



Doğal zeolit ve bentonitin karakterizasyonu ve CO₂ tutumunda kullanımı

Characterization of natural zeolite and bentonite and their use in CO₂ capture

Mehmet Şahin Ataş^{1,*} 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 42075, Konya, Türkiye

Öz

Bu çalışmada doğal zeolit ve bentonit herhangi bir işleme tabi tutulmadan CO₂ tutumunda adsorban malzemesi olarak kullanılmıştır. Temin edilen zeolit ve bentonitin yapısal özellikleri, X-ışını kırınımı (XRD) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi (FTIR) kullanılarak karakterize edilmiştir. Morfolojik özellikleri Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve N₂-adsorpsiyon-desorpsiyon ölçümleri ise Brunauer–Emmett–Teller (BET) cihazları kullanılarak karakterize edilmiştir. Zeolit ve bentonitin BET yüzey alanları ve CO₂ yakalama performansı hem statik hem de akış koşulları altında incelenmiştir. Zeolit, yüksek mezogözenek hacmi ile 125,23 m²/g'lık yüksek bir BET yüzey alanı ve 25 °C ve 1 bar'da yüksek CO₂ yakalama kapasitesi (38,7 mg/g) sergilemiştir. Buna ek olarak, Bentonit malzemesi zeolite göre daha düşük 53,79 m²/g'lık bir BET yüzey alanı ve daha düşük CO₂ yakalama kapasitesi (20,53 mg/g) göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Zeolit, Bentonit, CO₂ tutumu, Adsorpsiyon

1 Giriş

Atmosfere sera gazı olarak bilinen N₂O, CH₄ ve CO₂ gibi gazların salınmasıyla başlayan iklim değişikliğinin etkileri dünya genelinde endişe kaynağı olmuştur [1-4]. Karbon dioksit (CO₂), en belirgin sera gazlarından biri olup, yanmış fosil yakıtlarının ve petrol ürünlerinin ana yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır [5, 6]. Doğal gaza olan talebin artmasından dolayı, beklenmedik bir şekilde CO₂ miktarını artırmakta ve bu da küresel ısınma krizine yol açmaktadır. Enerji kullanımının verimliliğini artırmanın yanı sıra, atmosferden CO₂'nin tutumunu ve CO₂ emisyonlarını azaltmak için alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır [7-9]. CO₂'yi atmosferden uzaklaştırmak için geleneksel yöntem olan kemosorpsiyon yaklaşımı, Lewis asidi (CO₂) ile Lewis bazının (amin) güçlü etkileşimi aracılığıyla sulu amin çözeltileri kullanılmaktadır. Ekipmanın korozyonu ve ciddi ekonomik maliyet nedeniyle, fiziksel adsorpsiyon esaslı gözenekli malzemeler üzerinde alternatif yöntemlere acil bir ihtiyaç vardır [10-12].

Zeolitler [4, 13-15], bentonitler [16-18], alümina [19], metal-organik yapılar (MOF) [20, 21], kovalent organik polimerler (COP) [22], aktif karbonlar [23], metalik nanoalaşımalar [24, 25], nanofiberler [26] ve mozoporus silica [27] gibi birçok geleneksel adsorban, CO₂ adsorpsiyonu için kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında

Abstract

In this study, natural zeolite and bentonite were used as adsorbent material in CO₂ sequestration without any treatment. The structural properties of the supplied zeolite and bentonite were characterized using X-ray diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR). Morphological properties were characterized using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and N₂-adsorption-desorption measurements using Brunauer–Emmett–Teller (BET) instruments. BET surface areas and CO₂ capture performance of zeolite and bentonite were investigated under both static and flow conditions. The zeolite exhibited a high mesopore volume, a high BET surface area of 125.23 m²/g and a high CO₂ capture capacity (38.7 mg/g) at 25 °C and 1 bar. In addition, Bentonite material showed a lower BET surface area of 53.79 m²/g and lower CO₂ capture capacity (20.53 mg/g) than zeolite.

Keywords: Zeolite, Bentonite, CO₂ capture, Adsorption

bulunan bentonit ve zeolitler, yüksek yüzey alanlarına sahip gözenekli, kristalin ve doğal kil mineralleridir [28, 29]. Etkili bir CO₂ yakalama sisteminin geliştirilmesi, küresel sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik öneme sahiptir. Zeolit ve bentonitler, yüzeylerinde bulunan sodyum iyonlarından dolayı CO₂ tutumunda kullanımı oldukça yaygındır. CO₂'nin sodyum iyonlarına afinitelerinin yüksek olması bu malzemelerin CO₂ tutumunda kullanımını daha da ön plana çıkarmaktadır [30]. Aynı zamanda yüksek yüzey alanları ve ayarlanabilir gözenek fonksiyonelliği sayesinde büyük miktarlarda CO₂'nin seçici olarak adsorpsiyonunu mümkün kıldığı için CO₂ yakalama malzemeleri için özellikle umut vericidir [31, 32]. Herhangi bir CO₂ yakalama işleminde temel maliyet, doymuş hale gelmiş CO₂ ile yeniden doldurulan adsorbanın tekrar tekrar kullanılmasıdır. Zeolit ve bentonitlerdeki gözenek yüzeyleri ile CO₂'nin etkileşimi, belirli bir miktarda CO₂'nin yakalanması için gereken enerjiyi en aza indirmek ve yüzey modifikasyonu gerekmektedir [33-35].

