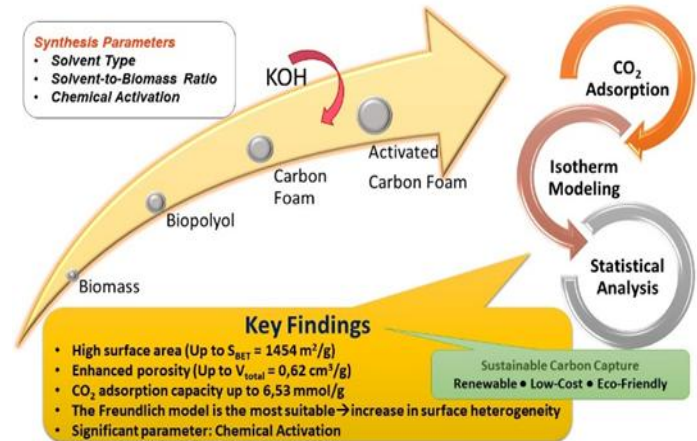
Method—In this study, carbon foams were produced using biopolyol obtained from solvolytic liquefaction of hornbeam sawdust; the effects of synthesis parameters, including solvent type, solvent-to-biomass ratio, and chemical activation, on the CO₂ adsorption capacity were investigated through statistical analysis based on a 2³ full factorial experimental design. Furthermore, isotherm

analysis based on Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, and Temkin models was performed to clarify the equilibrium adsorption behavior and the adsorption mechanism, thereby establishing the relationship between synthesis conditions and adsorption performance. The effects of surface heterogeneity of the carbon foam used as an adsorbent on adsorbent-adsorbate affinity of adsorption sites with different energy levels were also investigated.


Results—Isotherm modeling results indicated that the Freundlich model provided the best fit to the experimental data, especially in chemically activated carbon foams, with higher correlation coefficients ($R^2 > 0.99$). The regression model generated from the statistical analysis revealed that chemical activation was the most significant factor increasing CO₂ adsorption capacity, while solvent type and solvent-to-biomass ratio had moderate direct effects. The two-way interaction terms showed synergistic differences among the carbon foam production parameters, with combinations related to solvent type providing a positive effect, while a high solvent-to-biomass ratio potentially reduced activation efficiency. These findings are consistent with structural characterization, highlighting the interaction between pore development and adsorption performance.

Conclusion—This study presents a unique approach to the potential application of carbon foams by explaining the effect of carbon foam synthesis parameters on CO₂ adsorption capacity in terms of both adsorption mechanism and statistical significance levels. Based on the correlation between characterization and statistical analyses, it was concluded that the use of a 90% confidence level in factorial design with a limited number of experiments is appropriate for preliminary screening of potential effects and that chemical activation should be prioritized in optimization studies.

Key Words—Carbon foam, CO₂ adsorption, Isotherm modeling, Statistical analysis, Solvolytic liquefaction.



Biyokütle-esaslı karbon köpük ile CO₂ adsorpsiyonunun sentez parametrelerine bağlı istatistiksel değerlendirilmesi ve denge izotermelerinin modellenmesi

Adife Şeyda Yargıç 

MAKALE BİLGİLERİ

Tarihler:

Geliş: 01.03.2026
Kabul: 10.06.2026

Doi:

10.65206/pajes.1900518

Sorumlu yazar:

Adife Şeyda Yargıç
(seyda.guler@bilecik.edu.tr)

Yazar adresleri:

Kimya Mühendisliği Bölümü,
Mühendislik Fakültesi, Bilecik
Şeyh Edebalı Üniversitesi,
Bilecik, 11100, Türkiye
(seyda.guler@bilecik.edu.tr)

ÖZ

Arka Plan—Sera gazı ve özellikle CO₂ emisyonlarındaki artışın yarattığı çevresel sorunlara ilişkin farkındalığın artması sonucunda, CO₂ yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanmasıyla birlikte fosil yakıtlara alternatif yakıtların kullanımına dayanan ve sürdürülebilirliği esas alan verimli sistemlerin geliştirilmesi ihtiyacı ön plana çıkmıştır. Karbon köpükler, hafiflikleri ve eşiz özellikleri nedeniyle birçok uygulamada geleneksel malzemelere karşı bir alternatif olarak kullanılan ileri teknoloji malzemeler arasında yer almaktadır. Biyokütle-esaslı karbon köpüklerin CO₂ adsorpsiyonunda değerlendirilmesi hem ucuz ve bol bulunan kaynakların kullanımını sağlaması hem de CO₂ yakalanma süreçlerinin geliştirilmesine katkı sunması açısından üzerinde çalışılması gereken önemli bir araştırma alanıdır.

Amaç—Bu çalışmada, geleneksel fosil yakıt türevi karbon köpüklere kıyasla daha çevre dostu bir yol sunan biyokütle-esaslı karbon köpüklerin CO₂ adsorpsiyon davranışının izoterm ve istatistiksel analiz ile değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

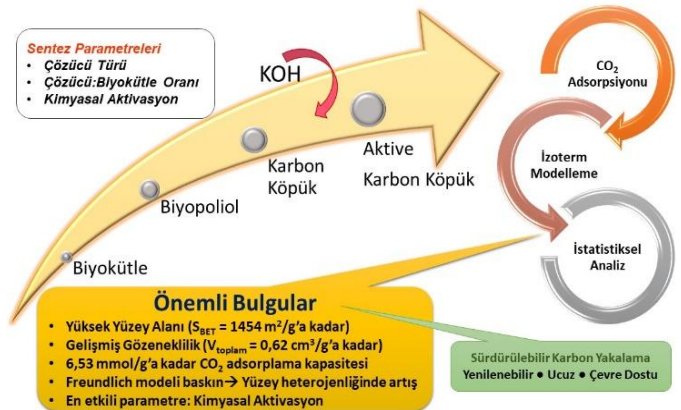
Yöntem—Bu çalışmada, gürgen talaşının solvolitik sıvılaştırılmasıyla üretilen biyopoliol kullanılarak karbon köpükler üretilmiş; çözücü türü, çözücü/biyokütle oranı ve kimyasal aktivasyon olmak üzere sentez parametrelerinin CO₂ adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkileri 2³ tam faktöriyel deney tasarımına dayalı istatistiksel analiz ile incelenmiştir. Ayrıca, denge adsorpsiyon davranışının ve adsorpsiyon mekanizmasının

aydınlatılması için Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich ve Temkin modellerine göre izoterm analizinin yapılması ile sentez koşulları ve adsorpsiyon performansı arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Adsorban olarak kullanılan karbon köpüğün yüzey heterojenliğinin, farklı enerji seviyelerine sahip adsorpsiyon bölgelerinin adsorban-adsorbat afinitesi üzerindeki etkileri aydınlatılmıştır.

Bulgular—İzoterm modelleme sonuçları, özellikle kimyasal aktivasyon uygulanmış karbon köpüklerde Freundlich modelinin daha yüksek uyum katsayıları ($R^2 > 0,99$) sergileyerek deneysel verileri en iyi şekilde yansıttığını göstermiştir. İstatistiksel analiz sonucu oluşturulan regresyon modeli, kimyasal aktivasyonun CO₂ adsorpsiyon kapasitesini artıran en baskın faktör olduğunu, çözücü türü ve çözücü/biyokütle oranının ise orta derecede doğrudan etkileri olduğunu ortaya koymuştur. İkili etkileşim terimleri, karbon köpük üretim parametreleri arasında sinerjik farklar olduğunu, çözücü türü ile ilgili kombinasyonların pozitif etki sağladığını, buna karşın yüksek çözücü/biyokütle oranının aktivasyon verimliliğini potansiyel olarak azalttığını göstermiştir. Bu bulgular, gözenek gelişimi ve adsorpsiyon performansı arasındaki etkileşimi vurgulayan yapısal karakterizasyonla uyumluluk sergilemektedir.

Sonuç—Bu çalışma, karbon köpük sentez parametrelerinin CO₂ adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkisini adsorpsiyon mekanizması ve istatistiksel anlamlılık düzeyinde açıklayarak karbon köpüklerin uygulama odaklı kullanım potansiyellerine yönelik özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Karakterizasyon ve istatistiksel analizlerin ilişkilendirilmesine göre, sınırlı deney sayısına sahip faktöriyel tasarımda %90 güven seviyesi kullanılarak potansiyel etkilerin ön eleme amacıyla değerlendirilmesinin uygun olduğu ve kimyasal aktivasyonun optimizasyon çalışmalarında öncelikli ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler—Karbon köpük, CO₂ adsorpsiyonu, İzoterm modellenmesi, İstatistiksel analiz, Solvolitik sıvılaştırma.



I. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Biyokütle, içerdiği karbon yapısının uygun işlemlerle yüksek performanslı teknolojik karbona dönüştürülebilmesi sayesinde sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif karbon kaynağı olarak öne çıkmaktadır [1]. Biyokütle kaynaklı karbon köpükler ayarlanabilir özelliklere sahip olmaları, mükemmel fizikokimyasal kararlılıkları, yüksek yüzey alanları, hafif yapıları, çok fonksiyonlu özellikleri, düşük maliyetleri ve çevresel sürdürülebilirlikleri nedeniyle önemli bir araştırma alanını oluşturmaktadır [2]. Bahsedilen özellikler karbon köpükleri katalizör destekleri, erimiş metaller ve aşındırıcı kimyasallar için filtreler, gözenekli elektrotlar, darbe, enerji ve ses emicileri olarak kullanım için etkili yapmaktadır [3]. Üç boyutlu birbirine bağlı ağ yapılı gözenekli bir karbon malzeme türü olan karbon köpüklerin üretiminde petrokimya-esaslı öncü maddelere alternatif olarak değerlendirilen yenilenebilir kaynakların kullanılması çevresel açıdan üstünlük sağlamaktadır [4].

Başta sanayileşmenin artması ve fosil kaynakların yakılması olmak üzere çeşitli insan faaliyetleri, sera gazlarının özellikle de karbondioksitin (CO_2) yüksek üretimi nedeniyle küresel bir alarm durumuna yol açmıştır. Karbondioksit, en çok üretilen ve atmosferde büyük oranda bulunduğu için ozon tabakasını en çok etkileyen sera gazı türü olup, küresel sıcaklık artışına ve iklim değişikliğiyle ilgili diğer tüm sorunlara neden olmaktadır [5]. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında hazırlanan ve imzalanan Paris Anlaşması'nın (2016) kapsamı azaltım hedeflerine uyum sağlanabilmesi için CO_2 yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi önemli bir gereklilik olarak öne çıkmıştır [6]. Dolayısıyla, sera gazlarının yakalanması, depolanması ve kullanımının karbon ayak izini azaltmada ve küresel ısınmayla mücadelede oynadığı önemli rol emisyon azaltımına yönelik sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Mevcut CO_2 yakalama teknolojileri esas olarak adsorpsiyon ve adsorpsiyon süreçlerini içermektedir. Adsorpsiyon, adsorban ve adsorbat arasındaki etkileşimin gücüne bağlı olarak fizisorpsiyon (Van der Waals etkileşimleri) ve kemisorpsiyon (kimyasal bağ oluşumu) olarak tanımlanabilmektedir [7]. Son yıllarda, düşük rejenerasyon enerjisi, yapısal çok yönlülük ve indirgenmiş korozyon potansiyeli gibi avantajlı özellikleri nedeniyle katı adsorbanlar alternatif CO_2 yakalama malzemeleri olarak kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Aktif karbonlar, zeolitler, metal-organik çerçeveler ve gözenekli organik polimerler, biyokütle atığı-esaslı malzemeler, alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) dahil olmak üzere katı malzemeler yüksek yüzey alanları ve verimli CO_2 adsorpsiyonunu kolaylaştıran ayarlanabilir gözenek yapıları nedeniyle umut vericidir [8].

