

Atık Karbon Keçenin Pirol ile Polimerizasyonu ve Katot Olarak Kullanılabilirliği

Mesut Sezer^{1*}, Melike İşgören², Sevil Veli³, Anatoli Dimoglo⁴

^{1,3}Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

²Çevre Koruma ve Kontrol Bölümü, İzmit Meslek Yüksekokulu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

⁴Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 05.06.2023

Kabul: 26.08.2023

Yayım: 20.12.2023

Araştırma Makalesi

Öz – Elektrokimyasal prosesler, atıksudaki karışık kirletici yükünü tek basamakta artabilmeleri ve kısa sürede yüksek giderim verimi sağlamaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda bu arıtım yöntemleri ile ilgili en hızlı teknolojik gelişmeler yenilikçi elektrot üretimi alanında olup, birçok araştırmacı anot ve katot aktivitesini arttırmayı amaçlayan çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmaların bir diğer hedefi ise elektrot üretiminde en çok kullanılan ve yer kabuğundaki oranları her geçen gün azalan metallere alternatif olabilecek; elde edilmesi kolay, ucuz ve sürdürülebilir hammaddelerden elektrot eldesidir. Çalışmamızda kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemi kullanılarak atık karbon keçe (KK) üzerinde pirol monomerinin FeCl₃.6H₂O oksidantı ile polimerizasyonu yapılmıştır. Polimerizasyon sonucunda polipirol kaplı karbon keçe (KK/PPy) elde edilmiştir. KK/PPy ve KK'nın elektrot olarak etkinliği elektrooksidasyon prosesinde boya giderimi üzerinden araştırılmıştır. Ayrıca pirol konsantrasyonu (0.05-1 M), oksidant konsantrasyonu (0.05-0.5 M) ve sıcaklığın (5-60°C) katodun kütleli artışı ve direnç azalışı üzerine etkisi incelenmiştir. En yüksek direnç azalışını sağlayan polimerizasyon koşulları 0.2 M pirol konsantrasyonu, 0.3 M FeCl₃.6H₂O konsantrasyonu ve sıcaklık 50°C olarak bulunmuştur. Optimum koşullarda üretilen KK/PPy ve işlem görmemiş KK elektrotoksidasyon prosesinde katot olarak kullanılarak aktiviteleri birbiri ile karşılaştırılmış ve boya gideriminde KK/PPy'nin daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca tekstil atığı olarak ortaya çıkan atık karbon keçeden elektrot malzemesi üretilmesi sürdürülebilir bir yöntem olarak çevrenin ve doğal kaynakların korunması ilkesine hizmet eden yenilikçi bir yaklaşımdır.

Anahtar Kelimeler – Elektrooksidasyon, iletken polimerler, karbon keçe, kimyasal oksidatif polimerizasyon, polipirol

Waste Carbon Felt Polymerization with Pyrrole and Usability as Cathode

^{1,3}Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye

²Department of Environmental Protection, İzmit Vocational School, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye

³Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Duzce University, Duzce, Turkey

Article History

Received: 05.06.2023

Accepted: 26.08.2023

Published: 20.12.2023

Research Article

Abstract – Electrochemical processes are widely used because they can remove the mixed pollutant load in wastewater in a single step and provide high removal efficiency in a short time. In recent years, the technological developments related to these treatment methods have been in the field of innovative electrode production. Researchers are striving to increase anode and cathode activity. Another goal of these studies is to produce electrodes from easy-to-obtain, cheap and sustainable raw materials that can be an alternative to metals that are most used in electrode production and whose ratios are decreasing day by day in the earth's crust. In this study, polypyrrole (PPy) coated carbon felt was obtained by polymerizing pyrrole monomer with FeCl₃.6H₂O oxidant on carbon felt (KK) using the chemical oxidative polymerization method (KK/PPy). The obtained KK/PPy and KK were investigated through dye removal in the electrooxidation process. The effects of pyrrole concentration (0.05-1 M), oxidant concentration (0.05-0.5 M), and temperature (5-60°C) on the mass increase and resistance decrease of the cathode were investigated. The best polymerization conditions were found to be 0.2 M pyrrole concentration, 0.3 M FeCl₃.6H₂O concentration, and temperature 50°C. KK/PPy produced under optimum conditions and untreated KK were used as cathodes in the electrooxidation process and their activities were compared. It was seen that KK/PPy was more effective in dye removal. In addition, the production of electrode material from waste, which is generated from textile is an innovative approach that serves the principle of protecting the natural resources as a sustainable method.

Keywords – Electrooxidation, conductive polymers, polypyrrole, carbone felt, chemical oxidative polymerization.