Zeolit ve bentonit ile ilgili atık sulardan boya giderimi [36], ağır metal iyonu giderimi [37] ve zehirli gazların bertarafı [32] için birçok çalışma yapılmıştır. Doğal zeolit ve bentonitin tek başına kullanımı ile ilgili çok az çalışma yapılmıştır. Özellikle Seydişehir/KONYA yöresinden elde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: msatas@ktun.edu.tr (M. Ş. Ataş)

Geliş / Received: 22.08.2023 Kabul / Accepted: 01.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1348145

edilen bu adsorbanların karakterizasyonu ve CO₂ tutumu ile ilgili çalışma bulunmamaktadır.

Zeolit ve bentonit küresel olarak bol miktarda bulunan ve düşük maliyetli olması dikkate alındığında gelecekte bu kaynaklar kullanılarak CO₂ tutumu gerçekleştirilebilir. Bu çalışmanın amacı, adsorban olarak kullanılan zeolit ve bentonit malzemelerinin CO₂ tutumunda kullanılmak üzere bir adsorban olarak potansiyelini değerlendirmektir. Temin edilen zeolit ve bentonit adsorbanları geniş bir sıcaklık aralığında CO₂ tutumu için karakterize edilmiş ve CO₂ tutum çalışmaları yapılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan malzemeler olan Zeolit ve Bentonit Seydişehir/Konya bölgesinde Jeoloji mühendisleri tarafından yapılan arazi incelemelerinde elde edilmiş ve bu çalışmada kullanılmıştır.

2.2 Karakterizasyon

Temin edilen zeolit ve bentonit hiçbir işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. Kullanılan zeolit ve bentonitin parçacık boyutları “Malvern Instruments™ Mastersizer 2000e” model lazer kırınım yöntemini kullanan partikül boyut ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Cihaz ölçümleri saf su ortamında, 2700 dev/dk pervane hızında ve 5 ölçümün ortalamasını alarak gerçekleştirmektedir. Parçacık boyut ölçüm cihazı kullanılarak kullanılan zeolit numunelerinin parçacık boyutları 2,68 µm ve bentonit numunelerin parçacık boyutları 1,76 µm olarak elde edilmiştir. Ayrıca malzemelerin oksit içerikleri, eser element ve tutuşma değerlerindeki kayıp Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezinde bulunan PERKIN ELMER/ICP OES OPTİMA 2100 DV cihazı kullanılarak belirlenmiştir. X-Işını Floresan (XRF) spektrometresi, elementel ve kimyasal bileşimi belirlemek için kullanılan önemli cihazlardan biridir. Bu çalışmada ODTÜ merlab bünyesinde yer alan Rigaku ZSX Primus II cihazı ile zeolit ve bentonitin kimyasal analizi yapılmış ve Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Zeolit ve Bentonite ait XRF analizi

Numuneler	Bileşim (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO
Zeolit	57.4	15.7	1.7	5.5	6.7	3.5	3.8
Bentonit	61.3	16.8	3.1	2.7	2.3	1.4	3.9

Zeolit ve Bentonit malzemelerinin faz bileşenleri ve kristal yapıları X-Işını kırınımı (XRD) desenleri Bruker D8 Advance X-Işını difraktometresi ile 2°/dakika tarama hızında 2θ = 5-50° aralığında Cu-Kα radyasyonu (λ = 1.54060 Å) ve 40 kV'luk çalışma voltajına sahip XRD cihazı kullanılarak elde edilmiştir. IR absorpsiyon ölçümleri Perkin Elmer 1600 Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektrumları (FTIR) cihazı kullanılarak incelenmiştir. Ölçümler; 4000-400 cm⁻¹ aralığında, 4 cm⁻¹ spektral çözünürlük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zeolit ve bentonitin boyutları ve morfolojik özellikleri ise Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) kullanılarak belirlenmiş ve elementel

bileşimi belirlemek için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır. Bentonit ve zeolitlerin gözenekliliğini değerlendirmek için, numuneler ölçümlerden önce vakum altında 24 saat boyunca 120 °C’de degaz işlemine tabi tutulduktan sonra, 77 K’de Micromeritics Tristar II 3020 hızlandırılmış yüzey alanı ve porozimetri analizörü ile N₂ adsorpsiyon izotermi elde edilmiştir. Adsorpsiyon desorpsiyon izotermi BET (P/Po = 0.01-0.25), Langmuir (P/Po = 0.1-0.35) yüzey alanlarını, gözenek boyutlarını ve gözenek hacmi dahil olmak üzere gözenek parametrelerini elde etmek için kullanılmıştır.

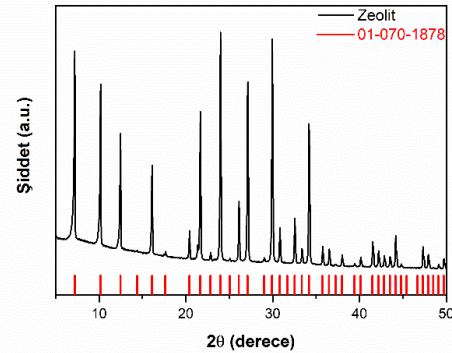
2.3 CO₂ tutumu

Zeolit ve Bentonit için düşük basınçlı CO₂ ve N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi 273 ve 298 K’de statik bir volümetrik sistem kullanılarak ölçülmüştür (Micromeritics Tristar II 3020). Adsorpsiyon ve desorpsiyon sırasında sıcaklık bir sirkülör kullanılarak sabit tutulmuştur. Adsorpsiyon ölçümlerinden önce numuneler 120 °C’de 24 saat süreyle kurutulmuştur. Numuneler, vakum (5×10⁻³ mmHg) altında 423 K’e kadar 1 K/dk ısıtma hızıyla sıcaklık artırılarak yerinde aktive edilmiş ve gaz tutum ölçümleri yapılmadan önce sıcaklık ve vakum 5 saat süreyle muhafaza edilmiştir. Tekrarlanabilirliği sağlamak için tüm adsorpsiyon-desorpsiyon deneyleri üç kez gerçekleştirilmiştir. Her üç deneyden elde edilen izoterm noktalarında gözle görülür bir farklılık bulunmamıştır.