Deneysel tasarım, farklı değişkenleri eş zamanlı olarak iyileştirme, geliştirme ve optimize etme amacıyla bir dizi deneysel test planlamak için kullanışlı olan matematiksel ve istatistiksel teknikler bütünüdür [9]. Tam faktöriyel deneysel tasarım da süreci etkileyen çok sayıda değişken arasından önemli unsurları ayıklamak için kullanılan yararlı bir araçtır [10]. Tam faktöriyel tasarım, deneysel olarak ilgili alan içindeki tüm ana etkilerin ve daha yüksek dereceli etkileşimlerin eş zamanlı, tarafsız tahminini sağlamaktadır [11].

Bu çalışmanın özgün yönü, fenole alternatif çözücü olarak piroliz sıvı ürünü (tar) kullanılması sonucu üretilen biyopoliol-esaslı karbon köpüklerin CO_2 adsorpsiyon izotermelerinin incelenmesine odaklanması ve geleneksel tek faktörlü yaklaşımlar yerine 2^3 deneysel tasarım uygulanarak istatistiksel analiz ile adsorplama kapasitesi üzerinde etkili koşulların belirlenmesidir. Çalışma kapsamında, geleneksel toz halindeki adsorbanlar yerine yapılandırılmış karbon köpükler kullanılarak oluşturulan denge sorpsiyon verileri Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich ve Temkin modellerine uydurularak CO_2 adsorpsiyon izotermeleri analiz edilmiş ve karbon köpüklerin adsorpsiyon mekanizması aydınlatılmıştır. Dolayısıyla, yüzey

heterojenliği ve adsorpsiyon bölgesi dağılımının köpük tipi karbon malzemelerde CO_2 tutulumu üzerindeki etkilerinin belirlenmesine ilişkin adsorpsiyon mekanizmaları yorumlanarak literatüre katkı sağlanmıştır. Varyans analizi ile birleştirilmiş tam faktöriyel deneysel tasarım, karbon köpüklerin adsorban olarak değerlendirilmesinde sentez koşulu-yapı-performans ilişkisinin incelenmesini sağlamak için uygulanan bir tekniktir. Dolayısıyla, istatistiksel analizde uygulanan yaklaşımın, karakteristik özellikleri ayarlanarak yapılandırılmış karbon köpüklerde parametre duyarlılığını değerlendirmek için geleneksel deneme-yenilme yöntemlerinin ötesinde gelecekteki optimizasyon çalışmaları için bir temel oluşturacağı öngörülmektedir.

II. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

Bu bölümde, karbon köpüklerin hazırlanma süreci, CO_2 adsorpsiyonu denge verilerinin modelleneneceği izotermeler ve uygulanan istatistiksel analiz açıklanmıştır.

A. Karbon köpük üretim süreci (Carbon foam production process)

Bu çalışma kapsamında, biyokütle-esaslı karbon köpük üretimi için öncü madde olarak kereste işleme tesisinden elde edilen gürgen talaşı kullanılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen köpük üretimi üç temel işlemi kapsamaktadır: biyokütle pirolizi ile tar üretimi, biyokütlenin sıvılaştırılması ile reçine köpük üretimi, karbonizasyon veya aktivasyon ile karbon veya aktive karbon köpük üretimi. Öncelikle hammadde kurutulup öğütüldükten sonra parçacık boyutu belirlenmiş; elementel, kısa ve bileşen analizlerinin ardından termal davranışı, yüzey morfolojisi ve fonksiyonel grupları incelenerek karakterize edilmiştir. Karbon köpük üretiminde fenole alternatif çözücü olarak kullanılacak piroliz tarının eldesi için gürgen talaşının $400\text{ }^\circ\text{C}$ 'de yavaş pirolizi gerçekleştirilmiştir. Biyokütle pirolizinden elde edilen tarın kompleks kimyasal yapısında fenol, krezoller, gayakol ve diğer lignin türevi fenolik bileşiklerin yanı sıra aromatik hidrokarbonlar ve çeşitli oksijenli organik bileşenler bulunmaktadır. Tar fenolik içeriği sayesinde, solvolitik sıvılaştırma reaksiyonlarında lignoselülozik yapılarla etkileşime girebilen reaktif bir ortam sağlayarak, saf fenole alternatif bir çözücü olarak değerlendirilebilmektedir. İlk aşamada, karbon köpük öncüsü olarak kullanılan biyopoliolün, biyokütlenin asidik koşullar altında (H_2SO_4 (98 %ağ., Merck) ve H_3PO_4 (85 %ağ., Panreac)) solvolitik sıvılaştırılmasıyla üretilmesi sürecinde iki farklı çözücü/biyokütle oranı için fenol (Merck) veya fenol+tar karışımının çözücü olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. İkinci aşamada, biyopoliol kontrollü sıcaklık ve pH koşulları altında formaldehit (37 %ağ., Merck) ile reaksiyona girerek fenolik reçine üretilmiştir. Son aşamada ise köpükleştirici, küreme ajanı ve yüzey aktif madde eklenerek hazırlanan karışımın etüvde kürlenmesi sonucu reçine köpükler oluşturulmuştur. Reçine köpükler, $800\text{ }^\circ\text{C}$ 'de azot atmosferi altında karbonize edilerek biyopoliol-esaslı karbon köpükler elde edilmiştir. Yüzey alanı yüksek ve gözenekliliği artmış karbon köpüklerin hazırlanması için ikinci deney setinde reçine köpükler potasyum hidroksit (Merck) kullanılarak kimyasal olarak aktive edilmiş, karbonizasyon sonrasında aktivasyon ajanının uzaklaştırılması için yıkama ve kurutma işlemleri uygulanmıştır. Karbon köpüklerin kodlanmasında fenol ve fenol+tar olmak üzere çözücü türüne göre sırasıyla HCF ve HCFT etiketi seçilmiş, aktive karbon köpüklerde HCFA ve HCFTA ifadesindeki -A eki getirilmiş, çözücü/biyokütle oranının 3/1 veya 5/1 olmasına göre HCFA-x ve HCFTA-x ifadesindeki -x sırasıyla -3 veya -5 olarak belirtilmiştir. Karbon köpüklerin gaz fazı kirlenici sistemlerde kullanımına ilişkin CO_2 adsorplama deneyleri Micromeritics ASAP2020 cihazında $0\text{ }^\circ\text{C}$ 'de düşük bağıl basınç aralığında ($P/P_0 = 3 \times 10^{-5} - 0.035$) gerçekleştirilmiştir. Analiz öncesi köpükler, adsorplanmış nem ve gazların uzaklaştırılması için $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 6 saat süreyle vakum altında degaz edilmiştir. Bağıl basınç (P/P_0) değerine karşı adsorplanan hacim (V_{ads} , mmol/g)

verileri kullanılarak çizilen adsorpsiyon izotermine göre karbon köpüklerin adsorplama kapasitesi değerleri belirlenmiştir. Adsorbanların karşılaştırmalı karakterizasyon sonuçları önceki çalışmada detaylı olarak açıklanmıştır [12]. Bu çalışmada sadece termogravimetrik analiz (TGA, Setaram Labsys Evo), FT-IR analizi (Agilent Cary 630), elementel analiz (Leco CHN628, S628), azot adsorpsiyon/desorpsiyon izotermi (Micromeritics ASAP 2020), XRD analizi (PANalytical Empyrean) ve Raman spektroskopisi (RENISHAW Raman inVia microscope) sonuçları, CO₂ adsorplama kapasiteleri ile ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir.

B. CO₂ adsorpsiyonu izoterm modellemesi (CO₂ adsorption isotherm modeling)

Adsorpsiyon izoterm modelleri, sabit bir sıcaklıkta adsorban yüzeyinde tutulan adsorbat miktarı ile denge basıncı arasındaki denge ilişkisini tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. CO₂ adsorpsiyon izoterm modellerinin incelenmesi, adsorban-adsorbat etkileşimlerinin doğasını, yüzeyin homojenlik/heterojenlik derecesini ve adsorpsiyonun tek katlı ya da çok katlı bir mekanizma ile gerçekleşip gerçekleşmediğini açıklamak için oldukça önemlidir [13]. Bu çalışmada, karbon köpüklerin yüzey özelliklerini, adsorpsiyon mekanizmasını ve adsorpsiyon bölgelerinin enerji dağılımını aydınlatmak için, CO₂ adsorpsiyon denge verileri Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich ve Temkin olmak üzere dört farklı izoterm modeli kullanılarak analiz edilmiştir. İzotermelere özgü parametreler ve R² uyum katsayıları hesaplanmış, adsorplanan CO₂ miktarına (mmol/g) karşı CO₂ basıncı (kPa) grafikleri çizilerek deneysel veriler ile izotermelerin uyumu karşılaştırılmıştır.

Langmuir izoterm modeli, adsorpsiyonun enerjisel olarak özdeş adsorpsiyon bölgelerine sahip homojen yüzey üzerinde tek-katmanlı olarak gerçekleştiğini varsaymaktadır [14]. Bu tanıma göre, adsorban yüzeyindeki her aktif bölgenin yalnızca bir adsorbat molekülünü bağlayabildiği ve adsorbe edilen adsorbat molekülleri arasındaki etkileşimin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmektedir. Bu yaklaşımla Langmuir izotermi, adsorpsiyonun sonlu bölge içeriği nedeniyle doygunluk sınırına ulaştığı durumları başarılı biçimde tanımlamakta, maksimum adsorpsiyon kapasitesi (q_m) ve adsorbat-adsorban afinitesi (Langmuir izoterm sabiti, k_L) hakkında bilgi sağlamaktadır. Denge durumundaki adsorplanan madde miktarının q_e terimi ile tanımlandığı Langmuir izotermi (1)'de verilmiş olup, izoterm P_e/q_e 'ye karşı P_e grafiğinin çizilmesi ile elde edilmiştir:

$$P_e/q_e = [1/(k_L q_m)] + P_e/q_m, \quad (1)$$

burada, P_e adsorbatın denge basıncını (kPa), q_e adsorpsiyon kapasitesini (mmol/g), q_m maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mmol/g) ve k_L Langmuir izoterm sabitini (1/kPa) temsil etmektedir. Adsorbat-adsorban afinitesi hakkında bilgi veren k_L teriminin yüksek olması, CO₂-karbon köpük etkileşiminin daha güçlü olduğunu göstermektedir.

Freundlich izotermi, yalnızca tek-katmanlı kaplamayla sınırlı olmayan heterojen yüzeylerdeki çok-katmanlı adsorpsiyonun tanımlanması, aktif bölgelerin ve enerjilerinin üstel dağılımını ifade edilmesi için geliştirilmiş ampirik bir modeldir [15]. Freundlich izoterm modeli, özellikle geniş adsorpsiyon bölgesine sahip gözenekli malzemeler için uygun olup, model parametreleri yüzey heterojenliği ve adsorpsiyonun doğası hakkında bilgi vermektedir. Freundlich izotermi $\log q_e$ 'ye karşı $\log P_e$ grafiğinin çizilmesi ile elde edilmiş ve (2)'de sunulmuştur:

$$\log(q_e) = \log(k_F) + (1/n)\log(P_e), \quad (2)$$

burada, k_F Freundlich izoterm sabitini (mmol/(g.kPa^{1/n})) ve n boyutsuz heterojenlik faktörünü ifade etmektedir. Freundlich katsayısı (n) adsorpsiyonun kemisorpsiyon ($n < 1$) veya çok-katmanlı fizisorpsiyon ($n > 1$) olup olmadığını belirtirken; ($1/n$) değerinin 0-1 aralığında olması adsorpsiyonun uygun olduğunu

ve bu değer in sıfıra yaklaşması yüzey heterojenliğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Dubinin-Radushkevich modeli, yüzey kaplanması yerine Polanyi potansiyel gözenek dolmuş teorisine dayanan ve Gauss enerji dağılımına hesapla katan bir yaklaşımdır [16]. Bu izoterm, genellikle heterojen yüzeylere sahip mikro gözenekli malzemelerde fiziksel adsorpsiyonu tanımlamak için kullanılmaktadır [17]. Dubinin-Radushkevich izoterm modelinde, hesaplanan adsorpsiyon enerjisi doğrultusunda fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon mekanizmaları arasında ayırım yapılmaktadır. Eşitlik (3)'te tanımlanan Dubinin-Radushkevich izoterm modelinde $\ln(q_e)$ 'e karşı ε^2 grafiği çizilmiş, (4) ve (5) kullanılarak Polanyi potansiyeli (ε , kJ/mmol) ve ortalama adsorpsiyon serbest enerjisi (E , kJ/mmol) değerleri hesaplanmıştır. Ortalama serbest enerji değerine göre adsorpsiyonun kontrol edildiği mekanizmanın türü fiziksel, iyon-değişim ya da kimyasal adsorpsiyon olmak üzere belirlenmiştir:

$$\ln(q_e) = \ln(q_m) - k_{DR}\varepsilon^2, \quad (3)$$

$$\varepsilon = RT\ln(1 + 1/P_e), \quad (4)$$

$$E = 1/\sqrt{2k_{DR}}, \quad (5)$$

burada, k_{DR} Dubinin-Radushkevich izoterm sabiti (mmol²/kJ²), R gaz sabiti (kJ/mmol.K) ve T mutlak sıcaklıktır (K).