¹ mesut.sezer@kocaeli.edu.tr

² melike.isgoren@kocaeli.edu.tr

³ sevilv@kocaeli.edu.tr

⁴ anatolidimoglo@duzce.edu.tr

*Sorumlu Yazar

1. Giriş

İçinde bulunduğumuz çağın küresel boyuttaki en önemli sorunlarından biri artan atıksu miktarı ve bileşiminin niteliksel değişimidir. Dolayısı ile atıksuların arıtımı her geçen yıl daha büyük bir önem kazanmaktadır (Vijayakumar, Saravanathamizhan ve Balasubramanian, 2016; Das, Sharma ve Purkait, 2022; Wagner ve Bauer, 2023). Atıksu arıtımında işletme kolaylığı ve kısa sürede arıtım sağlanması nedeniyle ayırma ve konsantre etmeye dayalı yöntemler daha çok tercih edilmektedir. Ancak bu proseslerde kirleticiler adsorpsiyon, membran filtrasyon veya koagülasyon gibi tekniklerle sıvı fazdan katı faza aktarılmakta ve böylelikle konsantre edilmektedir (Isgoren, Gengec ve Veli, 2017; Görücü vd., 2022). Diğer taraftan ileri oksidasyona dayalı sistemler kimyasal dönüşüm ile tehlikeli veya toksik atıksuları toksik olmayan son ürünlere dönüştürmektedir (Veli vd., 2019; Antony vd., 2020). Atıksu arıtımı için kullanılan elektrokimyasal teknolojiler kalıcı kirleticilerin hızlı ve tam bozulmalarını sağlayarak modern toplumların sürdürülebilir çevre hedefine ulaşmalarına önemli katkıda bulunmaktadır. Son yıllarda bu alanda yapılan araştırmalar sayesinde üretilen yeni malzemeler ve reaktör tipleri elektrokimyasal arıtımın verimliliğini artırmıştır (Martínez-Huitle vd., 2023). Elektrokimyasal oksidasyon prosesinde anodik oksidasyon, suda bulunan organik kirleticilerin bozunması için yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir (Martínez-Huitle vd., 2015). Elektrokimya teknolojisi ile malzeme bilimindeki ilerlemeler elektrooksidasyon prosesinde kullanılan elektrotların hızla gelişmesine yol açmıştır (Filip vd., 2020). Son yıllarda yapılan çalışmalar ise katot malzemesinin üretimi ve modifikasyonu üzerine yoğunlaşmıştır. Bu alanda özellikle karbon malzemeli, flor, azot ve fosfor katkılı, karbon destekli metal-metal oksit, metal oksit katotlar çok çalışılmıştır (Du vd., 2021). Günümüzde maliyetinin düşük olması ve üretim kolaylığı sebebi ile katot malzemesi olarak karbon keçe kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu malzemenin elektriksel iletkenlik özelliğinin geliştirilmesi için iletken/yarı iletken polimerler ile kaplanmaktadır (Gülümser, 2021).

Elektriksel olarak iletken polimerler, metallerin elektronik özellikleriyle, polimerlerin kimyasal ve mekanik özelliklerini birleştiren bir organik sınıftır (Kuhn, Child ve Kimbrell, 1995). İletken polimerler şarj olabilen pil üretimi, diyot, iletken kaplamalar, antistatik materyallerin eldesi, gaz sensörleri, bakteri ve toz tutmayan kıyafetlerin üretimi gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (Adamhasan, 2008; Oh, Hong ve Kim, 1999).

İletken polimerler arasında en fazla uygulama alanına sahip olanlar polianilin (PAni) ve polipirol'dür. Bu polimerlerin tercih edilmesinin başlıca sebepleri; iyi bir iletkenliğe sahip olmaları, dış koşullardan etkilenmemeleri, kolay ve ucuz bir şekilde sentezlenebilmeleri şeklinde sıralanabilir (MacDiarmid ve Epstein, 1994).

İletken polimerlerle kaplama işlemi kimyasal polimerizasyon, plazma polimerizasyonu, elektrokimyasal polimerizasyon ve aşılama polimerizasyonu gibi yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir (Kutani vd., 2007).

Polianilin ve polipirol gibi iletken polimerlerin kullanılması kumaşların mekanik özelliklerini kaybetmeden iletken özellikte üretilmesine imkân sağlamaktadır (Cihaner, 2004). Bu sayede tekstil endüstrisinde elektriksel olarak iletken kumaş ve keçe üretiminde polimerler kullanılmaya başlanmıştır (Kang vd., 2005).

Kim ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kimyasal ve elektrokimyasal polimerizasyon yöntemi kullanarak poliester (PET) dokuma kumaş üzerine polipirol kaplamışlardır. Kimyasal polimerizasyon yönteminde polimerizasyon sıcaklığı, oksitleyici ve monomer konsantrasyonu, oksitleyici türü gibi parametrelerin kumaşın elektriksel iletkenlik özelliği üzerine etkisini incelemiştir (Kim vd., 2002).

