

Atık Portakal Kabuklarıyla Baskılı Devre Kartlarından Paladyum Adsorpsiyonu

Aysun ÖZKAN*¹, Zerrin GÜNKAYA¹, Ece YAPICI¹, Müfide BANAR¹

¹Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir

(Alınış / Received: 12.12.2016, Kabul / Accepted: 22.05.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 13.06.2017)

Anahtar Kelimeler

Baskılı devre kartı,
Biyosorpsiyon,
Elektronik atık,
Paladyum,
Portakal kabuğu

Özet: Türkiye’de bir yılda ortaya çıkan 539.000 ton elektronik atığın %3,1’ini Baskılı Devre Kartları (BDK) oluşturmaktadır. BDK yapımında, rezervleri sınırlı olan ve elde edilmeleri için büyük yatırımlar gerektiren değerli metaller kullanılmaktadır. Bu çalışmada, BDK’ların içinde yaklaşık %0,01 oranında bulunan paladyumun (Pd) biyosorbentle adsorpsiyonu hedeflenmiştir. Biyosorbent olarak, ülkemizde büyük miktarda açığa çıkan ve sadece hayvan yemi olarak kullanılan bir organik atık türü olan portakal kabukları kullanılmıştır. Çalışmada; öncelikle model çözeltilerde, farklı yöntemlerle modifiye edilmiş/edilmemiş portakal kabuklarıyla farklı koşullarda (pH, biyosorbent miktarı, sıcaklık,) adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve en uygun adsorpsiyon koşulları belirlenmiştir. Paladyum adsorpsiyonunun, izoterm çalışmalarında BET izotermine ($R^2=0,9798$), kinetik çalışmalarda ise, yalancı ikinci derece modele uygun olduğu belirlenmiştir ($R^2: 0,9995$). Diğer yandan, atık BDK’lar piroliz edilmiş ve katı ürün elde edilmiştir. Son aşamada ise, katı ürün liç edilmiş ve bu liç çözeltisinde en uygun koşullarda adsorpsiyon gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda %75 oranında Pd tutulmuştur.

Palladium Adsorption from Printed Circuit Boards with Waste Orange Peels

Keywords

Biosorption,
Orange peel,
Palladium,
Printed circuit board,
Waste electronic equipment

Abstract: In Turkey, 539,000 tonnes of waste electronics are generated each year and 3.1% of them are printed circuit boards (PCBs). PCB production needs to use of some precious metals which have limited reserves and requires sizeable investment to obtain. In this study, it was aimed to adsorption of palladium which is 0.01% in PCBs. Orange peels, which is an organic waste that occurs in high quantity and can only be used animal feed, were used as the biosorbent. In the study, adsorption tests on the model solutions at different conditions (pH, amount of biosorbent, temperature) were carried out by modified with different methods/unmodified orange peels and best adsorption conditions were determined. Palladium adsorption were found appropriate to BET isotherm ($R^2=0.9798$) and pseudo second order model ($R^2: 0.9995$) for isotherm and kinetic studies, respectively. Simultaneously, waste PCB was pyrolyzed and a solid product was obtained. At the last stage, biosorption studies on leach solution of solid product obtained from PCB pyrolysis were carried out by using the best biosorbent which were defined by the adsorption results of the model solutions. In a result, palladium from PCB was adsorbed with 75% efficiency.

1. Giriş

Teknolojinin sürekli gelişimi ile birlikte elektrikli-elektronik eşya (EEE) sektöründeki ürün çeşidi her geçen gün artmakta, tüketicinin talebine bağlı olarak kullanım süreleri de kısalmaktadır. EEE kullanımındaki sirkülasyonun artmasının bir sonucu olarak da, büyük miktarlarda atık elektrikli ve elektronik eşya (AEEE) oluşmaktadır. AEEE’lerin %3,1’lik bir kısmını baskılı devre kartları (BDK)

oluşturmaktadır [1]. BDK, iletken olmayan bir yüzeye lamine edilmiş bakır levhalar ile kazanmış iletken yolları, iz ve işaretleri kullanarak parçalar arasında mekanik destek ve elektriksel bağ sağlayan elektronik parçalardır. BDK’lar neredeyse tüm elektronik cihazların ana parçası olup, elektronik endüstrisinde devrim yaratmışlardır. BDK’lar, yarı iletken çipler ve kapasitörler gibi mikroelektronik bileşenler üzerine monte edilmiş platformlardır [2]. BDK’larda ağırlıkça %18,448 bakır (Cu), %0,156

*İlgili yazar: aysunozkan@anadolu.edu.tr

gümüş (Ag), %0,039 altın (Au) ve %0,009 paladyum (Pd) bulunmaktadır. Aynı miktarda BDK ve maden cevheri karşılaştırıldığında, BDK'lardan geri kazanılacak metal miktarının cevherden hazırlanacak olan miktardan 100 kat daha fazla olduğu bilinmektedir [3].