Temkin izoterm modeli, adsorban-adsorbat etkileşimlerini dikkate alarak adsorpsiyon ısısının (b_T) artan yüzey kaplamasıyla doğrusal olarak azaldığını varsaymaktadır [18]. Bu modele ait izoterm denklemi (6)'da verilmiş, q_e 'e karşı $\ln(P_e)$ grafiği çizilerek izoterm parametreleri hesaplanmış ve (7) kullanılarak adsorpsiyon ısısıyla ilgili Temkin sabiti (b_t , J/mol) belirlenmiştir:

$$q_e = B\ln(k_T) + B\ln(P_e), \quad (6)$$

$$B = RT/b_t, \quad (7)$$

burada, k_T Temkin izoterm sabiti (mmol/g.kPa), B sıcaklığa bağlı adsorpsiyon ısısı (J/mol), R gaz sabiti (J/mol.K), b_t adsorpsiyon ısısıyla ilgili Temkin sabitidir (J/mol).

C. Tam faktöriyel deneysel tasarım ile CO₂ adsorplama kapasitesinin istatistiksel analizi (Statistical analysis of CO₂ adsorption capacity via a full factorial experimental design)

Bu çalışmada, seçilen sentez ve işleme parametrelerinin gürge talaşından elde edilen karbon köpüklerin adsorpsiyon performansı üzerindeki etkisini incelemek için varyans analizi (ANOVA) ile desteklenen 2³ tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanmıştır. Deneysel sayısının sınırlı olması nedeniyle, uygulanan istatistiksel analiz kesin optimizasyon sınırları belirlemek yerine genel eğilimleri ve potansiyel faktör etkilerini incelemek için kullanılmıştır. Toz halindeki adsorbanların aksine, karbon köpük hiyerarşik ve birbiri ile bağlantılı bir ağ yapısına sahip olduğu için adsorpsiyon performansı yalnızca ana etkiler tarafından değil, faktörlerin sinerjik etkileşim etkileşimleri tarafından da yönetilmektedir. Dolayısıyla, bu etkileşimlerin incelenmesi ile karbon köpük yapısı üzerinde etkili olan parametrelerin CO₂ adsorpsiyonundaki performans ile ilişkilendirilmesi sağlanmıştır. İstatistiksel analizde kullanılan faktörlerin seviyeleri Tablo 1'de sunulmuştur.

III. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Bu bölümde sırasıyla CO₂ adsorpsiyon performansının karbon köpük özellikleri ile ilişkilendirilmesi, izoterm modellenmesi ve istatistiksel parametrelerin değerlendirilmesine ilişkin sonuçlar yorumlanmıştır.

Tablo 1. CO₂ adsorpsiyonuna ilişkin 2³ tam faktöriyel tasarımda yer alan ana faktör seviyeleri.

Table 1. Main factor levels included in a 2³ full factorial design for CO₂ adsorption.

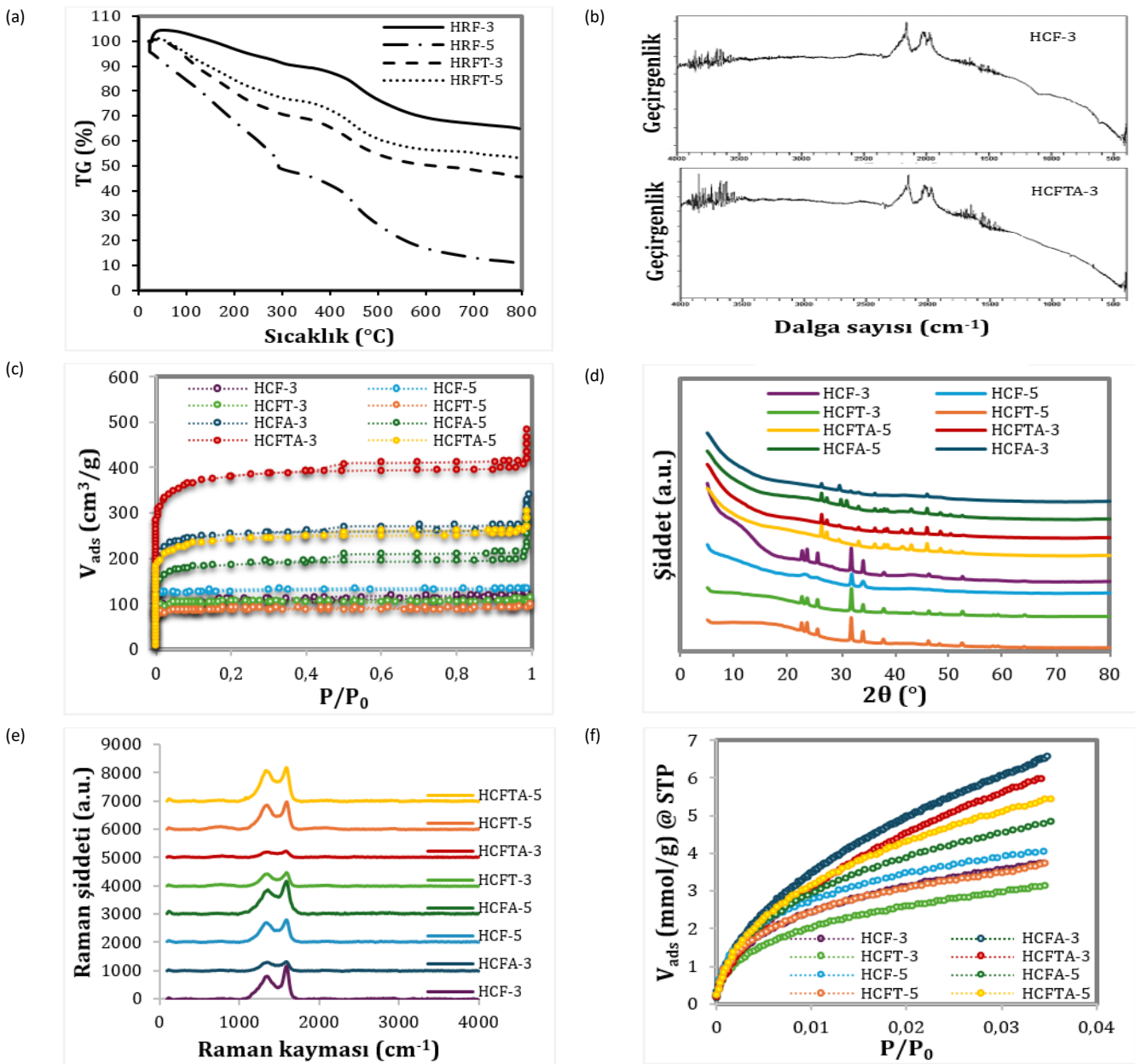
Faktör Seviyeleri	Düşük Seviye	Yüksek Seviye
Çözücü Türü (A)	Fenol	Fenol+Tar
Çözücü/Biyokütle oranı (B)	3	5
Kimyasal Aktivasyon (C)	Yok	Var

A. Karbon köpüklerin karakteristik özellikleri ile CO₂ adsorpsiyon performansının ilişkisi (The relationship between the characteristic properties of carbon foams and their CO₂ adsorption performance)

Çözücü türü, çözücü/biyokütle oranı ve kimyasal aktivasyonun gürgen ağacı talaşından üretilen karbon köpüklerin fizikokimyasal, yapısal ve dokusal özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kapsamlı karakterizasyon teknikleri uygulanmıştır. Karbon köpüklerin gaz fazı sistemlerde adsorban

olarak kullanılma potansiyellerinin belirlenmesi için kontrollü basınç koşulları altında düşük sıcaklıkta (0 °C) CO₂ adsorpsiyon kapasiteleri ölçülmüştür. Bu alandaki performans değerlendirmesi için, bahsedilen üç faktörün adsorplama kapasitesi üzerindeki etkisi karşılaştırılmış hem sentez parametrelerinin hem de kimyasal aktivasyonun CO₂ tutma davranışında belirleyici bir rol oynadığı bulunmuştur.

Karbon köpüklerin karakteristik özellikleri özetlenecek olursa (Şekil 1), termogravimetrik analiz reçine köpüklerin iki aşamada bozduğunu, ısı işlem sonrası kalan karbon veriminin sentez koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini (~%16-69) ve daha yüksek fenol içeriğinin termal kararlılığı düşürdüğünü göstermiştir. FT-IR spektrumları tüm karbon köpüklerin çözücü bileşiminden veya aktivasyondan bağımsız olarak benzer yüzey fonksiyonel gruplarına sahip olduğunu doğrulamıştır. Elemental analiz, köpüklerin karbon içeriğinin ham biyokütleden (~%46) önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ortaya koymuş, aktivasyon uygulanmamış köpüklere (%77-81 C) göre kimyasal olarak aktive edilmiş köpüklerdeki artan oksijen içeriği nedeniyle daha



Şekil 1. Köpüklere ait karakterizasyon sonuçları: a) reçine köpüklerin TG eğrileri, b) farklı çözücüler için örnek FT-IR spektrumları, c) adsorpsiyon/desorpsiyon izotermeleri, d) XRD desenleri, e) Raman spektrumları ve f) CO₂ adsorpsiyon izotermeleri,

Figure 1. Characterization results of the foams: (a) TG curves of the resin foams, (b) representative FT-IR spectra for different solvents, (c) adsorption/desorption isotherms, (d) XRD patterns, (e) Raman spectra, and (f) CO₂ adsorption isotherms.