Kaynak ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada polipirol ile sürekli buhar polimerizasyon yöntemi kullanılarak iletken bir yapıya sahip yün, pamuk ve naylon iplikler üretilmiştir. Kullanılan $FeCl_3$ çözeltisinin konsantrasyonu ve ipliklerin büküm miktarı değiştirilerek ipliklerin iletken özellikleriyle polipirolün kaplama derecesi incelenmiştir. Araştırma sonucunda polipirolün iplik içine olan penetrasyonu ve kaplamanın kalınlığı gibi özelliklerin ipliğin fiziksel parametreleri üzerine etkili olduğu bulunmuştur (Kaynak, Najar ve Foitzik, 2008).

Avloni ve arkadaşları poliestere nonwoven ve poliestere dimi kumaşlarını PPy ile kaplamışlardır. Kaplama işlemi sonucunda poliestere dimi kumaşlarının yüzey direncini 40 ohm, poliestere nonwoven kumaşının yüzey direncini ise 18 ohm olarak bulmuşlardır (Avloni vd., 2007).

Kincal ve arkadaşları antrakinin sulfonik asidi dopant olarak kullanarak in-situ polimerizasyon prosesi ile PET kumaşları PPy ile kaplamışlardır. Bunun sonucunda kumaşların yüzey direnç değerinin 20 ohm/kare olduğunu belirlemişlerdir (Kincal vd., 1998).

Håkansson ve arkadaşları kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemini kullanarak poliestere-likra kumaşlarını PPy ile kaplamışlardır. Polimerizasyon süresinin ve dopant konsantrasyonunun yüzey direncine etkisini araştırmışlardır. Kaplama işlemi sonrasında kumaşların yüzey direnç değerlerinin 180-1300 ohm/kare aralığında olduğunu ifade etmişlerdir (Håkansson, Amiet ve Kaynak, 2006).

Bu çalışmada kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemi ile KK üzerine PPy kaplanacak ve bu malzemenin elektrooksidasyon prosesinde KK/PPy katot olarak kullanılabilirliği araştırılacaktır. Katodun kütle artışı ve direnç azalışı üzerine pirol konsantrasyonu, oksidant derişimi ve sıcaklık parametrelerinin etkisi incelenecek, en yüksek direnç azalışını sağlayan optimum kaplama koşulları belirlenecektir. Optimum koşullarda üretilen KK/PPy ve işlem görmemiş KK'nin elektrooksidasyon prosesinde katot olarak kullanılabilirliği boya giderimi üzerinden değerlendirilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

DeneySEL çalışmalarda yerel bir tekstil fabrikasından temin edilen atık karbon keçeler 3x3 cm boyutlarında kesilerek kullanılmıştır.

Kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemi kullanılarak pirol monomerinin (C₄H₅N) demir (III) klorür heksahidrat (FeCl₃.6H₂O) oksidantı ile polimerizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Karbon keçe üzerine pirol monomerinin in-situ polimerizasyonu için öncelikle belirli konsantrasyonda hazırlanan pirol monomeri distile su içerisinde çözülmüştür. Ardından bu çözelti içerisine 3x3 cm boyutundaki KK daldırılmış ve 30 dakika boyunca belirli bir sıcaklıkta çalkalayıcı içerisinde 120 rpm'de karıştırılmıştır. Başka bir beherde istenen konsantrasyonda hazırlanan FeCl₃.6H₂O distile su içerisinde çözülmüştür. Hazırlanan bu çözelti damla damla olacak şekilde karbon keçelerin içinde bulunduğu karışıma eklenmiştir. Belirli bir sıcaklıkta bu çözelti 150 dakika boyunca çalkalayıcı ile 120 rpm'de karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında karbon keçe örnekleri çözelti içerisinden çıkarılmıştır. Ardından distile su kullanılarak yıkanmış ve oda sıcaklığında kurutulmuştur (Lin vd., 2005).

Karbon keçelerin dirençleri iki nokta prob yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Prob yöntemi ile direnç ölçümü; multimetre (Wellhise-DT-830D) cihazının iki probunun karbon keçe üzerine yerleştirilerek direnç ölçümü yapılması esasına dayanmaktadır. Bu amaçla karbon keçe üzerinde 10 farklı noktadan direnç ölçülerek bunların aritmetik ortalaması alınmış ve ortalama direnç azalış değeri denklem 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Direnç Azalışı (\%)} = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada R₁ KK'nin direnci, R₂ ise polimerizasyondan sonraki KK/PPy'nin direncidir.