3 Bulgular ve tartışma

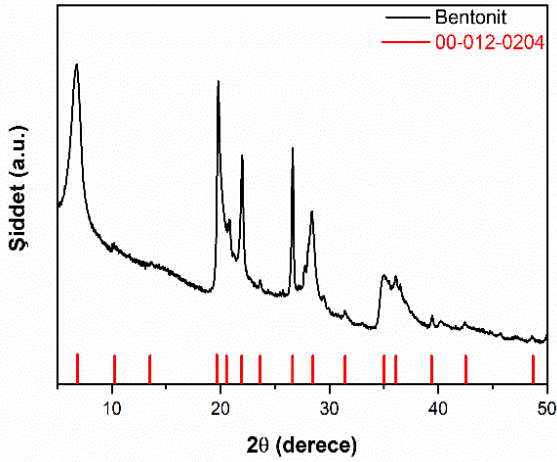
3.1 Yapısal analiz

Adsorbanların kristallığı XRD cihazı kullanılarak değerlendirilmiştir. Temin edilen zeolit ve bentonitin kırınım desenleri Şekil 1 ve 2’de gösterilmektedir. XRD desenindeki 7.2, 10.1, 12.4, 16.1, 21.6, 23.9, 26.9, 29.9 ve 34.2°’de keskin pikler zeolit kristal yapısını göstermektedir (Şekil 1). Zeolit için elde edilen kırınım deseni yapılan çalışmalarda zeolit XRD analizi ile uyumlu olduğu görülmüştür [32, 36, 38]. Ayrıca elde edilen kırınım pikleri incelendiğinde yüksek şiddetli piklerin kübik kristal yapısındaki zeolite ait 01-070-1878 kart numaralı JCPDS verileri ile oldukça örtüştüğü görülmektedir [39, 40]. Zeolit pikleri dışında herhangi bir pike rastlanılmamıştır. Bu da temin edilen malzemelerin yüksek saflıkta olduğunu göstermektedir.



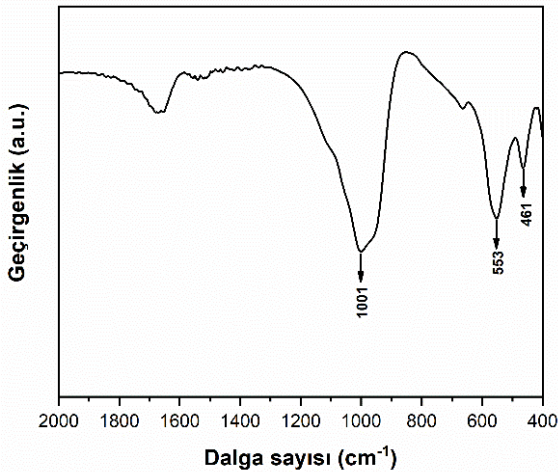
Şekil 1. Zeolit ait XRD kırınım deseni

Bentonite ait XRD kırınım deseni Şekil 2’de verilmiştir. Bentonite ait XRD kırınım deseninde $2\theta=6.7^\circ$, 19.7° , 21.9° ve 26.6° dört tepe noktası elde edilmiştir. Bu tepe noktaları incelendiğinde $2\theta=6.7^\circ$, 19.7° ve 26.6° kırınım pikleri montmorillonit mineraline ait kırınım desenini göstermektedir. $2\theta=21.9^\circ$ kırınım desenindeki pik kristobalitin (kuvarın bir polimorfu) yansımalarına karşılık gelmektedir. Bu yüksek şiddetteki XRD kırınım pikleri standart JCPDS dosyası (kart no.00-012-0204) ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür [32, 41, 42]. Ayrıca bentonitin mineralleri dışında farklı bir XRD kırınım pikine rastlanılmamıştır. Seydişehir/Konya bölgesinde temin edilen Zeolit ve bentonitin yüksek saflıkta olduğu görülmüştür.



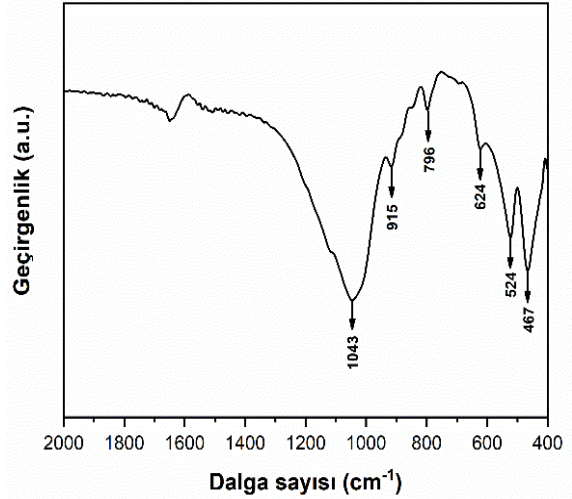
Şekil 2. Bentonite ait XRD kırınım deseni

Zeolit ve Bentonitin fonksiyonel gruplarını değerlendirmek için FTIR kullanılmıştır (Şekil 3 ve 4). Şekil 3’te verilen Zeolite ait FTIR spektrumunda $1000-1100\text{ cm}^{-1}$ ’deki karakteristik bant Si-O-Si yapısının Si-O gerilmesini göstermektedir. 461 ve 553 cm^{-1} ’deki karakteristik pikler ise sırasıyla tetrahedral yapıdaki Si-O veya Al-O eğilme, çift halka eğilmelerini göstermektedir. Elde edilen piklerin literatürde yapılan çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür [43, 44].