Bu çalışmanın konusu olan paladyum, 1803'te Wollatson tarafından rodyumla birlikte keşfedilmiş olup, hafif platin grubu metalidir. Gümüş ve bakır alaşımları ısıtıldıklarında sertleştiklerinden dişçilikte kullanılırken; altın ve platinle yaptığı alaşımları yumuşaktır [4].

Literatürde paladyumun BDK'lardan geri kazanılması için pirometalurjik [5], hidrometalurjik [3, 6-9] ve biyometalurjik yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [10-12]. Literatürde yer alan, atık kağıdın, özüm atıklarının ve fenol ile odun lignininin çapraz bağlanmasıyla elde edilen lignofenolün adsorban olarak kullanıldığı biyometalurjik yöntemlerden farklı olarak bu çalışmada, biyosorbent olarak atık portakal kabukları kullanılmıştır. Atık portakal kabuklarının dört farklı yöntemle modifiye edilmesiyle elde edilen biyosorbent türevleri ile Pd adsorpsiyonu üzerine çalışmalar yapılmış ve en uygun koşullar belirlenmiştir. Literatürde elektronik atıkların piroliz edildiği farklı çalışmalarda [13-16] metal geri kazanımının piroliz sonucu elde edilen katı üründe daha etkin olacağı belirtilmesi sebebiyle, BDK piroliz edilerek katı ürün elde edilmiş ve katı üründeki Pd liç edilerek çözeltilere çekilmiştir. Son olarak, belirlenen en uygun adsorpsiyon koşullarında liç çözeltilerinden Pd adsorpsiyonu gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma; biyosorbent eldesi, biyosorbent modifikasyonu, adsorpsiyon çalışmaları ve model çözeltilerden elde edilen en iyi koşulların atık BDK'lara uygulanması olmak üzere 4 aşamada gerçekleştirilmiştir [17].

2.1. Biyosorbent eldesi

Biyosorbent olarak kullanılmak üzere, öncelikle atık portakal kabukları kirlerin ve çözünür maddelerin giderilmesi amacıyla saf suyla yıkandıktan sonra, 55°C'de etüvde kurutulup öğütülmüştür. Öğütülen portakal kabuklarının 0,5 mm'lik elekten geçirilmesiyle elde edilen toz halindeki portakal kabuklarının (PK) bir kısmı daha sonra kullanılmak üzere desikatörde saklanmış, diğer bir kısmı ise bir sonraki işlem olan modifikasyona tabi tutulmuştur.

2.2. Biyosorbent modifikasyonu

Elde edilen biyosorbent (PK); saponifikasyon, çapraz bağlanma, hidroksipropilasyon ve asidifikasyon olmak üzere dört farklı yöntemle modifiye edilmiştir.

Saponifikasyon işleminde, 0,1 M'lık 100 mL sodyum hidroksit çözeltisi ile 10 g PK 2 saat süreyle karıştırılmıştır. Karışım saf suyla yıkayıp filtrelendikten sonra etüvde kurutularak PK-S elde edilmiştir.

Çapraz bağlanma işleminde ise, 10 g PK 100 mL saf su ile karıştırıldıktan sonra 0,2 g sodyumtrimetafosfat ve 0,5 g sodyumtripolifosfat eklenerek 40°C'de 2 saat karıştırılmıştır. Karışım filtrelenip saf suyla yıkandıktan sonra etüvde kurutularak PK-C elde edilmiştir.

Hidroksipropilasyon işleminde; 1,5 g sodyum sülfat 100 mL saf suda çözüldükten sonra 10 g PK eklenerek, sodyum hidroksit çözeltisiyle pH 10,5'e ayarlanmıştır. Karışıma 1 mL propilen oksit eklenerek 40°C'de 24 saat karıştırılmıştır. Karışım saf suyla yıkayıp filtrelendikten sonra etüvde kurutularak PK-H elde edilmiştir.

