



Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Institute of Natural and Applied Science Journal

Dergi ana sayfası/ Journal home page: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kujs>



E-ISSN: 2587-2389

Polimer Nanokompozit Kaplama Teknikleri ve Sunduğu Performanslar

Çetin ÇİMEN^{1*} 

¹Kafkas Üniversitesi, Kazım Karabekir Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kars, Türkiye.

¹Kafkas University, Kazım Karabekir Vocational School, Department of Machinery and Metal Technologies, Kars, Turkey.

(İlk Gönderim / Received: 22.02.2022, Kabul / Accepted: 01.07.2022, Online Yayın / Published Online: 26. 10. 2022)

Anahtar Kelimeler:

Kaplama,
korozyon önleyici
özellikler,
triboloji,
elektroaktif polimer.

Özet: Günümüz teknolojilerin gelişiminde polimer ve polimer kompozitler, üstün performansları ile vazgeçilmez bir hale gelmiştir. Araç teknolojileri, elektrik-elektronik malzemeler, uzay, tekstil, tıp, triboloji ve diğer birçok alanda geniş kullanım alanları ile polimer kompozitleri günlük yaşamımıza girmiştir. Kaplanan malzeme de kullanılan iletken olmayan, elektroaktif ve iletken polimer ile nanokompozitlerin yapıları ve özellikleri düzenlenebilir. Burada özellikle aşınma direnci, korozyon önleyici direnç ve elektrik direnci gibi birçok performanslı hale getirilen malzeme ayrıca polimere nanokil veya nanoparçacıklar gömüldüğünde verimli bir şekilde geliştirilebilir. Karbon nanotüplerle yapılan Polimer Nanokompozitler, elektriksel özelliklere sahiptir ve elektromanyetik parazit koruması görevi görür. Polimer nanokompozitler için uygun bazı kaplama teknolojileri sunulmuştur.

Polymer Nanocomposite Coating Techniques and Their Performances

Keywords:

Coating,
anti-corrosion properties,
tribology,
electroactive polymer.

Abstract: In the development of today's technologies, polymer and polymer composites have become indispensable with their superior performance. Polymer composites have entered our daily lives with wide usage areas in vehicle technologies, electrical-electronic materials, space, textile, medicine, tribology and many other fields. The structures and properties of nanocomposites can be regulated with the non-conductive, electroactive and conductive polymer used in the coated material. Here, many performance-enhanced materials such as abrasion resistance, anti-corrosion resistance and electrical resistance can also be developed efficiently when nanoclay or nanoparticles are embedded in the polymer. Polymer Nanocomposites made with carbon nanotubes have electrical properties and act as electromagnetic interference shielding. Some coating technologies suitable for polymer nanocomposites are presented.

1. GİRİŞ

Polimer nanokompozitler veya nano dolgulu polimerler, polimer matris ortamında fiziksel harmanlama veya kimyasal polimerizasyon teknolojileri ile hazırlanmış ve nano ölçekli homojen

dağılıma sahip (10-100 nm) organik veya inorganik dolgu maddeleri içeren malzemelerdir. Kullanılan dolgu maddeleri, çok çeşitli doğal veya sentetik polimerlere gömülü parçacıklar, katmanlı malzemeler, lifler veya kümeler olabilir. Kompozitlerin