Karbon keçelerin kütle artışı değeri, kimyasal polimerizasyon yöntemi ile oluşan polipiroiden dolayı karbon keçenin kütle artmasını ifade etmektedir ve kaplama işleminden önce ve sonra karbon keçelerin kuru ağırlıkları tespit edilerek denklem 2.2'de verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$\text{Kütle Artışı (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2.2)$$

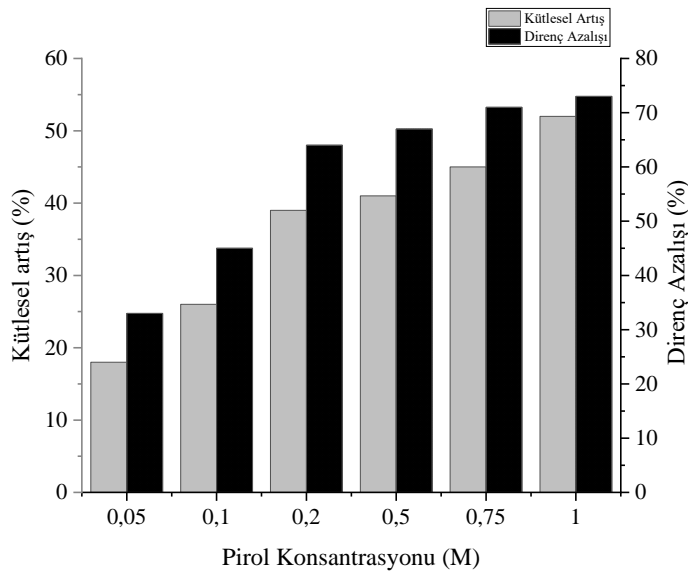
Burada W_1 karbon keçe (KK)'nin kuru kütlesi, W_2 ise KK/PPy'nin kuru kütlesidir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada pirol konsantrasyonunun, oksidant derişiminin ve sıcaklığın, KK/PPy'ye ait kütle artışı ve direnç azalışı değerleri üzerine etkisi incelenmiştir.

3.1. Pirol Konsantrasyonunun Etkisi

Pirol konsantrasyonunun kütle artışı ve direnç azalışı üzerine etkisinin araştırılması amacıyla 0.2 M $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ve 25°C sıcaklıkta, farklı pirol konsantrasyonları ile (0.05-1 M) KK/PPy üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar KK/PPy kütle artışı ve direnç azalışı üzerinden Şekil 1'de verilmiştir.



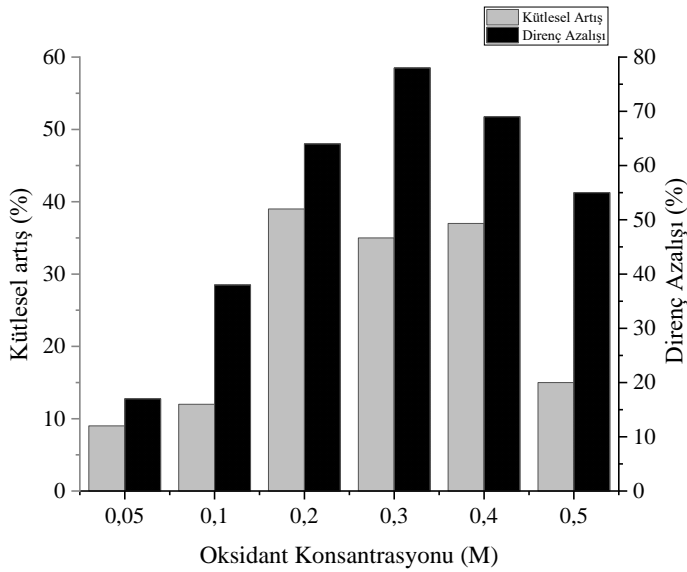
Şekil 1. Pirol konsantrasyonunun KK/PPy kütle artışı ve direnç azalışı üzerine etkisi

Şekil 1'deki sonuçlara göre en yüksek kütle artışı (%52) ve direnç azalışı (%73) pirol konsantrasyonunun 1 M olduğu durumda gözlenmiştir. Pirol konsantrasyonunun yükselmesine bağlı olarak KK/PPy kütle artışı ve direnç azalışında artma görülmüştür. Direnç azalışında meydana gelen artış, polimerizasyon esnasında kumaşın yapısında iletkenliği sağlayan kanalların meydana gelmesi ve bu kanalların sayısının artmasından kaynaklanmaktadır (Wang vd.,2012; Omastova, Pionteck ve Košina 1996; Rehan Abbasi vd., 2012).

Fakat 0,2 M pirol konsantrasyonundan daha yüksek değerlerde direnç azalışı bakımından anlamlı bir artış meydana gelmemiştir. Bu nedenle optimum pirol konsantrasyonu 0.2 M olarak seçilmiştir.