Asidifikasyon işleminde, 0,1 M'lık 100 mL sitrik asit çözeltisi ile 10 g PK 2 saat süreyle karıştırılmıştır. Karışım saf suyla yıkayıp filtrelendikten sonra etüvde kurutularak PK-A elde edilmiştir.

2.3. Adsorpsiyon çalışmaları

Adsorpsiyon çalışmaları öncelikle farklı iki pH ve biyosorbent miktarı için gerçekleştirilmiştir. Bunun için analitik saflıktaki Pd çözeltisinden 10 mg/L'lik çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözeltide sıcaklık ve biyosorbent türü sabit tutularak (25°C, PK) pH 2 ve 5 koşullarında, 2 g ve 5 g biyosorbent miktarları ile 150 rpm karıştırma hızında 120 dk süre ile adsorpsiyon gerçekleştirilmiştir. Belirli aralıklarla örnek alınıp analiz edilmiş ve en uygun pH koşulu belirlenmiştir. pH ve biyosorbent miktarı için uygun koşullar belirlendikten sonra, hazırlanan 500 mL model çözeltilere 5'er g PK, PK-S, PK-C, PK-H ve PK-A konulmuş ve her bir biyosorbent için 25°C, 40°C ve 60°C olacak şekilde üç farklı sıcaklıkta çalışılmıştır. Adsorpsiyon 2 saat boyunca 150 rpm karıştırma hızıyla devam etmiş, belirli aralıklarla 15'er mL'lik örnekler alınmış, filtre edilerek analiz edilmiştir.

Filtre edilen örneklerdeki Pd derişimleri ve adsorplanan miktarlar belirlenmiştir.

İzoterm çalışmalarında; adsorpsiyon dengesi sonuçlarına göre, 50'er mL 10 mg/L'lik Pd çözeltisine 60°C'de farklı miktarlarda PK (0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,35) eklenmiş ve beherlerin ağızları kapatılarak manyetik karıştırıcıda 2 saat süreyle karıştırılmıştır. İki saat sonra alınan örnekler analiz edilmiştir.

Adsorpsiyon çalışmalarında alınan tüm örneklerdeki Pd derişimleri Varian marka ICP-OES cihazıyla belirlenmiştir.

İzoterm çalışmalarında elde edilen veriler kullanılarak Langmuir, Freundlich ve BET izotermine uygunluklar araştırılmıştır.

Langmuir izotermi 1 eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (1)$$

q_e : Adsorbanın denge anında adsorplanan miktarı (mg/g)

C_e : Adsorbanın denge anındaki derişimi (mg/L)

q_{\max} : Adsorbentin maksimum adsorplama kapasitesi (mg/g)

K_L : Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg)

Freundlich izotermi 2 eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2)$$

K_F : Freundlich sabiti (L/g)

$1/n$: Heterojenlik faktörü

BET izotermi 3 eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$\frac{C_e}{q_e(C_s - C_e)} = \frac{1}{q_{\max} C_{BET}} + \frac{(C_{BET} - 1)}{q_{\max} C_{BET}} \left(\frac{C_e}{C_s} \right) \quad (3)$$

C_s : Çözeltinin doygunluk derişimi

C_{BET} : Enerji sabiti

Adsorpsiyon kinetiğinin değerlendirilmesi amacıyla yalancı birinci derece (pseudo first), yalancı ikinci derece (pseudo second) ve difüzyon modelleri kullanılmıştır.

Yalancı birinci derece modeli, eşitlik 4'te ifade edilmiştir.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2,303} \quad (4)$$

Yalancı ikinci derece modeli, eşitlik 5'te ifade edilmiştir.

$$q_t = \frac{1}{k_2 q^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (5)$$

Difüzyon modeli eşitlik 6'da ifade edilmiştir.

$$q_t = k_d t^{1/2} + C \quad (6)$$

q_e : Adsorbanın denge anında adsorplanan miktarı (mg/g)

q_t : Adsorbanın t anında adsorplanan miktarı (mg/g)

k_1 : Hız sabiti (dk^{-1})

k_2 : Hız sabiti ($g/mg.dk$)

k_d : Difüzyon hız sabiti ($mg/g^{-1}dk^{-1/2}$)