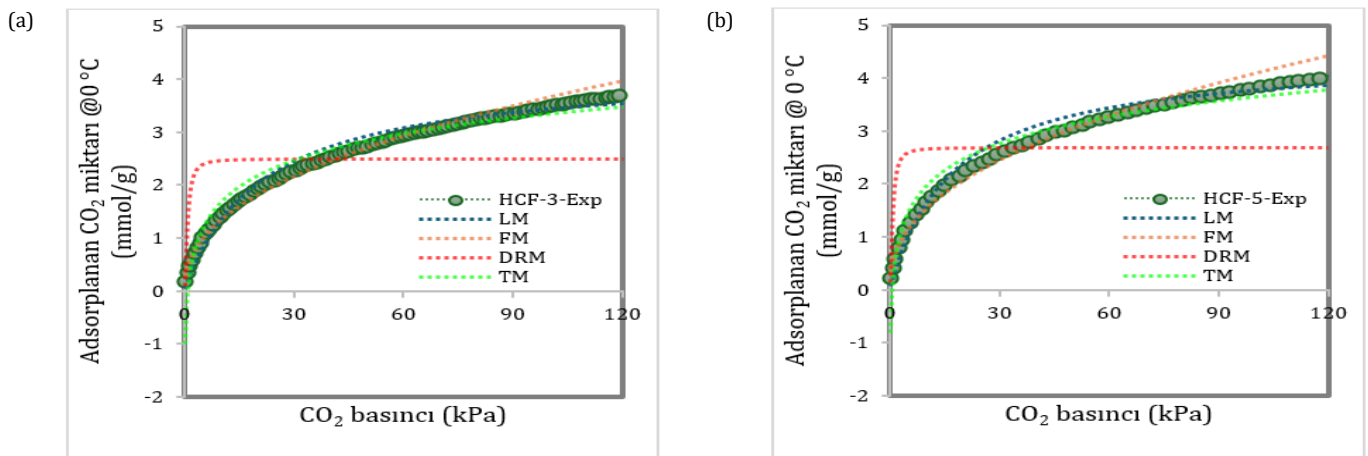
düşük karbon içeriği (~%60-61 C) elde edilmiştir. KOH ile aktive edilmiş karbon köpüklerin benzer koşullarda sentezlenmiş ve aktive edilmemiş köpüklere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek CO₂ adsorplama kapasiteleri sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, kimyasal aktivasyonun gaz adsorpsiyon performansını artırmadaki kritik rolünü doğrulamıştır. Maksimum 6.53 mmol/g'lık kapasite, çözücü/biyokütle kütle oranı 3/1 olan ve kimyasal aktivasyon uygulanan HCFA-3 adsorbantı tarafından elde edilmiştir. Aktive edilmiş köpüklerin üstün CO₂ adsorpsiyon performansı, dokusal özellikleri ile doğrudan ilişkilendirilebilmektedir. Azot adsorpsiyon/desorpsiyon izotermelerinin, yarı benzeri gözenekler içeren mikro- ve mezo-gözenekli yapıların bir arada bulunduğunu ifade eden H4 histerezis döngülerine sahip tip IV izoterm sergilediği görülmüştür. Bu tür gözeneklerin CO₂'in tutulmasını ve adsorpsiyon verimliliğini daha da artırdığı bilinmektedir. Aktivasyon uygulanmamış karbon köpüklerin BET yüzey alanları 243-472 m²/g aralığında değişirken, aktivasyon ile yüzey alanlarının önemli ölçüde artarak 1454 m²/g'a kadar yükseldiği ve toplam gözenek hacminin 0.62 cm³/g'a kadar çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca, uygulanan kimyasal aktivasyon, düşük sıcaklık ve basınçlarda CO₂ adsorpsiyonunu yöneten basınç faktörü olarak yaygın bir şekilde kabul edilen mikro gözenek hacminde önemli bir artışa yol açmıştır. Gözenek boyutu dağılım grafikleri, aktif karbon köpüklerin dar mikro- ve küçük mezo-gözeneklerden oluşan hiyerarşik bir gözenek yapısına sahip olduğunu, bunun da hem güçlü CO₂-yüzey etkileşimlerini hem de verimli difüzyon yollarını kolaylaştırdığını göstermiştir. X-ışını kırınımı desenlerinde, turbostratik karbonun (0 0 2) ve (1 0 0) düzlemlerine karşılık gelen 2θ = 23° ve 43°'de geniş kırınım piklerinin gözlenmesi, sınırlı grafitik düzenlemeye sahip ve genellikle amorf yapıları içeren karbon köpükler üretilmesine işaret etmiştir. Hesaplanan d₀₀₂ değerlerinin kristal grafitin (0.335 nm) değerinden daha yüksek olması karbon köpüklerin grafitleşmemiş ve yoğun bir şekilde kusur bölgeleri içeren düzensiz karbon iskeleti yapısını doğrulamıştır. Raman spektrumunda da grafitik (G bandı) ve kusurla ilgili (D bandı) özelliklerin bir arada bulunmasıyla varlığı desteklenen bu tür kusurlu kenarların CO₂ molekülleri için uygun adsorpsiyon bölgeleri sağladığı bilinmektedir. Aşırı grafitizasyonun aktif bölgeleri azaltmasına karşın kontrollü bir düzensizlik seviyesinin gaz-katı etkileşimlerini güçlü bir şekilde desteklediği göz önünde bulundurulduğunda, aktive edilmiş karbon köpüklerin yapısal düzen ve kusur yoğunluğu arasında sergilediği dengenin CO₂ adsorpsiyonunu arttırmada önemli bir rol oynadığı sonucuna ulaşılmıştır.

B. CO₂ adsorpsiyonuna ilişkin izoterm karşılaştırması (Isotherm comparison regarding CO₂ adsorption)

Karbon köpükler için Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich ve Temkin olmak üzere dört farklı izoterm modeli aracılığıyla tahmin edilen CO₂ adsorpsiyon izotermeleri ile deneysel veriler arasında karşılaştırma gerçekleştirilen karşılaştırmalara ilişkin denge eğrileri Şekil 2-5'te verilmiştir. Bu karşılaştırmada çözücü türü, çözücü oranı ve kimyasal aktivasyon etkilerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi sağlanmıştır. Karbon köpüklere ait 0 °C'deki CO₂ adsorpsiyonu denge verileri kullanılarak incelenen izoterm modellerine ait parametreler ise Tablo 2'de sunulmuştur.

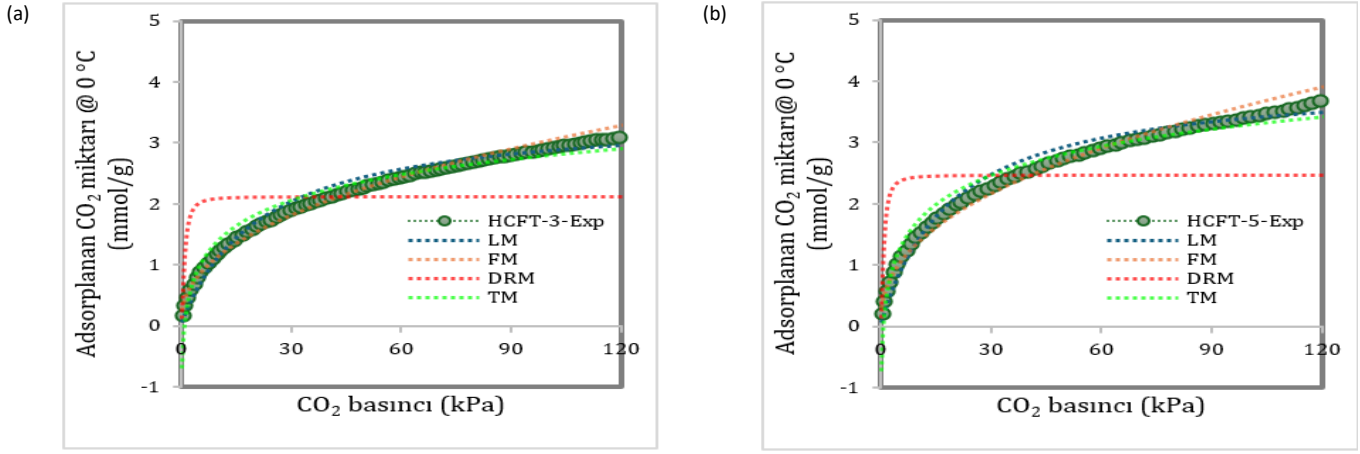
Tablo 2'deki CO₂ ile karbon köpük yüzeyi arasındaki etkileşime ait bilgiler sunan k_L ve k_F izoterm sabitleri, adsorpsiyon mekanizmasının hem aktivasyon hem de çözücü koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Langmuir izotermine ait parametreler incelendiğinde, kimyasal aktivasyon uygulanmayan ve çözücü olarak sadece fenol (F) kullanılarak üretilen karbon köpüklerde (HCF-3 ve HCF-5) maksimum tek-katman kapasitesi q_m değerlerinin sırasıyla 4.17 ve 4.41 mmol/g seviyesinde kaldığı görülmüştür. Aktivasyon sonrası q_m değerinin özellikle HCFA-3 aktive köpüğünde 8.10 mmol/g'a kadar yükselmesi, kimyasal aktivasyonun CO₂ için erişilebilir mikro gözenek hacmini artırarak adsorpsiyon kapasitesini yaklaşık iki katına çıkardığını desteklemiştir. Benzer eğilim çözücü olarak fenol+tar (F+T) karışımının kullanıldığı köpüklerde de gözlenmiş olup, HCFAT-3 aktive köpüğüne ait q_m değeri 7.87 mmol/g olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, kimyasal aktivasyon uygulanmayan "F" çözücülü karbon köpüklerin k_L değerleri 0.0472 ve 0.0587 1/kPa iken, aktivasyon sonrası HCFA-3 ve HCFA-5 aktive köpüklerinde bu değerlerin sırasıyla 0.0250 ve 0.0406 1/kPa'a düştüğü belirlenmiştir. Benzer şekilde "F+T" çözücüsü kullanıldığında aktivasyon sonrası k_L değerlerinde azalma gözlenmiştir. Örneğin, HCFT-3 için 0.0466 1/kPa olan k_L değeri HCFAT-3 için 0.0209 1/kPa olarak hesaplanmıştır. Langmuir sabiti k_L 'nin azalma eğilimi, aktivasyon işlemi sonucu CO₂ moleküllerinin bağlanabileceği yüzeydeki adsorpsiyon bölgesini oluşturan mikro gözenek sayısının artmasına rağmen bu bölgelerin ortalama bağlanma enerjisinin daha düşük olabileceğini ifade etmektedir. Bu durum, yüksek kapasite ile birlikte daha zayıf fakat daha yaygın fiziksel etkileşimlerin gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Freundlich izotermine ait k_F sabiti yüzeyin genel adsorpsiyon kapasitesini ve çok-katmanlı adsorpsiyon eğilimini temsil



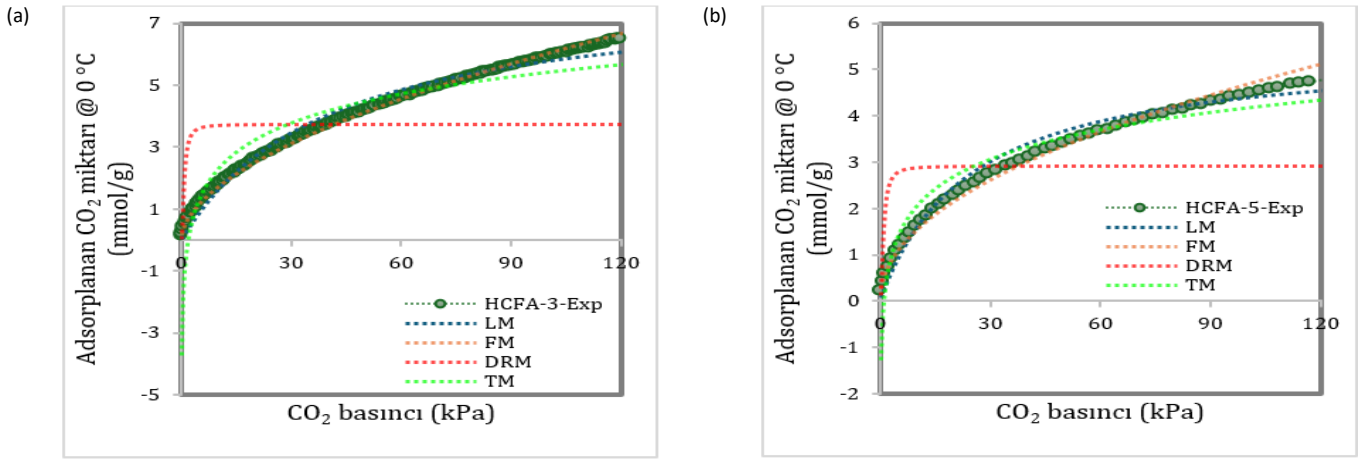
Şekil 2. Farklı izoterm modelleri aracılığıyla tahmin edilen CO₂ adsorpsiyon izotermeleri ile "fenol" kullanılarak üretilen karbon köpükler için deneysel veriler arasında karşılaştırma; çözücü/biyokütle ağırlık oranı (a) 3/1, (b) 5/1. (X-Exp: Kodu X olarak tanımlanan adsorbantı için deneysel veriler, LM: Langmuir, FM: Freundlich, DRM: Dubinin-Radushkevich ve TM: Temkin izoterm modelleri uyumu)