3.2. Oksidant Konsantrasyonunun Etkisi

Kütleli artışı ve direnç azalışı üzerine oksidant konsantrasyonunun etkisinin incelenmesi için optimum olarak belirlenen 0.2 M pirol ve 25°C sıcaklıkta, farklı oksidant ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) konsantrasyonları ile (0.05-0.5 M) KK/PPy üretimi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Oksidant konsantrasyonunun KK/PPy kütle artışı ve direnç azalışı üzerine etkisi

Şekil 2’den görüldüğü üzere en yüksek %39’luk kütle artışı 0.2 M’lık $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonunda ulaşılırken, %78’lik en yüksek direnç azalışına ise 0,3 M $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonunda ulaşılmıştır. Elektrooksidasyon prosesinde iletkenlik artışı önemli bir parametre olduğundan optimum oksidant konsantrasyonu 0.3 M $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ olarak belirlenmiştir.

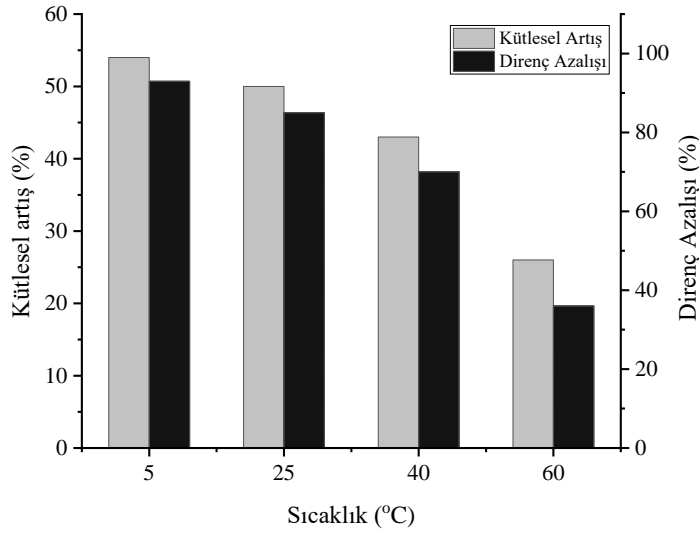
0.05-0.3 M oksidant konsantrasyonlarında direnç azalışında artış gözlemlenmiştir. Artan oksidant derişimine bağlı olarak kütle artışı ve iletkenlikte meydana gelen artışın sebebi polimer gövdesi üzerindeki dopant iyonunun artışından kaynaklanmaktadır. (Saravanan, Shekhar ve Palaniappan, 2006). Ayrıca düşük oksidant derişimlerinde çözeltideki oksidant miktarı az olduğu için polimerizasyon başlangıçta hızlı olmaktadır. Polimerizasyonun hızlı gerçekleşmesi kısa zincirlerin oluşmasını sağlamaktadır. Buna bağlı olarak konjugasyon da kısa olmakta ve iletkenlik düşük kalmaktadır (Lei, Cai ve Martin, 1992).

0.3-0.5 M aralığında oksidant konsantrasyonunda artış devam ederken direnç azalışında azalma meydana gelmektedir. Bunun nedeni, PPy’nin kimyasal polimerizasyonunda yükseltgen olarak kullanılan demir tuzlarının konsantrasyonundaki aşırı artışın, polipirolün iletkenliğinin düşmesine sebep olmasıdır. Bu durumun ikincil veya yan ürünün kopolimerizasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir (Sayar, 2008).

Literatürde bu çalışmaya benzer sonuçların elde edildiği bir yayında PPy/Polipropilen (PPy/PP) kompozitinin hazırlanmasında FeCl_3 yükseltgen olarak seçilmiştir. FeCl_3 konsantrasyonunun artışıyla iletkenlik de yükselmiştir. 0.05 M’den daha yüksek FeCl_3 konsantrasyonlarında iletkenlik 10^{-1} S/cm’nin üstüne çıkarken 0.5 M’den daha yüksek konsantrasyonlarda ise kompozitin iletkenliği en fazla 2 S/cm’ye kadar çıkmıştır. Daha yüksek konsantrasyonlarda ise iletkenlikte anlamlı bir artış gözlenmemiştir. (Yang vd., 1996). Aramid/PPy kompozitinin iletkenliğine FeCl_3 konsantrasyonunun etkilerinin incelendiği bir çalışmada 0°C ve 20°C ’de yapılan deneylerde FeCl_3 konsantrasyonunun artışıyla birlikte her iki sıcaklıkta da iletkenlikte artış meydana gelmiştir. FeCl_3 derişimi %15’e ulaştıktan sonra iletkenlikte anlamlı bir artış olmamıştır (Cho ve Jung, 1997).