DeneySEL verilere göre termodinamik parametreler (ΔG , ΔS , ΔH) hesaplanmış ve adsorpsiyonun kendiliğinden gerçekleşip gerçekleşmediği

belirlenmiştir. Adsorpsiyon termodinamiği 7, 8 ve 9 eşitliklerinde ifade edilmektedir.

$$K_C = \frac{C_{Ae}}{C_{Se}} \quad (7)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_C \quad (8)$$

$$\ln K_C = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (9)$$

K_C : Denge sabiti

C_{Ae} : Denge anında adsorplanan maddenin derişimi (mg/L)

C_{Se} : Denge anında çözelti ortamında kalan maddenin derişimi (mg/L)

ΔG^0 : Standart Gibbs serbest enerjisi

ΔH^0 : Standart entalpi

ΔS^0 : Standart entropi

R: Gaz sabiti (8,31 J/mol.K)

2.4. Model çözeltilerde belirlenen en iyi koşulların atık BDK'lara uygulanması

Bir geri dönüşüm firmasından temin edilen parçalanmış atık BDK'lar öncelikle piroliz edilmiştir. Piroliz deneyleri, atmosferik basınç altında 500 °C sıcaklık ve 30 °C/dk ısıtma hızında sabit yataklı paslanmaz çelik 240 cm³ hacimli Heinze tipi reaktörde 30 dk boyunca gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Her piroliz işleminden önce sistem içindeki hava azot gazı ile süpürülmüştür.



Şekil 1. Piroliz sistemi

Bu aşamada, öncelikle piroliz sonucu elde edilen BDK katı ürününün 5 g'ı ile 50 mL kral suyu (HNO₃:HCl; 1:3) ve hidrojen peroksit karıştırılarak liç çözeltisi hazırlanmıştır. Piroliz sonucu elde edilen BDK katı ürününün 5 g'ı ile 50 mL Liç çözeltisindeki Pd derişimi ICP-OES ile belirlenmiştir. Katı üründeki metaller tamamen çözüldükten sonra, liç çözeltisinden alınan 5 mL örneğin 100 kat seyreltilmesiyle elde edilen 500 mL'lik çözelti ile yapılan çalışmalarda, 60°C'de 5 g PK ile Pd adsorpsiyonu gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

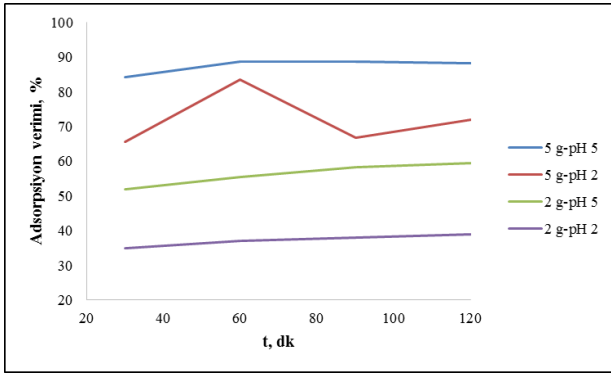
3.1. Adsorpsiyon dengesi sonuçları

Hazırlanan model çözeltilerde gerçekleştirilen adsorpsiyonlarda; pH (2 ve 5) ve biyosorbent miktarı (2 g ve 5 g) için ön denemeler yapıldıktan sonra

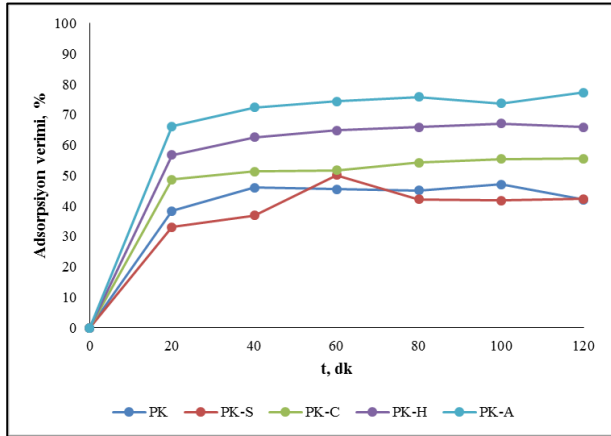
uygun pH'nın 5 ve biyosorbent miktarının da 5 g olduğuna karar verilmiştir (Şekil 2). PK, PK-S, PK-C, PK-H ve PK-A ile 25°C, 40°C ve 60°C'de gerçekleştirilen 2 saatlik adsorpsiyonla elde edilen giderim verimleri (%) sırasıyla Şekil 3-5'deki grafiklerde gösterilmiştir. Bu grafiklerden en yüksek adsorpsiyon verimlerine (% 92,77) ulaşılan en uygun sıcaklık ve en iyi biyosorbentin 60°C ve PK olduğu görülmektedir.