Şekil 3. Zeolit ait FT-IR spektrumu

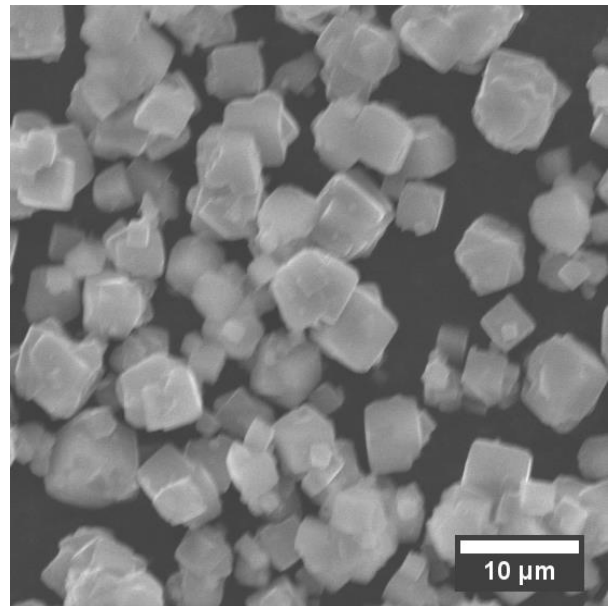
Bentonite ait adsorpsiyon bantları ve ilgili kimyasal fonksiyonel gruplar Şekil 4’te verilmiştir. 1001 , 915 ve 796 cm^{-1} ’deki pikler sırasıyla Si-O, Al-Al-OH ve Al-Mg-OH titreşimlerine karşılık gelmektedir. 524 ve 467 cm^{-1} ’deki bantlar sırasıyla Si-O-Si ve Al-O-Si eğilmelerini göstermektedir. 618 cm^{-1} ’deki bant, birleşik Al-O ve Si-O düzlem dışı titreşimlere karşılık geldiği görülmüştür. Spektrumda görülen titreşimlerin yapılan çalışmalar tarafından desteklendiği görülmektedir [45, 46].



Şekil 4. Bentonite ait FT-IR spektrumu

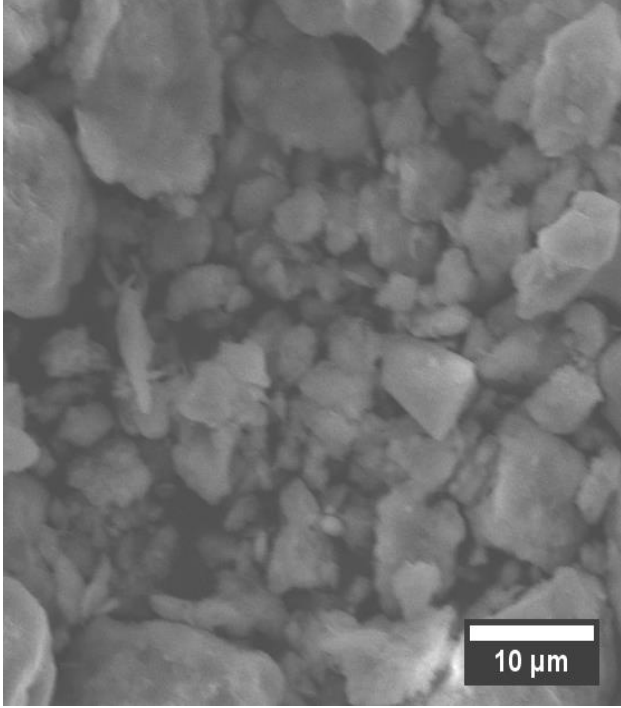
3.2 Morfolojik analiz

Zeolit ve bentonitin morfolojik özellikleri FESEM ile analiz edilmiş olup Şekil 5 ve 6’da verilmektedir. Zeolite ait FESEM analizi sonucu elde edilen görüntülerde homojen tanelere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 5). Tanelerin tetrahedral kristal yapısına sahip olduğu ve XRD sonucunu destekler niteliktedir.



Şekil 5. Zeolit ait FESEM görüntüsü

Bentonite ait FESEM görüntüleri Şekil 6’da verilmiştir. Yapılan incelemede Bentonitin irili ve ufaklı tanelere sahip bir kil mineralinden oluştuğu görülmüştür. Yapısının irili ve karmaşık istiflenmiş tanelerden oluştuğu ve tanelerin plaka benzeri yüzey morfolojilerinden meydana gelmiştir.