Figure 2. Comparison of experimental data for carbon foams produced using "phenol" with CO₂ adsorption isotherms predicted through different isotherm models; solvent-to-biomass weight ratio (a) 3/1, (b) 5/1. (X-Exp: experimental data for adsorbent defined as code X, LM: Langmuir, FM: Freundlich, DRM: Dubinin-Radushkevich, and TM: Temkin isotherm model fit)



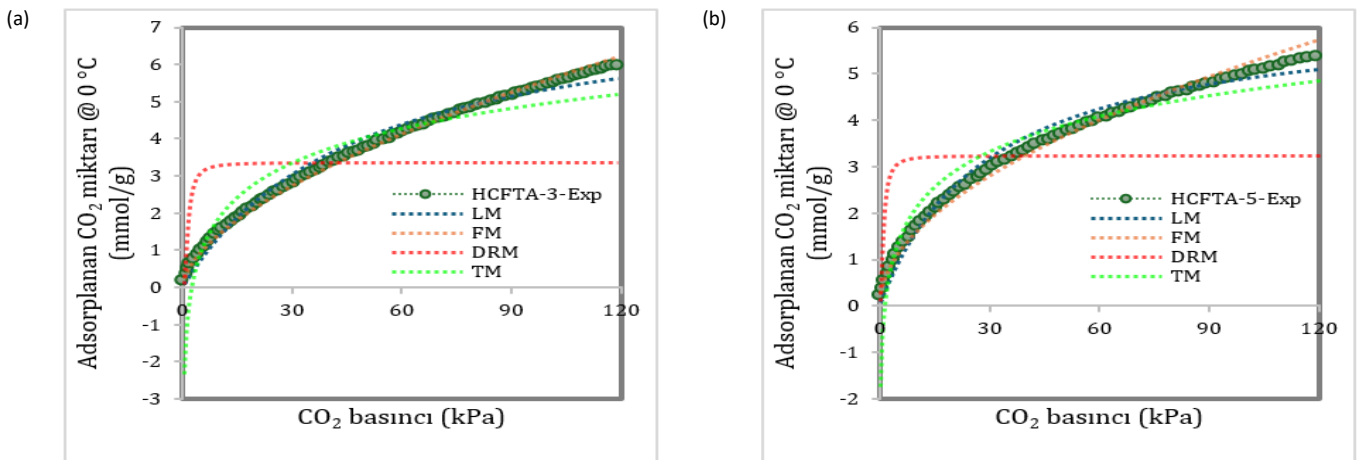
Şekil 3. Farklı izoterm modelleri aracılığıyla tahmin edilen CO₂ adsorpsiyon izotermeleri ile "fenol+tar" kullanılarak üretilen karbon köpükler için deneysel veriler arasında karşılaştırma; çözücü/biyokütle ağırlık oranı (a) 3/1, (b) 5/1. (X-Exp: Kodu X olarak tanımlanan adsorbana ait deneysel veriler, LM: Langmuir, FM: Freundlich, DRM: Dubinin-Radushkevich ve TM: Temkin izoterm modelleri uyumu)

Figure 3. Comparison of experimental data for carbon foams produced using "phenol+tar" with CO₂ adsorption isotherms predicted through different isotherm models; solvent-to-biomass weight ratio (a) 3/1, (b) 5/1. (X-Exp: experimental data for adsorbent defined as code X, LM: Langmuir, FM: Freundlich, DRM: Dubinin-Radushkevich, and TM: Temkin isotherm model fit)



Şekil 4. Farklı izoterm modelleri aracılığıyla tahmin edilen CO₂ adsorpsiyon izotermeleri ile "fenol" kullanılarak üretilen ve KOH ile aktive edilen karbon köpükler için deneysel veriler arasında karşılaştırma; çözücü/biyokütle ağırlık oranı (a) 3/1, (b) 5/1. (X-Exp: Kodu X olarak tanımlanan adsorbana ait deneysel veriler, LM: Langmuir, FM: Freundlich, DRM: Dubinin-Radushkevich ve TM: Temkin izoterm modelleri uyumu)

Figure 4. Comparison of experimental data for carbon foams produced using "phenol" and activated with KOH, with CO₂ adsorption isotherms predicted through different isotherm models; solvent-to-biomass weight ratio (a) 3/1, (b) 5/1. (X-Exp: experimental data for adsorbent defined as code X, LM: Langmuir, FM: Freundlich, DRM: Dubinin-Radushkevich, and TM: Temkin isotherm model fit)



Şekil 5. Farklı izoterm modelleri aracılığıyla tahmin edilen CO₂ adsorpsiyon izotermeleri ile "fenol+tar" kullanılarak üretilen ve KOH ile aktive edilen karbon köpükler için deneysel veriler arasında karşılaştırma; çözücü/biyokütle ağırlık oranı (a) 3/1, (b) 5/1. (X-Exp: Kodu X olarak tanımlanan adsorbana ait deneysel veriler, LM: Langmuir, FM: Freundlich, DRM: Dubinin-Radushkevich ve TM: Temkin izoterm modelleri uyumu)

Figure 5. Comparison of experimental data for carbon foams produced using "phenol+tar" and activated with KOH, with CO₂ adsorption isotherms predicted through different isotherm models; solvent-to-biomass weight ratio (a) 3/1, (b) 5/1. (X-Exp: experimental data for adsorbent defined as code X, LM: Langmuir, FM: Freundlich, DRM: Dubinin-Radushkevich, and TM: Temkin isotherm model fit)

Tablo 2. 0 °C'deki CO₂ adsorpsiyonu için izoterm model parametreleri (Çözücü Türü: F (fenol) veya F+T (fenol+tar karışımı); q_m : mmol/g; k_L : 1/kPa; k_F : mmol/(g.(kPa)^{1/n}); k_{DR} : mmol²/kJ²; E : kJ/mol; k_T : mmol/g.kPa; b_t : kJ/mol).

Table 2. Isotherm model parameters for CO₂ adsorption at 0 °C (Solvent Type: F (phenol) or F+T (phenol+tar mixture); q_m : mmol/g; k_L : 1/kPa; k_F : mmol/(g.(kPa)^{1/n}); k_{DR} : mmol²/kJ²; E : kJ/mol; k_T : mmol/g.kPa; b_t : kJ/mol).

Aktivasyon	Adsorban Kodu	Langmuir İzotermi			Freundlich İzotermi			
		q_m	k_L	R^2	n	k_F	R^2	
Çözücü: F								
Yok	HCF-3	4.1684	0.0472	0.9855	2.2868	0.4887	0.9863	
	HCF-5	4.4072	0.0587	0.9870	2.3425	0.5714	0.9837	
Var	HCFA-3	8.0972	0.0250	0.9599	1.8149	0.4774	0.9980	
	HCFA-5	5.4555	0.0406	0.9776	2.0640	0.5013	0.9929	
Çözücü: F+T								
Yok	HCFT-3	3.4843	0.0466	0.9841	2.3305	0.4203	0.9874	
	HCFT-5	4.0339	0.0525	0.9856	2.3529	0.5109	0.9840	
Var	HC FAT-3	7.8678	0.0209	0.9556	1.6776	0.3592	0.9982	
	HC FAT-5	6.3735	0.0332	0.9744	1.9283	0.4780	0.9935	
Aktivasyon	Adsorban Kodu	Dubinin-Radushkevich İzotermi				Temkin İzotermi		
		q_m	k_{DR}	E	R^2	k_T	b_t	R^2
Çözücü: F								
Yok	HCF-3	2.5010	2.5E+05	1.4145	0.4129	0.9870	3.12	0.9477
	HCF-5	2.6818	2.1E+05	1.5451	0.5048	1.4576	3.10	0.9506
Var	HCFA-3	3.7188	1.9E+05	1.6279	0.2973	0.5323	1.67	0.8791
	HCFA-5	2.9119	2.6E+05	1.3802	0.4484	0.9104	2.46	0.9225
Çözücü: F+T								
Yok	HCFT-3	2.1179	3.0E+05	1.2858	0.4321	0.9614	3.72	0.9495
	HCFT-5	2.4687	2.6E+05	1.3825	0.4717	1.1793	3.29	0.9528
Var	HC FAT-3	3.3582	4.9E+05	1.0090	0.3667	0.4114	1.70	0.8862
	HC FAT-5	3.2294	3.2E+05	1.2503	0.4120	0.6833	2.07	0.9157

etmektedir. Freundlich izotermi daha güçlü bağlanma bölgelerinin önce kaplandığını ve diğer bölgelerin azalan enerji sırasına göre işgal edildiğini varsaymaktadır [19]. Ayrıca, bu izoterm adsorpsiyon bölgelerinin adsorpsiyon enerjisine göre üstel olarak dağıldığı ve yüzey bölgelerinin her birinin karakteristik bir adsorpsiyon ısısına sahip çeşitli tiplere ayrıldığı varsayımına dayanmaktadır [20]. Tüm karbon köpüklerin 1.68-2.35 aralığında hesaplanan n değerlerinin 1'in üzerinde olması temel mekanizmanın fiziksel adsorpsiyon olduğunu, dolayısıyla ($1/n$) değerlerinin 0-1 aralığında yer alması adsorpsiyonun uygun şekilde gerçekleştiğini ve yüzeyin heterojen karakter taşıdığını göstermiştir. Aktivasyon sonrası özellikle HCFA-3 ve HC FAT-3 karbon köpüklerine ait n değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, aktivasyon uygulanmayan karbon köpüklerin k_F değerlerinin 0.42-0.57 mmol/(g.(kPa)^{1/n} aralığında olduğu, aktivasyon sonrası bu değerlerin azaldığı görülmüştür. Örneğin, HCFT-3 için 0.4203 mmol/(g.(kPa)^{1/n} olan k_F değeri HC FAT-3 için 0.3592 mmol/(g.(kPa)^{1/n}'e düşmüştür. Bununla birlikte, k_F izoterm sabitindeki bu değişim n parametresindeki düşüş ile birlikte değerlendirildiğinde, adsorpsiyonun daha heterojen bir yüzeyde ve farklı enerji seviyelerine sahip bölgelerde gerçekleştiğini desteklemektedir. Bu durum, kimyasal aktivasyonun karbon matrisinde farklı boyut ve enerji seviyelerine sahip gözenekler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Freundlich izoterm modeline ait yüksek R^2 değerleri (~0.99), düşük basınç bölgesinde CO₂ adsorpsiyonunun heterojen yüzey davranışı ile iyi temsil edildiğini göstermiştir. Şekil 2-5 incelendiğinde, özellikle Freundlich olmak üzere Langmuir ve Temkin modelleri için de deneysel izoterm ile tahmin edilen eğriler arasında 70 kPa'a kadar olan basınçlarda bir uyum gözlenmiştir. 70 kPa üzerindeki basınçlarda Langmuir ve Temkin modellerine ait izotermelerde daha fazla sapma olduğu, buna rağmen Freundlich izoterm modelinin daha geniş aralıkta deneysel verilerle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu gözlem Tablo 2'de yer alan R^2 değerleri ile de doğrulanmış ve izoterm modellerinin deneysel verilere uyumu Freundlich > Langmuir > Temkin > Dubinin-Radushkevich şeklinde sıralanmış olup, Dubinin-Radushkevich modelinin düşük R^2 değerleri nedeniyle sistem için sınırlı temsil gücüne sahip olduğu belirlenmiştir.