3.3. Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklığın kütle artışı ve direnç azalışı üzerine etkisini inceleyebilmek amacıyla optimum olarak belirlenen 0.2 M pirol ve 0,3 M $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonunda 5, 25, 40 ve 60°C ’lik ortamda polimerizasyon yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Sıcaklığın KK/PPy kütleli artış ve direnç azalışı üzerine etkisi

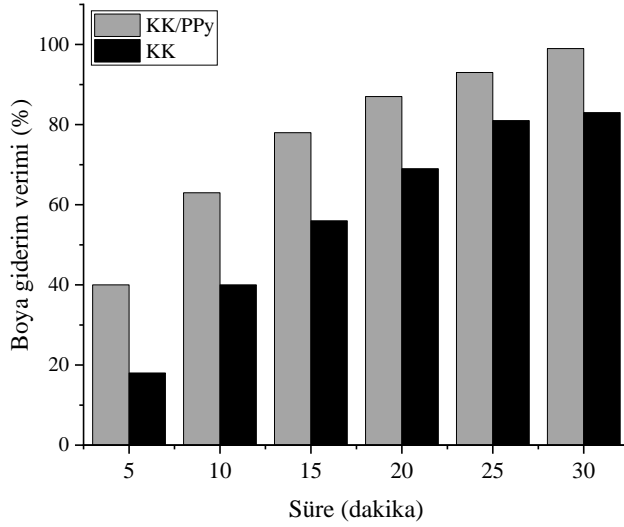
Şekil 3 incelendiğinde en yüksek kütleli artış (%54) ve direnç azalışı (%93) 5°C’de ve en düşük kütleli artış (%26) ve direnç azalışı (%36) 60°C’de meydana gelmiştir. Sıcaklığın azalmasıyla kütleli artış ve direnç azalışı yüzdelerinde artış gözlemlenmiştir. Bu sebeple optimum polimerizasyon sıcaklığı 5°C olarak belirlenmiştir.

Polipirolün düşük sıcaklık değerlerinde iletkenliğin daha yüksek olduğu yapılan çalışmalarda da ortaya konmuştur. Örneğin 0-5°C gibi düşük sıcaklıklarda demir tuzları sulu çözeltide en yüksek iletkenliği elde edebilmek amacıyla kullanılmıştır (Myers, 1986).

Sıcaklık artışına bağlı olarak PPy veriminde meydana gelen azalmanın sebebi PPy polimerizasyonunun ekzotermik oluşu ile açıklanabilir. (Lu, Pich ve Adler, 2004). Sıcaklık artışıyla birlikte düşük molekül ağırlıklı çözünebilir ürünlerin meydana gelmesi mümkün olmaktadır. Düşük molekül ağırlıklı polimerlerde çeşitli sebeplerden dolayı iletim yolunda kesilmeler olmakta ve bu nedenle iletkenlikte azalmalar meydana gelmektedir (Duran vd., 2009). Ayrıca sıcaklığın artışıyla birlikte iletkenliğin azalmasının bir sebebi polimer gövdesindeki dopant anyonlarının kaybı olarak gösterilebilir (Saravanan, Shekhar ve Palaniappan, 2006).

3.4. KK ve KK/PPy’nin EO Prosesindeki Verimliliğinin İncelenmesi

KK ve optimum koşullarda üretilen KK/PPy katotlarının elektrooksidasyon prosesi ile boya (Isolan Bordeaux 2S-B) giderim verimi üzerinden etkinlikleri incelenmiştir. Bu amaçla elektrooksidasyon prosesinin koşulları; çalışma hacmi 250 ml, paslanmaz çelik anot, başlangıç boya konsantrasyonu 25 mg/L, elektrolit konsantrasyonu 0.5 g/L NaCl, akım yoğunluğu 2 mA/cm² ve reaksiyon süresi 30 dakika olarak seçilmiştir. Zamana bağlı çizilen boya giderim verimlerine ait grafik Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. KK ve KK/PPy'ye ait boya giderim verimleri

Şekil 4'e göre işlem görmemiş karbon keçe katot olarak kullanıldığında, 30 dakikalık elektrooksidasyon sonucunda %83'lük boya giderimi sağlamıştır. Karbon keçe üzerine polipirol kaplanması ile elde edilen malzemenin kullanılması halinde ise verim %99'a yükselmiştir. Kaplama işlemi ile meydana gelen iletkenlik artışı aynı zamanda katodun elektro-katalitik aktivitesini artırarak boya giderim veriminin yükselmesine sebep olmuştur.

4. Sonuçlar

Elektrooksidasyon prosesinde giderim verimini etkileyen en önemli unsurlardan biri elektrodun tipidir. Son yıllarda yapılan çalışmalar anodun geliştirilmesinin yanı sıra katot etkinliğinin artırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada karbon keçe polipirol ile kaplanarak iletkenliği artırılmış ve elektrooksidasyon prosesi ile boya gideriminde katot olarak kullanılmıştır. Yapılan deneyler artan pirol konsantrasyonunun ile kütleli artışın ve direnç azalışının arttığını göstermiştir. PPy'nin karbon keçeye kaplanmasında oksidant olarak kullanılan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 'in optimum konsantrasyonu 0.3 M olarak bulunmuştur. Ayrıca reaksiyon sıcaklığı azaldıkça KK/PPy'in direnci azalmıştır. İşlem görmemiş karbon keçe ve KK/PPy'nin elektrooksidasyon sonrası boya giderim verimleri sırasıyla %83 ve %99 olarak bulunmuştur. Bu çalışma sonucunda iletken polimerlerin atık karbon keçeye kaplanarak katot olarak kullanılmasının sürdürülebilir bir yaklaşım olduğu, kaplama prosesinin kolaylığı ve elektrot işlevselliği açısından gelecek çalışmalara ışık tutabileceği görülmüştür. Ayrıca ileriki çalışmalarda farklı iletken polimerler ile kaplama yapılarak çeşitli atıksularda da katot olarak kullanılabilirliği incelenebilir.