Şekil 6. Bentonite ait FESEM görüntüsü

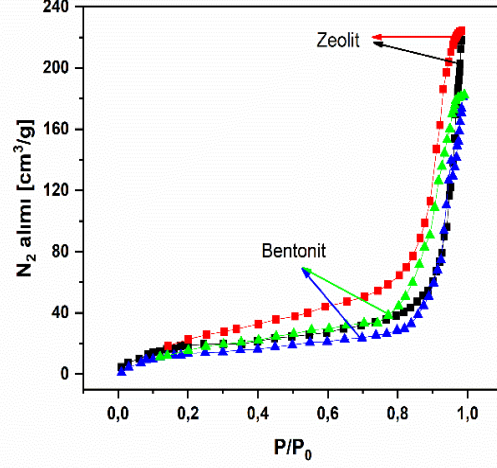
Tablo 2, EDS ile analiz edilen zeolit ve bentonit numunelerinin kimyasal bileşimini listelemektedir. Zeolit ve bentonitin kimyasal bileşimlerinin benzer şekilde silika ve alüminadan oluştuğu görülmektedir. Ayrıca EDS sonucu elde edilen verilerin XRF sonuçları ile tamamen örtüşmektedir. Zeolitin kimyasal yapısında bentonitten farklı olarak demir, magnezyum ve kalsiyum oksitinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Zeolit ve Bentonite ait SEM-EDX analizi

Numuneler	Elementel bileşim (Atomca %)						
	Si	Al	O	Na	Mg	Fe	Ca
Zeolit	10.7	8.6	71.6	7.8	0.7	0.1	0.2
Bentonit	19.5	4.2	72.6	2.1	1.1	-	0.4

Şekil 7’de gösterildiği gibi doğal zeolit ve bentonitin, gözenekli malzemelerinin tipik bir özelliği olan H₃ tipi histerezis döngüsüne sahip tip II N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izoterm özelliği göstermişlerdir. Bu histerezis döngüsü, mezogözeneklerde yoğunlaşmanın meydana geldiğini göstermektedir [47]. BET analizi yapılan numunelerin dokusal özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Doğal zeolitin BET yüzey alanının 125,23 m²/g olduğu ve doğal bentonitin ise 53,79 m²/g gibi düşük bir BET yüzey alanına

sahip olduğu görülmüştür. Bu durumun Şekil 3 ve 4’te verilen FESEM görüntülerinde yüksek BET yüzey alanına sahip Zeolitin tek tip parçacıklardan oluşmasıdır [4, 48].



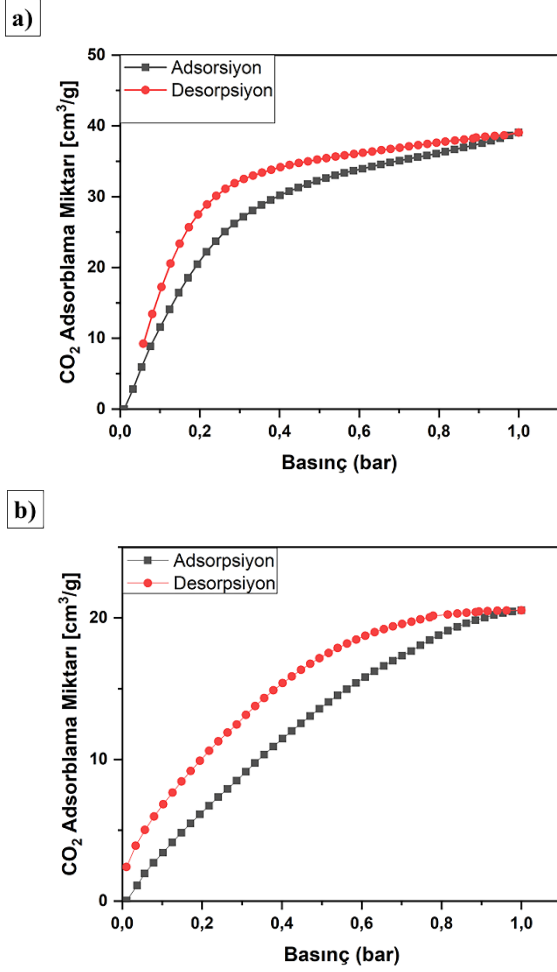
Şekil 7. Zeolit ve bentonite ait N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi

Tablo 3. Zeolit ve bentonit numunelerine ait dokusal özellikler

Parametreler	Numuneler	
	Doğal Zeolit	Doğal Bentonit
BET yüzey alanı (m ² /g)	125.23	53.79
Ortalama gözenek boyutu (nm)	3.27	12.81
Pore volume(cm ³ /g)	0.24	0.32

3.3 Zeolit ve Bentonite ait CO₂ tutum çalışması

Zeolit ve bentonite ait CO₂ adsorpsiyon izotermi Şekil 8’de görülmektedir. Doğal zeolit, 25 °C sıcaklıkta ve 1 bar basınç altında 38,7 mg/g CO₂ alımı sergilemiştir (Şekil 8(a)). Doğal bentonit tarafından 25 °C sıcaklıkta ve 1 bar basınç altında 20,53 mg/g CO₂ adsorbe edilmiştir. Zeolit tarafından adsorbe edilen yüksek CO₂ miktarı, CO₂’teki kalıcı kuadropollerle etkileşime giren ve boşluklarda yük dengeleyici katyonlara sahip gözenekli yapısına bağlanmaktadır [15]. Zeolitin bentonite göre daha yüksek CO₂ tutumu, Tablo 1 ve 2’de verilen daha yüksek Na⁺ iyonlarına ve Tablo 3’te verilen daha yüksek BET yüzey alanı/gözenek hacmine bağlanmıştır. CO₂ tutumunda kullanılan adsorbanların adsorpsiyon kapasiteleri incelendiğinde, bu çalışmadaki Zeolit ve Bentonit örneklerinin CO₂ yakalama kapasiteleri literatürde bildirilen diğer mezogözenekli adsorbanlara yakın ve bazılardan daha yüksek olduğu görülmektedir [19, 49-54]. Venaruzzo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bentonit clay mineralinin CO₂ tutum miktarı 3,78 mg/g olarak elde edilmiştir [53]. Xu ve arkadaşları polimer ile modifiye edilmiş zeolitin 77.6 mg/g CO₂ absorpladığını rapor etmişlerdir [55].