Dubinin-Radushkevich izotermine ait parametreler, adsorpsiyonun gözenek doluluk mekanizması ve enerji profili hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Dubinin-Radushkevich

modeli düşük R^2 değerleri (0.2973-0.5048) nedeniyle karbon köpük-CO₂ sistemine ait adsorpsiyon davranışını temsil eden birincil uyum modeli olarak değil, adsorpsiyon mekanizmasına ilişkin tamamlayıcı bilgi sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Aktivasyon uygulanan karbon köpüklerde teorik kapasite (q_m) değerlerinin belirgin şekilde artması (örneğin HCFA-3 ve HC FAT-3 için sırasıyla 3.72 ve 3.36 mmol/g), düşük sıcaklık koşullarında CO₂ moleküllerinin karbon matrisinde oluşan mikro gözeneklerde tutulması ile adsorpsiyonun kontrol edildiğini desteklemektedir. Modelden elde edilen ortalama adsorpsiyon serbest enerjisi (E) değerlerinin 1.01-1.63 kJ/mol aralığında olması adsorpsiyon sürecinin baskın olarak fiziksel etkileşimlerle gerçekleştiğini, dolayısıyla CO₂ moleküllerinin karbon köpük yüzeyinde Van der Waals kuvvetleri ile tutulduğunu ve kimyasal bağ oluşumunun sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, HCF-3 dışındaki diğer karbon köpüklerde aktivasyon sonrası k_{DR} değerlerinin artması, yüzey enerjisi dağılımının genişlediğinin ve mikro gözenek doluluk mekanizmasının daha etkin hale geldiğinin bir diğer göstergesidir.

Temkin izotermine ait sonuçlar da kimyasal aktivasyonun karbon köpük yüzeyi-CO₂ etkileşim enerjisini değiştirdiğini göstermiştir. Aktivasyon uygulanmayan karbon köpüklerde daha yüksek b_t değerlerinin (3.10-3.72 kJ/mol) elde edilmesi, sınırlı sayıda yüksek enerjili adsorpsiyon bölgesinin varlığına işaret etmektedir. Buna karşılık aktivasyon sonrası b_t değerlerinin 1.67-2.46 kJ/mol aralığına düşmesi, yüzeydeki etkileşim enerjisinin daha homojen bir dağılım gösterdiğini ifade etmektedir. Bu durum, kimyasal aktivasyon ile birlikte karbon köpük yüzeyinde daha fazla sayıda ancak daha düşük enerjili adsorpsiyon bölgesinin oluştuğunu ve zayıf etkileşimler doğrultusunda CO₂ moleküllerinin bu bölgelerde daha çok tutulduğunu ortaya koymuştur. Aktivasyon uygulanmayan karbon köpüklerde, fenol veya fenol+tar karışımının kullanıldığı koşullarda çözücü miktarındaki artışın b_t değerinde hafif azalmaya neden olduğu gözlenmiştir. Örneğin, HCF-3 için 3.12 kJ/mol olan b_t değeri HCF-5 için 3.10 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Ancak, aktive karbon köpüklerde çözücü miktarı artışına bağlı olarak (çözücü/biyokütle oranı 3/1'den 5/1'e çıkarıldığında) b_t değerinin HCFA için %47.3 ve HC FAT için %21.8 oranında arttığı belirlenmiştir. Hesaplanan bağlanma enerjilerinin 20 kJ/mol değerinin altında olması fiziksel adsorpsiyonun varlığını kanıtlamaktadır. Temkin sabiti k_T

kimyasal aktivasyon uygulanması sonucu azalırken, aynı çözücü kullanıldığında çözücü miktarının artırılmasıyla daha yüksek değerlerde hesaplanmıştır. Temkin sabiti k_T için gözlenen değişimler de adsorpsiyon kapasitesindeki artışın yalnızca yüzey alanı kazanımından değil, aynı zamanda yüzey enerji profilinin yeniden düzenlenmesinden kaynaklandığını desteklemiştir.

Sonuç olarak, adsorpsiyon mekanizmasının aydınlatılmasında seçilen izoterm modellerinin uygunluğunun çözücü türü/miktarı ve kimyasal aktivasyon koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. İzoterm modellerinin uygunluğunun karşılaştırılmasında belirleyici ölçüt olan R^2 değerlerine göre, (i) çözücü miktarındaki artışın biyokütle matrisi ile çözücü faz arasındaki temas alanını ve kütle transferini iyileştirmesi, (ii) tar katılanması ile çözücü ortamının polaritesinin azalması veya (iii) aktivasyon uygulanması ile mikro gözenek gelişimi gibi etkilerin adsorpsiyon sürecinin homojen ya da heterojen yüzey karakteri üzerinde doğrudan etkili olduğu anlaşılmıştır. Aktive edilmeyen karbon köpüklerde (*HCF-3*, *HCF-5*, *HCFT-3* ve *HCFT-5*) Langmuir ve Freundlich modellerine ait R^2 değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu (0.98-0.99 aralığında) ve her iki izoterm modelinin deneysel verileri benzer doğrulukta temsil ettiği görülmüştür. Bu durum, kimyasal aktivasyon uygulanmamış köpüklerde karma karakterdeki yüzey davranışının bulunduğunu, dolayısıyla modeller arasında belirgin bir baskınlık olmadığını ve adsorpsiyonun hem tek-katmanlı varsayım hem de heterojen yüzey yaklaşımı ile açıklanabildiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık, aktive edilmiş karbon köpükler (*HCFA-3*, *HCFA-5*, *HCFAT-3* ve *HCFAT-5*) için izoterm modellerinin uyumluluğu karşılaştırıldığında, Langmuir izotermine 0.95-0.98 aralığında değişen R^2 değerlerinin elde edildiği, Freundlich modeline ait yüksek değerler ($R^2 > 0.99$) ile adsorpsiyon verilerine uyumun daha iyi sağlandığı belirlenmiştir. Dubinin-Radushkevich izoterm modeline ait R^2 değerlerinin Langmuir ve Freundlich modellerine kıyasla belirgin şekilde düşük olduğu görülmüş, bu durum modelin deneysel verileri temsil etme gücünün sınırlı olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, Temkin modeli özellikle aktivasyon uygulanmayan karbon köpüklerde Dubinin-Radushkevich modeline kıyasla $R^2 \sim 0.95$ değeri ile daha iyi uyum sağlamıştır. Sonuç olarak, R^2 değerlerine göre yapılan sınıflandırmada, aktivasyon uygulanmamış karbon köpüklerde Langmuir-Freundlich arasında dengeli bir uyum söz konusu iken aktivasyon uygulanmış köpüklerde Freundlich modelinin baskın olması, kimyasal aktivasyonun yüzey davranışını heterojen adsorpsiyon modeline doğru kaydırıldığını ve tar katkısının ise bu heterojenliği destekleyici ancak ikincil bir etki gösterdiğini ortaya koymuştur.

C. Karbon köpüklerin CO₂ adsorpsiyon kapasitesine ilişkin istatistiksel analiz (Statistical analysis of the CO₂ adsorption capacity of carbon foams)

Yapılan çalışmada, CO₂ adsorplama kapasitesi üzerinde çözücü türü, çözücü/biyokütle oranı ve kimyasal aktivasyon uygulanmasına ilişkin faktörlerin etkilerinin incelenmesi amacıyla 2³ tam faktöriyel deneysel tasarım kullanılmıştır. Deneysel verilerin istatistiksel analizi MINITAB 22 yazılım programında gerçekleştirilmiş, ana etkiler ve iki-yönlü etkileşimlerin istatistiksel anlamlılığı ANOVA kullanılarak belirlenmiş, istatistiksel değerlendirmelerde anlamlılık seviyesi $\alpha = 0.10$ (%90 güven aralığı) olarak kabul edilmiştir. Standart etkilerin normal olasılık dağılımları ve Pareto grafiği kullanılarak ana faktör ve etkileşim etkilerinin önemleri görsel olarak değerlendirilmiştir. Pareto grafiğinde dikey referans çizgisini geçen ve normal olasılık grafiğinde doğrusal dağılımdan sapan etkiler anlamlı olarak tanımlanmıştır. Standart etkilerin Pareto grafiği (Şekil 6(a)), kimyasal aktivasyon faktörünün diğer faktörlere göre daha baskın bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Normal olasılık grafiği incelendiğinde (Şekil 6(b)), doğrusal dağılımdan belirgin şekilde sapan kimyasal aktivasyon etkisinin, potansiyel olarak önemli faktör olduğu desteklenmiştir.

CO₂ adsorpsiyonu verilerine uygulanan tam faktöriyel deney tasarımına ait istatistiksel parametreler Tablo 3'te ve varyans analizi sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. Bahsedilen tablolarda varyans analizi sonuçlarına göre ilgili faktöre ait belirlenen Etki, Katsayı, *T*-değeri, *P*-değeri, Serbestlik Derecesi (SD), Düzeltilmiş Kareler Toplamı (DKT), Düzeltilmiş Kareler Ortalaması (DKO) ve *F*-oranı değerleri yer almaktadır. Model terimlerinin yanıt değişkenindeki değişimi büyük ölçüde temsil ettiği görülmüş, deney sayısının sınırlı olması nedeniyle hata serbestlik derecesinin düşük olması (Hata SD = 1) ise klasik anlamlılık testlerinin güvenilirliğini sınırlamıştır. Bu nedenle, potansiyel olarak etkili faktörlerin güvenilir biçimde belirlenmesi amacıyla ön eleme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, istatistiksel anlamlılık kriterlerinin yanı sıra karbon köpük üretim parametrelerinin karakteristik özellikler üzerindeki etkileri dikkate alınarak yorumlanmıştır. CO₂ adsorplama kapasitesinin deneysel değişkenler ile olan ilişkisini açıklamak üzere (8)'de doğrusal temsili regresyon modeli oluşturulmuş ve istatistiksel analiz sonucu üretilen tahmin modeline ait regresyon denklemi (9)'da verilmiştir. Eşitlik (9) tüm faktörlerin ve ikili etkileşimlerin CO₂ adsorplama kapasitesi üzerindeki katkıları sayısal olarak ortaya koymaktadır:

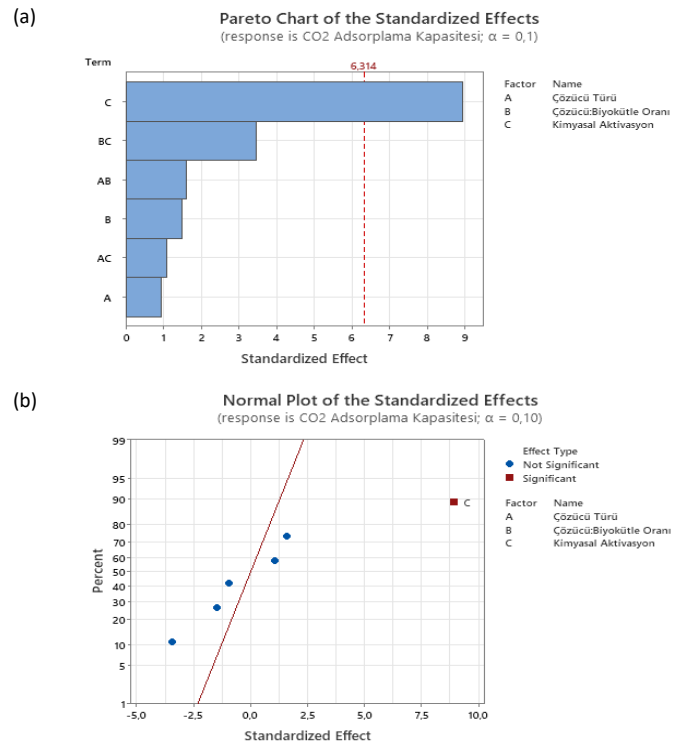
$$Y = X_0 + X_1A + X_2B + X_3C + X_4AB + X_5AC + X_6BC, \quad (8)$$

burada X_0 sabit katsayıyı, X_i ise ana etkilere ve ikili etkileşimlere karşılık gelen katsayıları ve Y tahmin edilen yanıt (CO₂ Adsorplama Kapasitesi, mmol/g) ifade etmektedir. Deneysel değişkenler olan "Çözücü Türü", "Çözücü/Biyokütle Oranı" ve "Kimyasal Aktivasyon" sırasıyla *A*, *B* ve *C* harfleri ile gösterilmiştir.

$$\text{CO}_2 \text{ Adsorplama Kapasitesi} = 4.671 - 0.107A - 0.170B$$

$$+ 1.018C + 0.182AB + 0.123AC - 0.395BC. \quad (9)$$

Varyans analizi sonucuna göre üretilen regresyon modeli, cevap olarak değerlendirilen CO₂ adsorplama kapasitesi üzerindeki reaksiyon parametrelerinin etkilerini nicel olarak belirtmekte ve



Şekil 6. CO₂ adsorplama kapasitesi için standart etkilerin a) Pareto grafiği ve b) normal olasılık dağılım grafiği.