3.2. Adsorpsiyon izotermi sonuçları

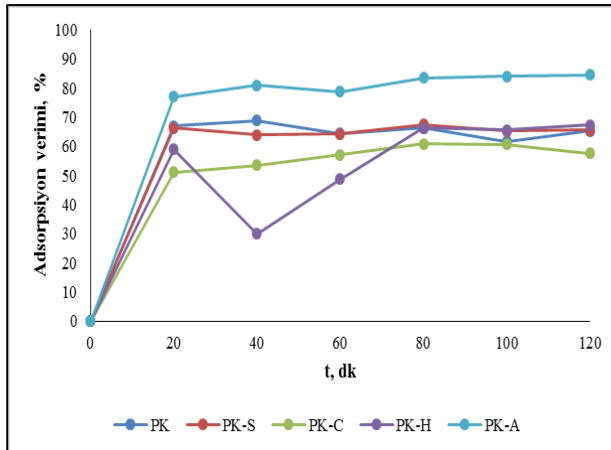
izoterm çalışmalarından elde edilen veriler doğrultusunda çizilen grafikler Şekil 6-8'de verilmiştir. Grafiklere göre, adsorpsiyonun BET modeline uygun olduğu görülmüştür ($R^2=0,9798$).



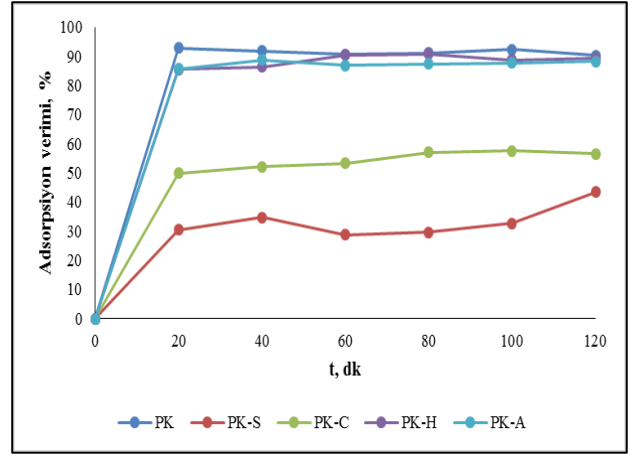
Şekil 2. Pd Adsorpsiyon denemeleri



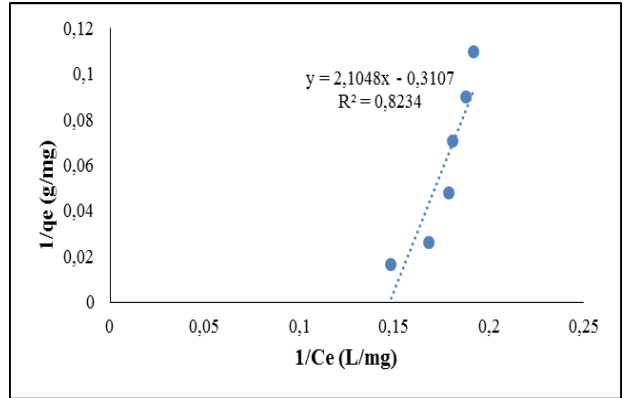
Şekil 3. 25°C'de Pd adsorpsiyonu verimi



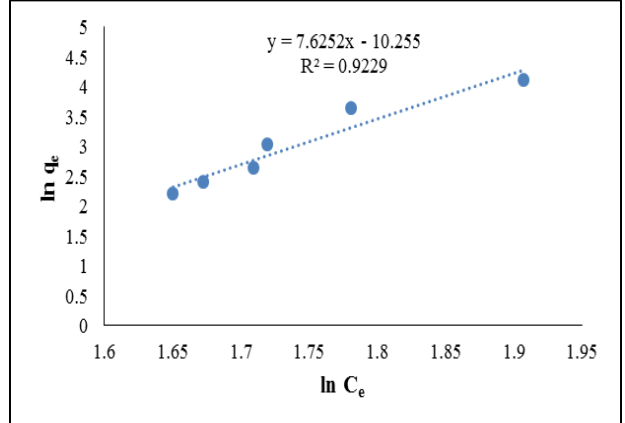
Şekil 4. 40°C'de Pd adsorpsiyonu verimi



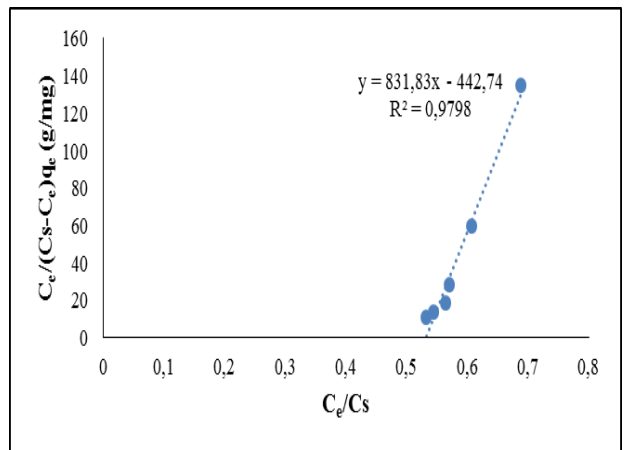
Şekil 5. 60°C'de Pd adsorpsiyonu verimi