Yazar Katkıları

Mesut Sezer: Veri toplamış ve analizini yapmıştır, makaleyi yazmıştır.

Melike İşgören: Veri toplamış ve analizini yapmıştır, makaleyi yazmıştır.

Sevil Veli: Analizi planlamış ve tasarlamıştır.

Anatoli Dimoglo: Analizi planlamış ve tasarlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Kaynaklar

- Adamhasan, A.S. (2008). *Poliester polianilin, pamuk polianilin kompozit kumaşlarının hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Antony, J., Niveditha, S. V., Gandhimathi, R., Ramesh, S.T. ve Nidheesh, P. V. (2020). Stabilized landfill leachate treatment by zero valent aluminium-acid system combined with hydrogen peroxide and persulfate based advanced oxidation process, *Waste Management*, (106), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.005>
- Avloni, J., Ouyang, M., Florio, L., Henn, A.R. ve Sparavigna, A. (2007). Shielding effectiveness evaluation of metallized ve polypyrrole-coated fabrics. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 20(3), 241–254. <https://doi.org/10.1177/0892705707076718>
- Cho, J.W. ve Jung, H. (1997). Electrically conducting high-strength aramid composite fibres prepared by vapour-phase polymerization of pyrrole. *Journal of Materials Science*, 32(20), 5371–5376. <https://doi.org/10.1023/A:1018627113857>
- Cihaner, A. (2004). *Electrochemical synthesis of crowned conducting polymers: Nature of radical cations in polymerization and mechanism of conductivity* (Doktora tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Das, P.P., Sharma, M. ve Purkait, M.K. (2022). Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, (292), 121058. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121058>
- Du, X., Oturan, M.A., Zhou, M., Belkessa, N., Su, P., Cai, J., Trelu, C. ve Mousset, E. (2021). Nanostructured electrodes for electrocatalytic advanced oxidation processes: From materials preparation to mechanisms understanding and wastewater treatment applications. *Applied Catalysis B: Environmental* (296), 120332. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120332>
- Duran, N.G., Karakişla, M., Aksu, L. ve Saçak, M. (2009). Conducting polyaniline/kaolinite composite: Synthesis, characterization and temperature sensing properties. *Materials Chemistry and Physics* 118(1), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.07.009>
- Filip, J., Cajthaml, T., Najmanova, P., Cernik, M. ve Zboril, R. (2020). *Advanced Nano-Bio Technologies for Water and Soil Treatment*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29840-1_22
- Görücü, S., Gülümser, Ç., Sezer, M. ve Veli, S. (2022). Azo dye removal from aqueous solution by powder graphite: Investigation of parameter effects and optimization by Box-Behnken design. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, (9), 56-64. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1110677>
- Gülümser, Ç. (2021). *İleri oksidasyon yöntemleriyle boyar madde içeren sulu çözeltilerin yeni fotokatalitik elektrotlar ile arıtılabilirliğinin incelenmesi* (Doktora tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Håkansson, E., Amiet, A. ve Kaynak, A. (2006). Electromagnetic shielding properties of polypyrrole/polyester composites in the 1-18 GHz frequency range. *Synthetic Metals*, 156(14–15), 917–925. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2006.05.010>
- Isgoren, M., Gengec, E. ve Veli, S. (2017). Evaluation of wet air oxidation variables for removal of organophosphorus pesticide malathion using Box-Behnken design. *Water Science and Technology*. 75(3), 619-628. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.479>
- Kang, T.S., Lee, S.W., Joo, J. ve Lee, J.Y. (2005). Electrically conducting polypyrrole fibers spun by electrospinning. *Synthetic Metals*, 153(1–3), 61–64. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2005.07.135>
- Kaynak, A., Najar, S.S. ve Foitzik, R.C. (2008). Conducting nylon, cotton and wool yarns by continuous vapor polymerization of pyrrole. *Synthetic Metals*, 158(1–2), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2007.10.016>
- Kim, M.S., Kim, H.K., Byun, S.W., Jeong, S.H., Hong, Y.K., Joo, J.S., Song, K.T., Kim, J.K., Lee, C.J. ve Lee, J.Y. (2002). PET fabric/polypyrrole composite with high electrical conductivity for EMI shielding. *Synthetic Metals*, 126(2–3), 233–239. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00562-8](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00562-8)
- Kincal, D., Kumar, A., Child, A.D. ve Reynolds, J.R. (1998). Conductivity switching in polypyrrole-coated textile fabrics as gas sensors. *Synthetic Metals*, 92(1), 53–56. <https://doi.org/10.1016/s0379->