Figure 6. a) Pareto chart, and b) normal probability distribution plot of the standard effects for CO₂ adsorption capacity.

Tablo 3. CO₂ adsorplama kapasitesi için 2³ tam faktöriyel deneysel tasarıma ait istatistiksel parametreler.**Table 3.** Statistical parameters of a 2³ full factorial experimental design for CO₂ adsorption capacity.

Terim	Etki	Katsayı	T-Değeri	P-Değeri
Sabit		4.671	41.02	0.016
A	-0.214	-0.107	-0.94	0.520
B	-0.340	-0.170	-1.49	0.376
C	2.037	1.018	8.94	0.071
AB	0.364	0.182	1.60	0.356
AC	0.245	0.123	1.08	0.476
BC	-0.791	-0.395	-3.47	0.179

Tablo 4. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları.**Table 4.** Analysis of variance (ANOVA) results.

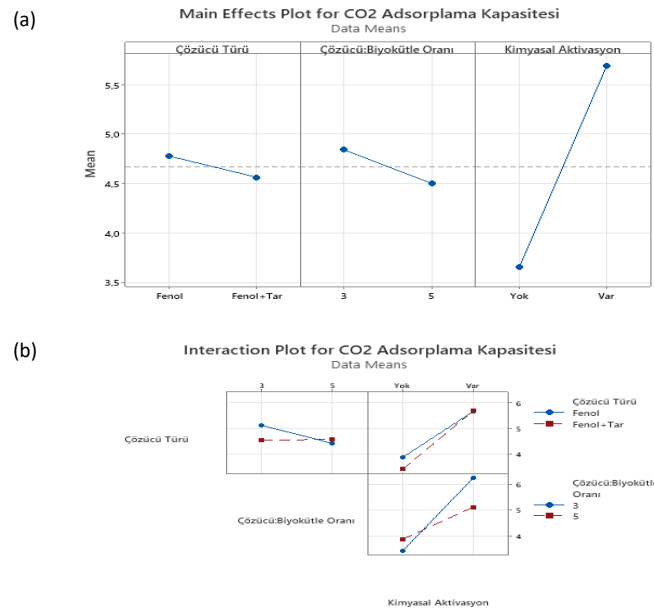
Varyansın Kaynağı	SD	DKT	DKO	×F-Oranı	P-Değeri
Model	6	10.2544	1.70907	16.47	0.186
Lineer	3	8.6189	2.87298	27.69	0.139
A	1	0.0914	0.09138	0.88	0.520
B	1	0.2309	0.23086	2.23	0.376
C	1	8.2967	8.29670	79.98	0.071
2-Yönlü Etkileşimler	3	1.6355	0.54516	5.26	0.308
AB	1	0.2646	0.26463	2.55	0.356
AC	1	0.1203	0.12030	1.16	0.476
BC	1	1.2506	1.25057	12.05	0.179
Hata	1	0.1037	0.10374		
Toplam	7	10.3582			
R ² (%)		99.0			

adsorpsiyon sürecinde baskın rol oynayan faktörleri netleştirmektedir. Buna göre, CO₂ adsorplama kapasitesinin esas olarak "Kimyasal Aktivasyon" tarafından yönlendirildiği (P-değeri = 0.071), diğer iki parametrenin (Çözücü Türü ve Çözücü/Biyokütle Oranı) ise köpüğün yapısal gelişimini dolaylı olarak şekillendirdiği sonucuna ulaşılmıştır. 0.071 olmak üzere yüksek P-değerinin yanı sıra, "Kimyasal Aktivasyon" faktörü için hesaplanan DKT değerinin (8.2967) toplam varyansın büyük bir kısmını oluşturduğu belirlenmiştir. Ana etkiler incelendiğinde, "Kimyasal Aktivasyon" faktörünün sahip olduğu 1.018 değerindeki katsayının diğer etkilere kıyasla oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu katsayının model denkleme pozitif katkı sağlaması, karakterizasyon sonuçları ile de desteklendiği üzere kimyasal aktivasyonun karbon iskeletinde mikro gözenek gelişimini ve erişilebilir yüzey alanını artırarak CO₂ tutma kapasitesini belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermektedir. Bu sonucun, literatürdeki kimyasal aktivasyon-adsorpsiyon kapasitesi ilişkisiyle uyumlu olduğu bilinmektedir.

"Çözücü Türü" ve "Çözücü/Biyokütle Oranı" için elde edilen negatif katsayılar, bu parametrelerin tek başına değerlendirildiğinde adsorpsiyon performansı üzerinde sınırlı ve ikincil bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Faktöriyel deney tasarımı kapsamında değerlendirilen "Çözücü Türü" faktörüne ait etki değeri (-0.214) ve P-değeri (0.520) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, %90 güven seviyesinde yapılan değerlendirmede faktörün yanıt değişkeni üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir ana etki göstermediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, "Çözücü Türü" faktörüne ait DKT (0.0914) değerinin düşük olması, bu faktörün model kapsamında açıklanan toplam varyansa katkısının sınırlı olduğunu göstermiştir. "Çözücü Türü" için -0.107 olarak belirlenen katsayı, fenol yerine fenol+tar olmak üzere seçilen çözücü türünün CO₂ adsorpsiyon kapasitesini hafifçe azalttığını ifade etmektedir. Bu bulgular, çözücü türünün tek başına baskın bir parametre olmadığını, ancak etkileşimler yoluyla dolaylı etkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, biyokütlenin çözünme davranışı, ön-polimer oluşumu ve karbonizasyon öncesi matris homojenliği üzerinde çözücü türünün rolü dikkate alındığında, bu faktörün yalnızca istatistiksel sonuçlar üzerinden değerlendirilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle çözücü-biyokütle etkileşiminin,

aktivasyon sırasında oluşan gözenek yapısının dağılımını ve köpüğün dayanımını dolaylı olarak etkileyebildiği karakterizasyon sonuçları ile desteklenmiştir. "Çözücü/Biyokütle Oranı" ana faktörüne ait P-değerinin (0.376) istatistiksel anlamlılık sınırlarının üzerinde kaldığı belirlenmiş, çözücü oranındaki artışın CO₂ adsorplama kapasitesinin düşmesine neden olduğu -0.170 değerindeki katsayı ile ilişkilendirilmiştir. Buna ek olarak, "Çözücü Türü" faktörüne ait sonuçlar ile kıyaslandığında, bu faktörün etki (-0.340) ve DKT (0.2309) değerlerinin daha yüksek olması, çözücü miktarının cevap üzerinde nispeten daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla, çözücü miktarındaki artışın biyokütle yapısının çözünme derecesini etkileyebildiği ve karbon köpüklerin oluşumu sırasında gözenek gelişimi üzerinde belirleyici bir rol oynadığı kanıtlanmıştır. İstatistiksel analiz sonucunda elde edilen parametrelerin Şekil 7(a)'da verilen CO₂ adsorplama kapasitesi için ana etkilere ait grafik ile paralelliği söz konusudur.

İkili etkileşim terimleri, karbon köpük üretim sürecine ilişkin parametrelerin birlikte değerlendirilmesi ile daha karmaşık ve yönlü etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. İstatistiksel analiz sonucunda elde edilen parametreler ile Şekil 7(b)'de verilen CO₂ adsorplama kapasitesi için etkileşim etkilerine ait grafik birlikte yorumlanmıştır. "Çözücü Türü × Çözücü/Biyokütle Oranı" etkileşiminin etki değeri 0.364 ve P-değeri 0.356 olarak hesaplanmıştır. Bu etkileşim, seçilen çözücünün reaksiyon ortamına değişen oranlarda eklenmesi sonucu biyokütle matrisi ile farklı derecelerde etkileşime girerek köpük yapısını oluşturan öncü biyopoliol içeriğini etkileyeceğini göstermiştir. "Çözücü Türü × Kimyasal Aktivasyon" etkileşiminin etki değeri ise 0.245 ve P-değeri 0.476 olarak belirlenmiştir. "Çözücü Türü × Kimyasal Aktivasyon" etkileşimi için elde edilen sonuçlar, çözücü kimyasının karbon iskeletinin kimyasal bileşimini ve aktivasyon ajanı KOH ile etkileşimini dolaylı olarak etkileyebileceğine işaret etmektedir. %90 güven seviyesine göre yapılan değerlendirmede, "Çözücü Türü × Çözücü/Biyokütle Oranı" ve "Çözücü Türü × Kimyasal Aktivasyon" etkileşimleri için hesaplanan P-değerlerinin istatistiksel anlamlılık sınırlarının üzerinde kalması nedeniyle bu etkileşimler güçlü etkiler olarak değerlendirilememiş, ancak deney sayısının artırılması durumunda daha belirgin sonuçlar sergileyebilecek potansiyel eğilimler olarak yorumlanmıştır. Ayrıca, "Çözücü Türü ×

**Şekil 7.** CO₂ Adsorplama Kapasitesi için a) ana etkilerin ve b) etkileşim etkilerinin grafikleri.**Figure 7.** Plots of a) main effects, and b) interaction effects for CO₂ Adsorption Capacity.

“Çözücü/Biyokütle Oranı” ve “Çözücü Türü × Kimyasal Aktivasyon” ikili etkileşimlerine ait DKT değerleri sırasıyla 0.2646 ve 0.1203 olarak belirlenmiş, bu değerlerin ana etkilerle karşılaştırıldığında düşük düzeyde olması bu etkileşimlerin yanıt üzerindeki katkısının sınırlı olduğunu göstermiştir. İki-yönlü etkileşimler arasında en düşük DKT değerinin “Çözücü Türü × Kimyasal Aktivasyon” ikili etkileşiminde elde edilmesi, kimyasal aktivasyon etkisinin çözücü türünden büyük ölçüde bağımsız olduğunu ifade etmektedir. Buna karşılık, “Çözücü/Biyokütle Oranı × Kimyasal Aktivasyon” etkileşimi diğer iki etkileşime kıyasla daha yüksek bir etki (-0.791) ve DKT (1.2506) değeri sergilemiştir. Bu etkileşim için de *P*-değeri (0.179) istatistiksel anlamlılık sınırlarının üzerinde hesaplanmıştır. Ancak, “Çözücü/Biyokütle Oranı × Kimyasal Aktivasyon” etkileşiminin diğer ikili etkileşimlere göre daha yüksek varyans katkısı sergilemesi, kimyasal aktivasyon etkisinin çözücü oranına duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, aktivasyon ajanı KOH ile biyopoliol-esaslı karbon köpük matrisi arasındaki etkileşimin, çözücü oranına bağlı olarak farklılık gösterebileceğine işaret etmektedir.

İki-yönlü etkileşimler için Tablo 3’te verilen katsayı değerleri incelendiğinde, “Çözücü Türü × Çözücü/Biyokütle Oranı” ve “Çözücü Türü × Kimyasal Aktivasyon” etkileşimlerinin sırasıyla 0.182 ve 0.123’lük katsayılara sahip olması, faktörlere ait uygun kombinasyonlar seçildiğinde karbon köpük matrisinin CO₂ adsorpsiyonunda etkili olabilecek bir gözenek yapısı geliştirebileceğini göstermiştir. Buna karşılık, “Çözücü/Biyokütle Oranı × Kimyasal Aktivasyon” etkileşiminin -0.395 değerindeki katsayısı, diğer ikili-etkileşimlerin katsayılarına kıyasla mutlak değer olarak daha yüksek bulunmuştur. Bu negatif katsayı, yüksek çözücü oranı kullanılarak üretilen karbon matrisinin kimyasal aktivasyon etkinliğinin azalması sonucu gözenek gelişiminin ve dolayısıyla adsorplama kapasitesinin sınırlanabileceğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, oluşturulan model, CO₂ adsorpsiyon performansının temel olarak kimyasal aktivasyon tarafından belirlendiğini, çözücü ile ilgili parametrelerin ise kimyasal aktivasyon ile ikili etkileşimler yoluyla yapı-performans ilişkisini etkileyen ikincil faktörler olarak rol oynadığını ortaya koymuştur.