Şekil 6. Langmuir izotermi



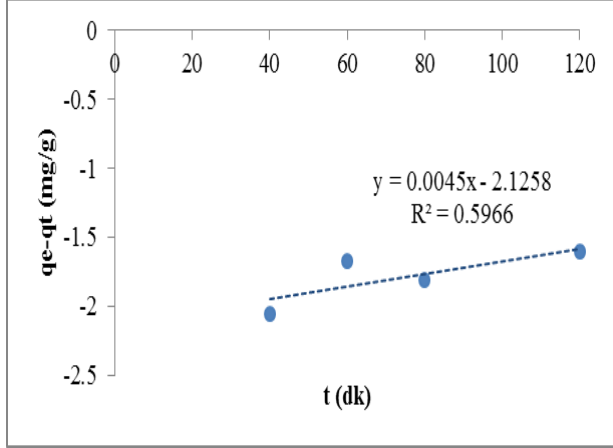
Şekil 7. Freundlich izotermi



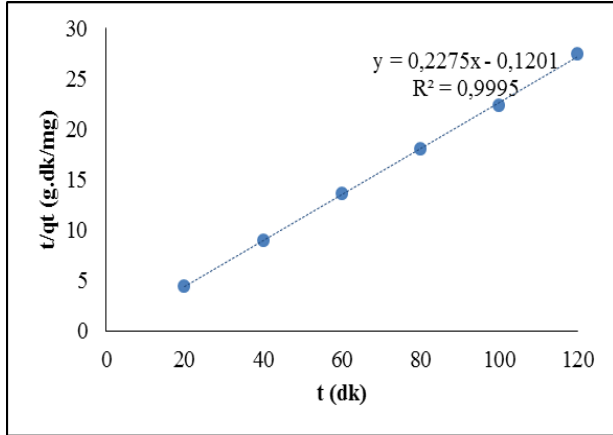
Şekil 8. BET izotermi

3.3. Adsorpsiyon kinetiği sonuçları

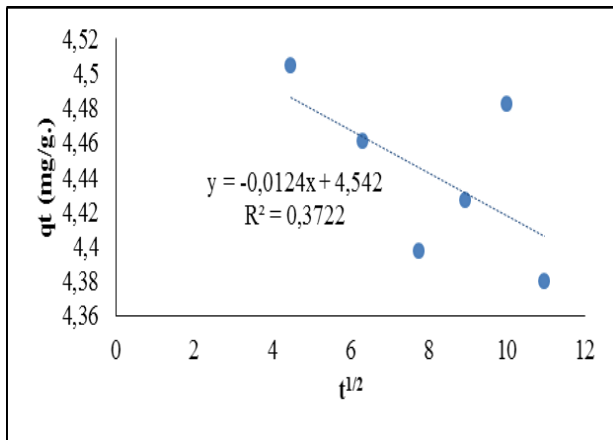
Adsorpsiyon kinetiğinin belirlenmesi amacıyla yalancı birinci derece (pseudo first), yalancı ikinci derece (pseudo second) ve difüzyon modellerinden yola çıkarak çizilen kinetik model grafikleri Şekil 9-11'de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi adsorpsiyon, yalancı ikinci dereceden kinetik modele uygunluk göstermiştir ($R^2: 0,9995$).