Şekil 8. 25 °C'deki CO₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermeleri; (a) Zeolit ve (b) Bentonit

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, CO₂'nin tutunumu ve CO₂ emisyonlarını azaltmak için alternatif yöntemlerden biri olan adsorpsiyon yöntemi ile doğal zeolit ve bentonit adsorbanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zeolit ve Bentonit malzemeleri herhangi bir işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır.

- Kullanılan zeolit ve bentonit adsorbanlarının sırasıyla, 125,23 ve 53,79 m²/g BET yüzey alanı ile oldukça kristal mikro gözenekli bir yapıya sahip oldukları görülmüştür.
- Yüksek yüzey alanına sahip zeolit malzemesi 38,7 mg/g CO₂ yakalama kapasitesi göstermiştir.
- Her iki adsorban malzeme de hızlı adsorpsiyon kinetiği ve kararlı CO₂ adsorpsiyon-desorpsiyon geri dönüşüm performansı göstermiştir.
- Zeolit ve bentonitin düşük maliyeti, yüksek bulunabilirliği ve yüksek CO₂ yakalama performansı gelecekte bu malzemelerin kimyasal malzemeler yerine kullanılabileceğini göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] T. H. Pham, B. K. Lee, J. Kim and C. H. Lee, Enhancement of CO₂ capture by using synthesized nano-zeolite, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 64, 220-226, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.04.026>.
- [2] G. Song, X. Zhu, R. Chen, Q. Liao, Y. D. Ding and L. Chen, An investigation of CO₂ adsorption kinetics on porous magnesium oxide, Chemical Engineering Journal, 283, 175-183, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.055>.
- [3] J. D. Figueroa, T. Fout, S. Plasynski, H. McIlvried and R. D. Srivastava, Advances in CO₂ capture technology—the US Department of Energy's Carbon Sequestration Program, International journal of greenhouse gas control, 2, 9-20, 2008. [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00094-1).
- [4] S. Cavenati, C. A. Grande and A. E. Rodrigues, Adsorption equilibrium of methane, carbon dioxide, and nitrogen on zeolite 13X at high pressures, Journal of Chemical & Engineering Data, 49, 1095-1101, 2004. <https://doi.org/10.1021/je0498917>.
- [5] R. S. Haszeldine, Carbon capture and storage: how green can black be?, Science, 325, 1647-1652, 2009. <https://doi.org/10.1126/science.1172246>.
- [6] S. Choi, J. H. Drese and C. W. Jones, Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources, ChemSusChem: Chemistry & Sustainability Energy & Materials, 2, 796-854, 2009. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900036>.
- [7] D. Ko, H. A. Patel and C. T. Yavuz, Synthesis of nanoporous 1, 2, 4-oxadiazole networks with high CO₂ capture capacity, Chemical Communications, 51, 2915-2917, 2015. <https://doi.org/10.1039/C4CC08649J>.
- [8] E. Díaz, E. Muñoz, A. Vega and S. Ordóñez, Enhancement of the CO₂ retention capacity of X zeolites by Na-and Cs-treatments, Chemosphere, 70, 1375-1382, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.09.034>.
- [9] E. Díaz, E. Munoz, A. Vega and S. Ordóñez, Enhancement of the CO₂ retention capacity of Y zeolites by Na and Cs treatments: effect of adsorption temperature and water treatment, Industrial & engineering chemistry research, 47, 412-418, 2008. <https://doi.org/10.1021/ie070685c>.
- [10] G. T. Rochelle, Amine scrubbing for CO₂ capture, Science, 325, 1652-1654, 2009. <https://doi.org/10.1126/science.117673>.
- [11] S. Zulfiqar, M. I. Sarwar and C. T. Yavuz, Melamine based porous organic amide polymers for CO₂ capture, RSC advances, 4, 52263-52269, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4RA11442F>.
- [12] H. A. Patel, F. Karadas, A. Canlier, J. Park, E. Deniz, Y. Jung, M. Atilhan and C. T. Yavuz, High capacity carbon dioxide adsorption by inexpensive covalent