*İlgiliyazar: acetin2375@gmail.com

performansını artıran ayırt edici fiziksel ve kimyasal özellikleri, gelişim süreçleri sonrasında artan ilgi görmektedir. Dolgu maddeleri nedeniyle bu olağanüstü özellikler, bu polimerlere uzay, havacılık, otomotiv endüstrisi, elektronik, tıbbi ekipman ve tüketim mallarında kullanım için yüksek bir potansiyel verir. Ayrıca endüstride ve akademide, yığın ve fonksiyonel ince filmler gibi farklı nano dolgulu polimer türleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Gacitua ve ark., 2005). Polimer nanokompozit kaplamalar, özel amaçlar için alt katmandaki malzeme yüzey özelliklerini iyileştirdikleri için özellikle önemlidir. Örneğin, çelik yüzeyi üzerine kaplanmış inorganik katmanlı bir dolguya sahip bir polimer nanokompozit, korozyonu önemli ölçüde yavaşlatabilir. Bu koruma mekanizması ayrıca bir gaz bariyeri kaplaması oluşturmak için de kullanılabilir, çünkü inorganik katmanlı dolgu gazın penetrasyon yolunu uzatır. Kendi kendini temizleme sıcaklık direnci, aşınma direnci ve özel optikler gibi özel işlevler için diğer kaplamalar birçok ticari üründe ortaya çıkmıştır. Son zamanlarda, polimer nanokompozitlere dayalı elektroaktif kaplamaların (Chen ve ark., 2019; Gandara ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2021) geleneksel kaplamalardan çok daha düşük bir öz direnç olduğu gösterilmiştir, bu da elektrokimyasal sensörler (Fu ve ark., 2021; Iftikhar ve ark., 2021), yüksek dielektrik sabiti olan malzemeler (Fu ve ark., 2021; Iftikhar ve ark., 2021), fonksiyonel membranlar ve elektrokromik malzemeler (Fu ve ark., 2021; Iftikhar ve ark., 2021) gibi yeni uygulamalara yol açar. Kendi iç malzemeleri dışında davranışı, başarılı polimer nanokompozit kaplamaları tanımlamak için anahtar parametre, bunların substratlar üzerine ne kadar kolay ve verimli bir şekilde yerleştirilebilmesidir (Bharathidasan ve ark., 2020).

1.1. Polimer için kaplama teknolojileri

1.1.1. Nanokompozitler

Başarılı bir kaplama, yalnızca polimer nanokompozitin kendine özgü özelliklerini değil, aynı zamanda malzemeyi farklı türde substrat üzerinde biriktirmek için uygulanabilir teknolojileri de gerektirir. Burada kullanılan anlamıyla malzemenin 'işlenebilir', yüzey homojenliği, fazlar arası yapışma, kalınlık kontrolü ve toksik olmama gibi iyi kaplama kalitesi özelliklerini sağlamak için

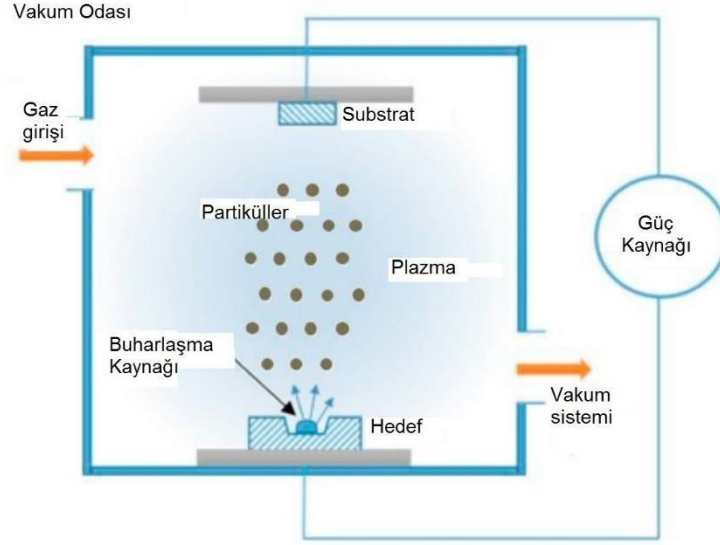
çeşitli koşullara uymayı ifade eder. Üretim kapasitesi, büyük ölçekli üretim için bir diğer önemli husustur. Araştırma ve üretimde birçok farklı kaplama teknolojisi kullanılmıştır. Ancak bunların hepsi nano dolgulu polimerler için pratik değildir. Polimer zincirleri, normalde aşırı yüksek sıcaklıklarda veya enerjilerde gerçekleştirilen buharlaştırma işlemleriyle kolayca zarar görebilir. Bu nedenle, polimer nanokompozitler için uygun bir kaplama tekniği için genellikle düşük bir çökelme sıcaklığı temel bir gerekliliktir. Genel olarak, polimer nanokompozitler için uygun kaplama teknikleri dört ana grupta sınıflandırılabilir: (1) fiziksel buhar biriktirme (PVD) (Kausar, 2021; Shirazi ve ark., 2021), (2) kimyasal buhar biriktirme (CVD) (Md Saleh ve ark., 2015), (3) kimyasal ve elektrokimyasal biriktirme (Kumar ve ark., 2020; Sevcik ve ark., 2021) ve (4) rulodan ruloya (R2R) (Kumar ve ark., 2020; Sevcik ve ark., 2021) döküm biriktirme (Ng ve ark., 2021).