Şekil 9. Yalancı birinci derece kinetik modeli



Şekil 10. Yalancı ikinci derece kinetik modeli



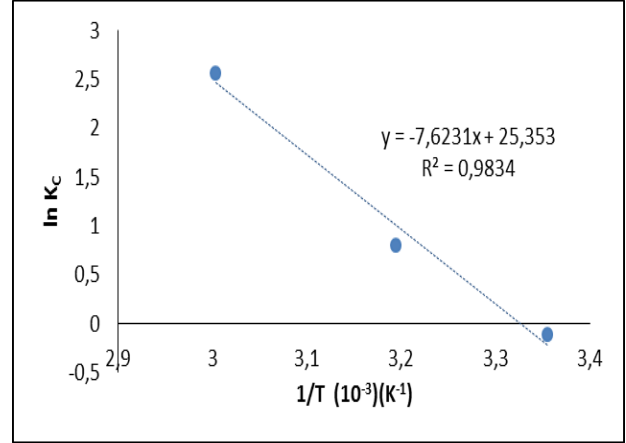
Şekil 11. Difüzyon kinetik modeli

3.4. Adsorpsiyon termodinamiği sonuçları

DeneySEL verilere göre termodinamik parametreler (ΔG , ΔS , ΔH) hesaplanmış ve adsorpsiyonun

kendiliğinden gerçekleşip gerçekleşmediği belirlenmiştir. Şekil 12'de verilen grafikteki K_c ve $1/T$ değerleri arasındaki matematiksel ilişkiye göre ΔG^0 , ΔH^0 ve ΔS^0 hesaplanmış ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'e bakıldığında ΔG^0 serbest enerjisinin 25°C 'de pozitif olduğu görülmektedir. Buna göre diğer adsorpsiyonlar kendiliğinden gerçekleşirken, 25°C 'deki Pd adsorpsiyonu kendiliğinden gerçekleşmemektedir. ΔH^0 değerlerine bakıldığında; Pd adsorpsiyonunun ekzotermik olduğunu göstermektedir. ΔS^0 değerinin pozitif olması ise, adsorpsiyonda düzensizliğin arttığının göstergesidir.



Şekil 12. Pd Adsorpsiyon Termodinamiği

Tablo 1. Termodinamik Parametreler

Sıcaklık	K_c	ΔG^0 (kJ/mol)	ΔH^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (kJ/mol)
25°C	0,888	0,293	-63,348	210,68
40°C	2,216	-1,971		
60°C	12,839	-6,320		

3.5. BDK'lardan metal adsorpsiyonu sonuçları

Liç çözeltilisindeki Pd derişimi %0,009 olarak bulunmuştur. Adsorpsiyon çalışmalarının 2. saati sonunda örnek alınarak ICP'de analiz edilmiş ve $75 \pm 4,5$ Pd adsorpsiyonu gerçekleştirildiği belirlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Teknolojinin hızla ilerlemesi sebebiyle yeni ürünlerin üretimi arttıkça, elektrikli ve elektronik cihazlar daha uzun süre kullanılmamakta ve atık haline gelmektedir. Bu cihazlar her ne kadar atık olarak kabul edilse de, tekrar kullanılabilirleri veya geri kazanılabilirleri mümkün olup aslında önemli birer ikincil hammadde kaynağıdır. Türkiye'de her yıl oluşan ortalama 539.000 ton elektronik atığın, düzenli/düzensiz depolama sahalarına gönderilmeleri veya yakma yoluyla bertaraf edilmeleri yerine geri kazanım/geri dönüşümünün sağlanması ekonomik ve çevresel açıdan oldukça önemlidir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen bu çalışmada elektronik atıklarda bulunan