- organic polymers, *Journal of Materials Chemistry*, 22, 8431-8437, 2012. <https://doi.org/10.1039/C2JM30761H>.
- [13] Z. Liang, M. Marshall and A. L. Chaffee, CO₂ adsorption-based separation by metal organic framework (Cu-BTC) versus zeolite (13X), *Energy & Fuels*, 23, 2785-2789, 2009. <https://doi.org/10.1021/ef800938e>.
- [14] J. Dunne, M. Rao, S. Sircar, R. Gorte and A. Myers, Calorimetric heats of adsorption and adsorption isotherms. 2. O₂, N₂, Ar, CO₂, CH₄, C₂H₆, and SF₆ on NaX, H-ZSM-5, and Na-ZSM-5 zeolites, *Langmuir*, 12, 5896-5904, 1996. <https://doi.org/10.1021/la960496r>.
- [15] S. T. Yang, J. Kim and W. S. Ahn, CO₂ adsorption over ion-exchanged zeolite beta with alkali and alkaline earth metal ions, *Microporous and Mesoporous Materials*, 135, 90-94, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.06.015>.
- [16] F. Banat, B. Al-Bashir, S. Al-Asheh, O. Hayajneh, Adsorption of phenol by bentonite, *Environmental pollution*, 107, 391-398, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00173-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00173-6).
- [17] G. Bereket, A. Z. Arog and M. Z. Özel, Removal of Pb (II), Cd (II), Cu (II), and Zn (II) from aqueous solutions by adsorption on bentonite, *Journal of Colloid and interface science*, 187, 338-343 (1997) <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.4537>.
- [18] R. J. Hook, An investigation of some sterically hindered amines as potential carbon dioxide scrubbing compounds, *Industrial & engineering chemistry research*, 36, 1779-1790, 1997. <https://doi.org/10.1021/ie9605589>.
- [19] C. Chen and W. S. Ahn, CO₂ capture using mesoporous alumina prepared by a sol-gel process, *Chemical Engineering Journal*, 166, 646-651, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.038>.
- [20] C. A. Trickett, A. Helal, B. A. Al-Maythalony, Z. H. Yamani, K. E. Cordova and O. M. Yaghi, The chemistry of metal-organic frameworks for CO₂ capture, regeneration and conversion, *Nature Reviews Materials*, 2, 1-16, 2017. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.45>.
- [21] M. Ding, R. W. Flaig, H. L. Jiang and O. M. Yaghi, Carbon capture and conversion using metal-organic frameworks and MOF-based materials, *Chemical Society Reviews*, 48, 2783-2828, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8CS00829A>.
- [22] M. S. Atas, S. Dursun, H. Akyildiz, M. Citir, C. T. Yavuz and M. S. Yavuz, Selective removal of cationic micro-pollutants using disulfide-linked network structures, *RSC advances*, 7, 25969-25977, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7RA04775D>.
- [23] G. P. Hao, W. C. Li, D. Qian and A. H. Lu, Rapid synthesis of nitrogen-doped porous carbon monolith for CO₂ capture, *Advanced materials*, 22, 853-857, 2010. <https://doi.org/10.1002/adma.200903765>.
- [24] O. A. Yildirim and M. S. Atas, Synthesis and characterization of spherical FeNi₃ metallic nanoparticles based on sodium dodecyl sulfate, *Journal of Materials and Manufacturing*, 1, 33-40, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7472367>.
- [25] M. Ş. Atas and Ö. A. Yildirim, Ni-FeNi₃-Fe₃O₄ metalik nanoalaşimların hidrotermal yöntemle sentezi ve karakterizasyonu, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10, 965-975, 2022. <https://doi.org/10.36306/konjes.1148331>.
- [26] M. A. Topçu, Production and characterization of zinc oxide nanofibers derived from waste material as precursor, *Process Safety and Environmental Protection*, 175, 150-159, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.05.035>.
- [27] S. Yang, L. Zhan, X. Xu, Y. Wang, L. Ling and X. Feng, Graphene-based porous silica sheets impregnated with polyethyleneimine for superior CO₂ capture, *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 25, 2130-2134, 2013. <https://doi.org/10.1002/adma.201204427>.
- [28] A. Kaya and S. Durukan, Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner, *Applied Clay Science*, 25, 83-91, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.07.002>.
- [29] M. Trckova, L. Matlova, L. Dvorska and I. Pavlik, Kaolin, bentonite, and zeolites as feed supplements for animals: health advantages and risks, *Veterinární Medicína*, 49, 389-399, 2004. <https://doi.org/10.17221/5728-VETMED>.
- [30] S. Ghaffari, M. F. Gutierrez, A. Seidel-Morgenstern, H. Lorenz and P. Schulze, Sodium Hydroxide-Based CO₂ Direct Air Capture for Soda Ash Production—Fundamentals for Process Engineering, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62, 7566-7579, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00357>.
- [31] S. Kumar, R. Srivastava and J. Koh, Utilization of zeolites as CO₂ capturing agents: Advances and future perspectives, *Journal of CO₂ Utilization*, 41, 101251, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101251>.
- [32] C. Chen, D. W. Park and W. S. Ahn, CO₂ capture using zeolite 13X prepared from bentonite, *Applied Surface Science*, 292, 63-67, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.064>.
- [33] F. Wang, C. Gunathilake and M. Jaroniec, Development of mesoporous magnesium oxide-alumina composites for CO₂ capture, *Journal of CO₂ Utilization*, 13, 114-118, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.11.001>.
- [34] Y. Xia, R. Mokaya, G. S. Walker and Y. Zhu, Superior CO₂ adsorption capacity on N-doped, high-surface-area, microporous carbons templated from zeolite, *Advanced Energy Materials*, 1, 678-683, 2011. <https://doi.org/10.1002/aenm.201100061>.
- [35] V. Garshasbi, M. Jahangiri and M. Anbia, Equilibrium CO₂ adsorption on zeolite 13X prepared from natural clays, *Applied Surface Science*, 393, 225-233, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.161>.
- [36] H. Aysan, S. Edebalı, C. Ozdemir, M. Celik Karakaya and N. Karakaya, Use of chabazite, a naturally abundant zeolite, for the investigation of the adsorption