6779(98)80022-2

- Kuhn, H.H., Child, A.D. ve Kimbrell, W.C. (1995). Toward real applications of conductive polymers. *Synthetic Metals*, 71(1–3), 2139–2142. [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(94\)03198-F](https://doi.org/10.1016/0379-6779(94)03198-F)
- Kutanis, S., Karakişla, M., Akbulut, U. ve Saçak, M. (2007). The conductive polyaniline/poly(ethylene terephthalate) composite fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2), 609–614. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.02.008>
- Lei, J., Cai, Z. ve Martin, C.R. (1992). Effect of reagent concentrations used to synthesize polypyrrole on the chemical characteristics and optical and electronic properties of the resulting polymer. *Synthetic Metals*, 46, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2013.06.008>
- Lin, T., Wang, L., Wang, X. ve Kaynak, A. (2005). Polymerising pyrrole on polyester textiles and controlling the conductivity through coating thickness. *Thin Solid Films*, 479(1–2), 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.11.146>
- Lu, Y., Pich, A. ve Adler, H.J.P. (2004). Synthesis and characterization of polypyrrole dispersions prepared with different dopants. *Macromolecular Symposia*, 210, 411–417. <https://doi.org/10.1002/masy.200450646>
- MacDiarmid, A.G. ve Epstein, A.J. (1994). The concept of secondary doping as applied to polyaniline. *Synthetic Metals*, 65(2–3), 103–116. [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(94\)90171-6](https://doi.org/10.1016/0379-6779(94)90171-6)
- Martínez-Huitle, C.A., Rodrigo, M.A., Sirés, I. ve Scialdone, O. (2015). Single and coupled electrochemical processes and reactors for the abatement of organic water pollutants: A critical review. *Chemical Reviews*, 115(24), 13362–13407. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00361>
- Martínez-Huitle, C.A., Rodrigo, M.A., Sirés, I. ve Scialdone, O. (2023). A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 328(July 2022). <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122430>
- Myers, R.E. (1986). Chemical oxidative polymerization as a synthetic route to electrically conducting polypyrroles. *Journal of Electronic Materials*, 15(2), 61–69. <https://doi.org/10.1007/BF02649904>
- Oh, K.W., Hong, K.H. ve Kim, S.H. (1999). Electrically conductive textiles by in situ polymerization of aniline. *Journal of Applied Polymer Science*, 74(8), 2094–2101. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19991121\)](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19991121)74:8<2094::AID-POLA10974628(19991121)>3.0.CO;2-1)
- Omastova, M., Pionteck, J. ve Košina, S. (1996). Preparation and characterization of electrically conductive polypropylene/polypyrrole composites. *European Polymer Journal*, 32(6), 681–689. [https://doi.org/10.1016/0014-3057\(95\)00206-5](https://doi.org/10.1016/0014-3057(95)00206-5)
- Rehan Abbasi, A.M., Mangat, M.M., Baheti, V. ve Militky, J. (2012). Thermal properties of cotton fabric coated with polypyrrole. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 5(2), 163–168. <https://doi.org/10.3993/jfbi06201205>
- Saravanan, C., Shekhar, R.C. ve Palaniappan, S. (2006). Synthesis of polypyrrole using benzoyl peroxide as a novel oxidizing agent. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 207(3), 342–348. <https://doi.org/10.1002/macp.200500376>
- Sayar, N. (2008). *PEM yakıt hücrelerinde platinatsız metal nanokompozit katalizörler* (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Veli, S., Arslan, A., Gülümser, C., Topkaya, E., Kurtkulak, H., Zeybek, S., Dimoglo, A, Işgören, M. (2019). Advanced treatment of pre-treated commercial laundry wastewater by adsorption process: Experimental design and cost evaluation. *Journal of Ecological Engineering*, 20(10), 165-171. <https://doi.org/10.12911/22998993/113136>
- Vijayakumar, V., Saravanathamizhan, R. ve Balasubramanian, N. (2016). Electro oxidation of dye effluent in a tubular electrochemical reactor using TiO₂/RuO₂ anode. *Journal of Water Process Engineering*, (9), 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.12.006>
- Wagner, M. and Bauer, S. (2023). Industrial and municipal wastewater treatment with a focus on water-reuse. Basel, Switzerland. Erişim adresi: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-6255-1>
- Wang, jikui, Cai, G., Zhu, X. ve Zhou, X. (2012). Oxidative chemical polymerization of 3, 4-ethylenedioxythiophene and its applications in antistatic coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, (124), 109–115. <https://doi.org/10.1002/app.35045>.