IV. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, gürge talaşından üretilen biyopoliol-esaslı karbon köpüklerin CO₂ adsorpsiyon performansı hem sentez parametresinin istatistiksel analizi hem de izoterm model yapımı açısından incelenmiştir. 0 °C’deki CO₂ tutma deneylerinden elde edilen veriler değerlendirildiğinde, kimyasal aktivasyonun adsorpsiyon kapasitesi üzerinde belirleyici bir rol oynadığı ve çözücü türü ile çözücü/biyokütle oranı olmak üzere diğer işlem parametrelerinin bu etkiyi destekleyici yönde katkı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre, aktivasyon uygulanmayan köpükler için kapasite değerlerinin 3.13-4.04 mmol/g aralığında kaldığı ancak karbon köpükler için maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 6.53 mmol/g’a kadar belirgin biçimde arttığı belirlenmiştir. Bu bulgular, yüksek yüzey alanı, artan mikro gözeneklilik, uygun gözenek geometrisi ve kusur bakımından zengin turbostratik karbon yapılarının adsorpsiyon performansını etkileyen güçlü özellikler olduğunu desteklemiştir. CO₂ adsorpsiyon mekanizmasının aydınlatılması için deneysel denge verilerinin izoterm modelleri ile incelenmesi, adsorban olarak kullanılan karbon köpüklerin maksimum kapasitesi, yüzey enerji dağılımı ve bağlanma afinitesi gibi kritik parametrelerinin belirlenmesini sağlamıştır. Buna göre, karbon köpükler için Langmuir ve Freundlich izotermelerinin benzer uyum katsayıları sunduğu, aktive köpükler için ise Freundlich izotermine daha yüksek *R*² değerleri ile deneysel verileri daha iyi temsil ettiği, dolayısıyla karbon köpük üretim koşullarının izoterm model davranışını etkilediği belirlenmiştir. Karbon köpüklerin aktive edilmesi sonucu Langmuir modeline ait tek-atomlu adsorpsiyon kapasitesindeki belirgin artış

mikrogözenek gelişiminin CO₂ tutulmasında kritik rol oynadığını göstermiş, Freundlich izoterm parametreleri de aktivasyon sonrası yüzey heterojenliğinin arttığına ve adsorpsiyonun farklı enerjilere sahip bölgelerde gerçekleştiğine işaret etmiştir. Ayrıca, Dubinin-Radushkevich modelinden hesaplanan düşük ortalama adsorpsiyon serbest enerjisi değerleri (*E* < 1.63 kJ/mol) süreç üzerinde fiziksel adsorpsiyon mekanizmasının baskın olduğunu gösterirken, Temkin izotermi sonuçları aktivasyonun karbon köpük yüzeyi-CO₂ etkileşim enerjisini değiştirerek daha fazla sayıda ancak daha zayıf adsorpsiyon bölgesinin oluşmasına katkı sağladığını ispatlamıştır. Bu durum, sentez parametrelerinin adsorpsiyon davranışının modellenmesinde dikkate alınması gereken önemli değişkenler olduğunu ortaya koymakta ve karbon köpüklerin CO₂ yakalama uygulamalarına yönelik tasarımında süreç koşullarının optimize edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Sınırlı sayıda deney göz önüne alındığında, potansiyel olarak etkili faktörleri belirlemek için kullanılan varyans analizi sonucunda %90 güven seviyesinde yalnızca kimyasal aktivasyon ana etkisinin istatistiksel anlamlılığa sahip olduğu, çözücü türü ve çözücü/biyokütle oranının ise daha çok etkileşimler aracılığıyla yapısal özellikleri şekillendirdiği belirlenmiştir. Pozitif etkileşim terimleri uygun sentez koşulu seçiminin karbon matrisinde daha gelişmiş bir gözenek yapısı oluşturabileceğine işaret ederken, çözücü/biyokütle oranı ile kimyasal aktivasyon arasındaki negatif etkileşim yüksek çözücü oranlarında aktivasyon veriminin azalabileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, karmaşık köpük-tipi karbonlu malzemelerde adsorpsiyon davranışının yorumlanması amacıyla faktöriyel yaklaşımın sağladığı sonuçlar parametrelerin önemine ilişkin kritik bilgiler sunmuştur. Bu yaklaşım, gelecekte uygulanması planlanan daha kapsamlı optimizasyon çalışmalarında parametrelerin önceliklendirilmesi için rehber niteliği taşımaktadır. Gürge talaşı biyopoliolü-esaslı karbon köpüklerin üstün CO₂ tutma kapasitesi, karbon yakalama uygulamaları için kereste endüstrisi atıklarının sürdürülebilir ve verimli adsorbanlar olarak potansiyellerini ön plana çıkarmıştır.

YAZAR BEYANI (AUTHOR STATEMENT)

İntihal Kontrolü (Plagiarism Check)—Makale iThenticate programı ile taranmış ve derginin intihal politikası ile uyumlu bulunmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)—Makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Etik Kurul Onayı (Ethics Committee Approval)—Makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Yapay Zekâ Araçlarının Kullanımı (Use of Artificial Intelligence Tools)—Bu çalışmada, makale yazımında herhangi bir yapay zekâ aracı kullanılmamıştır. Tüm içerik yazarın özgün katkısını yansıtmaktadır.

Finansman ve Proje Desteği (Funding)—Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen 2018-01.BŞEÜ.03-10 ve 2020-01.BŞEÜ.03-08 numaralı projelere ait veriler kullanılarak oluşturulmuştur.

Veri Paylaşım (Data availability)—Bu çalışmanın bulgularını destekleyen veriler makalenin yazarı tarafından üretilmiş olup; makul talepler doğrultusunda yazardan temin edilebilir.

Yazar Katkısı (CRediT Author Contribution)—Kavramsallaştırma, Yöntem, Yazılım, Biçimsel Analiz, Araştırma, Veri Düzenleme, Yazma – ilk taslak, Yazma – inceleme ve düzeltme, Görselleştirme, Proje Yönetimi (Adife Şeyda Yargıç).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. Akgül, S. Sözer, “A PN junction application of renewable carbon derived from tea waste biomass on a silicon substrate”, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 29(2), 146-150, 2023. <https://doi.org/10.5505/pajes.2022.58997>.
- [2] A. Ş. Yargıç, G. G. Meriç, Y. Dolaş, N. Özbay, “A novel approach for biopitch-derived carbon foams: Combining mesoporous SBA-15 silica hard-templating method and chemical activation to modify the characteristics”, *Biomass & Bioenergy*, 197, 107843, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107843>.
- [3] M. Choudhary, N. Chakinala, P. Saini, P. K. Suroliya, A. G. Chakinala, “Carbon foams derived from biomass with ultra-high adsorption capacity for the removal of tetracycline”, *Materials Advances*, 6(20), 7450-7468, 2025. <https://doi.org/10.1039/d5ma00720h>.

- [4] B. Shi, Z. Xie, Y. Duan, G. Chen, Z. Li, H. Shen,... H. Wu, "Dual-template synthetic biomass-derived carbon foam integrating heat insulation, sound absorption and microwave absorption", *Journal of Materials Science & Technology*, 236, 77-85, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.02.045>.
- [5] D. F. Maquifñez-Buitrago, J. M. Ramos-Rincón, L. Giraldo, J. C. Moreno-Piraján, "Carbon foams for CO₂ adsorption: Synthesis, characterization and application", *Hybrid Advances*, 6, 100219, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100219>.
- [6] H. Gülhan, R. K. Dereli, H. Özgün, M. E. Erşahin, İ. Öztürk, "Effects of operating parameters on direct greenhouse gas emission in advanced biological wastewater treatment plants", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(6), 1117-1124, 2018. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.30806>.
- [7] S. Candamano, A. Policicchio, G. Conte, R. Abarca, C. Algieri, S. Chakraborty, S. Curcio, V. Calabro, F. Crea, R. G. Agostino, "Preparation of foamed and unfoamed geopolymer/NaX zeolite/activated carbon composites for CO₂ adsorption", *Journal of Cleaner Production*, 330, 129843, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129843>.
- [8] R. Eshraghi, K. Naderi, A. Ghaemi, M. Fasihi, "Advanced phenolic foam adsorbents for CO₂ capture with high capacity and selectivity via tuning the cellular structure", *Results in Engineering*, 27, 105771, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105771>.
- [9] G. Verrecchia, L. Cafiero, B. de Caprariis, A. Dell'Era, I. Pettiti, R. Tuffi, M. Scarsella, "Study of the parameters of zeolites synthesis from coal fly ash in order to optimize their CO₂ adsorption", *Fuel*, 276, 118041, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118041>.
- [10] H. N. Altayb, B. Kouidhi, O. A. S. Baothman, J. A. Abdulhakim, L. Ayed, M. Hager, K. Chaieb, "Mathematical modeling and optimization by the application of full factorial design and response surface methodology approach for decolorization of dyes by a newly isolated Photobacterium ganghwense", *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102429, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102429>.
- [11] Q. S. Hu, L. J. Wang, X. L. Xu, Y. Liu, Y. J. Xie, B. W. Xu, C. Y. Jiang, J. Li, G. Y. Liu, F. Zeng, "Systematic Optimization of Quaternary CoAlPtMo Catalysts for Alcohol Synthesis from CO₂ Hydrogenation Using a Full-Factorial Design Approach", *Chemical Engineering Research & Design*, 226, 336-348, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2026.01.004>.
- [12] A. S. Yargic, G. G. Meric, R. Z. Yarbay, N. Ozbay, "Investigation of CO₂ sequestration performance and statistical analysis of dye removal efficiency of liquefied hornbeam based carbon foams: Effects of biomass/solvent weight ratio, tar contribution, and chemical activation", *Materials Today Sustainability*, 24, 100517, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100517>.
- [13] A. Ş. Yargıç, M. Şener, "Mesoporous Silica-Polyethyleneimine Composites as High-Capacity Adsorbents for CO₂ Adsorption: Isotherm and Thermodynamic Analysis", *Water Air and Soil Pollution*, 236(3), 151, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-07782-w>.
- [14] E. Kirtıl, "Universal prediction of CO₂ adsorption on zeolites using machine learning: a comparative analysis with langmuir isotherm models", *Chemengineering*, 9(4), 80, 2025. <https://doi.org/10.3390/chemengineering9040080>.
- [15] N. Ayawei, A. N. Ebelegi, D. Wankasi, "Modelling and interpretation of adsorption isotherms", *Journal of Chemistry*, 2017(1), 3039817, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>.
- [16] J. L. Wang, X. Guo, "Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method", *Chemosphere*, 258, 127279, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>.
- [17] I. I. Laskar, Z. Hashisho, "Insights into modeling adsorption equilibria of single and multicomponent systems of organic and water vapors", *Separation and Purification Technology*, 241, 116681, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116681>.
- [18] C. Goel, H. Bhunia, P. K. Bajpai, "Resorcinol-formaldehyde based nanostructured carbons for CO₂ adsorption: kinetics, isotherm and thermodynamic studies", *RSC Advances*, 5(113), 93563-93578, 2015. <https://doi.org/10.1039/c5ra16255f>.
- [19] A. El Jerry, H. S. K. Alawamleh, M. H. Sami, H. A. Abbas, S. S. Sammen, A. Ahsan, M. A. Imteaz, A. Shanableh, M. Shafiquzzaman, H. Osman, N. Al-Ansari, "Isotherms, kinetics and thermodynamic mechanism of methylene blue dye adsorption on synthesized activated carbon", *Scientific Reports*, 14(1), 970, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50937-0>.
- [20] B. T. Danat, R. A. Wuana, H. F. Chahul, M. S. Iorungwa, "Review of adsorption isotherms models", *Applied Water Science*, 16(3), 72, 2026. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02682-0>.