- kinetics and mechanism of methylene blue dye, *Microporous and Mesoporous Materials*, 235, 78-86, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.08.007>.
- [37] L. Cao, Z. Li, S. Xiang, Z. Huang, R. Ruan and Y. Liu, Preparation and characteristics of bentonite-zeolite adsorbent and its application in swine wastewater, *Bioresource Technology*, 284, 448-455, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.043>.
- [38] P. Murge, S. Dinda and S. Roy, Zeolite-Based Sorbent for CO₂ Capture: Preparation and Performance Evaluation, *Langmuir*, 35, 14751-14760, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b02259>.
- [39] N. Kuanchertchoo, R. Suwanpreedee, S. Kulprathipanja, P. Aungkavattana, D. Atong, K. Hemra, T. Rirksomboon and S. Wongkasemjit, Effects of synthesis parameters on zeolite membrane formation and performance by microwave technique, *Applied Organometallic Chemistry*, 21, 841-848, 2007. <https://doi.org/10.1002/aoc.1295>.
- [40] R. Vinodh, C. Deviprasath, C. V. M. Gopi, V. G. R. Kummara, R. Atchudan, T. Ahamad, H. J. Kim and M. Yi, Novel 13X Zeolite/PANI electrocatalyst for hydrogen and oxygen evolution reaction, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 28337-28349, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.194>.
- [41] R. S. Hebbar, A. M. Isloor, B. Prabhu, Inamuddin, A. M. Asiri and A. Ismail, Removal of metal ions and humic acids through polyetherimide membrane with grafted bentonite clay, *Scientific reports*, 8, 4665, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22837-1>.
- [42] M. A. Salam, M. R. Abukhadra and A. Adlii, Insight into the adsorption and photocatalytic behaviors of an organo-bentonite/Co₃O₄ green nanocomposite for malachite green synthetic dye and Cr (VI) metal ions: application and mechanisms, *ACS omega*, 5, 2766, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03411>.
- [43] E. Z. M. Tarmizi, H. Baqiah, Z. A. Talib and H. M. Kamari, Preparation and physical properties of polypyrrole/zeolite composites, *Results in Physics*, 11, 793-800, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.09.043>.
- [44] W. Wang, Q. Feng, K. Liu, G. Zhang, J. Liu and Y. Huang, A novel magnetic 4A zeolite adsorbent synthesised from kaolinite type pyrite cinder (KTPC), *Solid State Sciences*, 39, 52-58, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2014.11.012>.
- [45] A. Kassim, H. E. Mahmud and F. Adzmi, Polypyrrole-montmorillonite clay composites: an organic semiconductor, *Materials science in semiconductor processing*, 10, 246-251, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2008.02.001>.
- [46] J. Kim, F. Liu, H. Choi, S. Hong and J. Joo, Intercalated polypyrrole/Na⁺-montmorillonite nanocomposite via an inverted emulsion pathway method, *Polymer*, 44, 289-293, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00749-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00749-8).
- [47] C. Chen, W. J. Son, K. S. You, J. W. Ahn and W. S. Ahn, Carbon dioxide capture using amine-impregnated HMS having textural mesoporosity, *Chemical Engineering Journal*, 161, 46-52, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.04.019>.
- [48] Z. Zhang, W. Zhang, X. Chen, Q. Xia and Z. Li, Adsorption of CO₂ on zeolite 13X and activated carbon with higher surface area, *Separation Science and Technology*, 45, 710-719, 2010. <https://doi.org/10.1080/01496390903571192>.
- [49] X. Xu, C. Song, J. M. Andrésen, B.G. Miller and A.W. Scaroni, Preparation and characterization of novel CO₂ “molecular basket” adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM-41, *Microporous and mesoporous materials*, 62, 29-45, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(03\)00388-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00388-3).
- [50] C. Chen, J. Kim, D. A. Yang and W. S. Ahn, Carbon dioxide adsorption over zeolite-like metal organic frameworks (ZMOFs) having a sod topology: Structure and ion-exchange effect, *Chemical Engineering Journal*, 168, 1134-1139, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.096>.
- [51] C. M. Lu, J. Liu, K. Xiao and A. T. Harris, Microwave enhanced synthesis of MOF-5 and its CO₂ capture ability at moderate temperatures across multiple capture and release cycles, *Chemical Engineering Journal*, 156, 465-470, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.067>.
- [52] L. Zhao, Z. Bacsik, N. Hedin, W. Wei, Y. Sun, M. Antonietti and M.M. Titirici, Carbon dioxide capture on Amine-Rich carbonaceous materials derived from glucose, *ChemSusChem*, 3, 840-845, 2010. <https://doi.org/10.1002/cssc.201000044>.
- [53] J. Venaruzzo, C. Volzone, M. Rueda and J. Ortega, Modified bentonitic clay minerals as adsorbents of CO, CO₂ and SO₂ gases, *Microporous and Mesoporous Materials*, 56, 73-80, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(02\)00443-2](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(02)00443-2).
- [54] V. Zelenák, M. Badaničová, D. Halamová, J. Čejka, A. Zukal, N. Murafa and G. Goerigk, Amine-modified ordered mesoporous silica: Effect of pore size on carbon dioxide capture, *Chemical Engineering Journal*, 144, 336-342, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.025>.
- [55] X. Xu, C. Song, J. M. Andrésen, B. G. Miller and A. W. Scaroni, Preparation and characterization of novel CO₂ “molecular basket” adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM-41, *Microporous and Mesoporous Materials*, 62, 29-45, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(03\)00388-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00388-3).