BDK'lardan yine bir atık türü olan portakal kabuğu biyosorbenti ile paladyum adsorpsiyonu üzerine çalışılmıştır. Modifiye edilmiş/edilmemiş beş biyosorbent ile model çözeltilerde gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmalarında; denge süresi, uygun pH ve sıcaklıklar belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda; model çözeltilerden Pd adsorpsiyonunda 10 g/L PK ile pH 5 ve 60°C'de % 92,77 tutunma verim sağlanırken; sistemlerin 10-30 dk gibi kısa sürelerde dengeye geldiği görülmüştür. Model çözeltilerle gerçekleştirilen adsorpsiyonlar ile belirlenen en uygun koşullar atık BDK üzerinde uygulanmak üzere 5 g BDK ve 50 mL kral suyu ile hazırlanan liç çözeltisi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda BDK'dan, % 75 Pd adsorplanmıştır.

Sonuç olarak, hem dünyada hem de Türkiye'de önemli bir sorun teşkil eden e-atıkların önemli bir parçası olan BDK'lardan değerli metallerin adsorpsiyonunun ucuz, etkili ve çevresel açıdan uygun bir yöntem olan biyosorpsiyon ile sağlanması açısından çalışmada hedeflenen amaçlara ulaşılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından kabul edilen 1503F143 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] Tuncuka, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E.Y., Deveci, H. 2012. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25, 28-37.
- [2] Li, J., Zeng, X. 2012. Recycling printed circuit boards. *Waste Electrical And Electronic Equipment (WEEE) Handbook*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 287-310.
- [3] Chehade, Y., Siddique, A., Alayan, H., Sadasivam, N., Nusri, S., Ibrahim, T. 2012. Recovery of gold, silver, palladium, and copper from waste printed circuit boards. *International Conference on Chemical, Civil and Environment Engineering (ICCEE'2012)*, 24-25 Mart, Dubai, 226-234.
- [4] Tezcan, R., Tezcan, H. 2007. *Metaller Kimyası*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 288s.
- [5] Cayumil, R., Khanna, R., Rajarao, R., Mukherjee, P., Sahajwalla, V. 2016. Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste. *Waste Management*, 57, 121-130.
- [6] Behnamfard, A., Salarirad, M.M., Veglio, F. 2013. Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation. *Waste Management*, 33, 2354-2363.
- [7] Park, Y.J., Fray, D.J. 2008. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 164, 1152-1158.
- [8] Cui, Z., Zhang, L. 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 158, 228-256.
- [9] Yazici, E., Deveci, H. 2013. Extraction of metals from waste printed circuit boards (WPCBs) in H₂SO₄-CuSO₄-NaCl solutions. *Hydrometallurgy*, 139, 30-38.
- [10] Adhikari, C.R., Parajuli, D., Kawakita, H., Inoue, K., Ohto, K., Harada, H. 2008. Dimethylamine-modified waste paper for the recovery of precious metals. *Environmental Science and Technology*, 42(15), 5486-5491.
- [11] Parajuli, D., Adhikari, C.R., Kawakita, H., Kajiyama, K., Ohto, K., Inoue, K. 2008. Reduction and accumulation of Au(III) by grape waste: a kinetic approach. *Reactive & Functional Polymers*. 68, 1194-1199.
- [12] Parajuli, D., Khunathai, K., Adhikari, C.R., Inoue, K., Ohto, K., Kawakita, H., Funaoka, M., Hirota, K. 2009. Total recovery of gold, palladium, and platinum using lignophenol derivative. *Minerals Engineering*, 22, 1173-1178.
- [13] Marco, I., Caballero, B.M., Chomon, M.J., Laregoiti, M.F., Torres, A., Fernandez, G., Arnaiz, S. 2008. Pyrolysis of electrical and electronic wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 179-183.
- [14] Long, L., Sun, S., Zhong, S., Dai, W., Liu, J., Song, W. 2010. Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 177, 626-632.
- [15] Jie, G., Ying-Shun, L., Mai-Xi, L. 2008. Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 83 (2), 185-189.
- [16] Mankhand, T.R., Singh, K.K., Gupta, S.K., Das S. 2012. Pyrolysis of printed circuit boards. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 1(6), 102-107.
- [17] Yapıcı, E. 2016. Elektronik atıklardan değerli metallerin biyosorpsiyon yoluyla geri kazanımı. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, Eskişehir.