1.1.2. Fiziksel buhar biriktirme

PVD ilk olarak hedef maddenin bir buharının üretilmesini içerir, örn. yüksek enerjili bir kaynak yoluyla bir gaz karışımı plazma (Baptista ve ark., 2018). Daha sonra, buharlaştırılmış malzeme, alt tabaka üzerinde kademeli olarak ince bir film oluşturmak için çok düşük basınçlı bir odada (0,1-10 Pa) alt tabakanın yüzeyi üzerinde yoğunlaştırılır. Düşük basınçlı bir gaz kullanarak yüksek yoğunluklu bir plazmanın oluşturulması, ~0.03 T'lik bir statik manyetik alan gerektirir. Alan, püskürtme hedefinin önündeki bölge içinde eşdeğer (veya dengeli) mıknatısların bir konfigürasyonu ile oluşturulur ve elektronları yüzeye yakın bir yerde yakalar. Manyetik alan çizgileri ağırlıklı olarak hedefin arkasında yoğunlaşırken, substratın yakınındaki plazma yoğunluğu yaklaşık ne (~1010 cm⁻³). Magnetron püskürtme veya doğru akım magnetron püskürtme, plazmayı indüklemek ve sürdürmek için substrata doğrudan bir potansiyelin uygulanmasını içerir (Şekil 1) (Baptista ve ark., 2018).

1.1.3. Kimyasal buhar birikimi

CVD, bir ısıtma işlemi ve buhar fazındaki kimyasal reaksiyonlar yoluyla katı hedef malzemedan bir buhar üretilmesine dayanır. Bu nedenle, bu biriktirme Polimer nanokompozit kaplamalar, sırasıyla tozların veya filmlerin oluşumuna yol açan,



Şekil 1. Fiziksel buhar biriktirme PVD (Physical Vapor Deposition) kaplama prosesi (Baptista ve ark., 2018).

ısıtılmış yüzey üzerinde veya yakınında meydana gelen homojen bir gaz fazı veya heterojen kimyasal reaksiyonlar içerir. CVD tipik olarak çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Buhar fazındaki kimyasal reaksiyonları etkinleştirmek için 1000 °C'ye kadar. Bu aşırı yüksek sıcaklıklar, katı hedeflerin kimyasal yapısının bozulmasına neden olarak orijinal malzeme ile karşılaştırıldığında farklı özelliklerle sonuçlanır. Bu nedenle, inorganik ve metallo-organik öncüler kullanılarak 350-700 °C'de düşük sıcaklıkta CVD gerçekleştirilmiştir. Aşağıda açıklandığı gibi bir plazma kullanılarak 200-400 °C'lik daha düşük aktivasyon sıcaklıkları elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık aşaması sağlamak için en yaygın olarak kullanılan iki CVD cihazı, diğer kaplama tekniklerine kıyasla düşük maliyetleri nedeniyle sıcak duvarlı CVD (HWCVD) ve sıcak filamentli CVD (HFCVD) reaktörleridir. Bununla birlikte, HWCVD, HFCVD'nin aşırı yüksek filament sıcaklıklarını gerektirmediğinden, polimer nanokompozitlerin biriktirilmesi için daha uygundur. Yine de, bu kaplama teknolojileri, bir nanoelmas kaplaması gibi çok özel durumlar dışında, polimer nanokompozitler için nadiren kullanılmaktadır. Plazma destekli CVD, CVD'deki sıcaklığı düşürmenin etkili bir yoludur. Kimyasal reaksiyonları etkinleştirmek için yüksek sıcaklık yerine son derece düşük basınçta (10-100 Pa) bir mikrodalga plazma kullanır. Yöntem yalnızca düşük bir ortam sıcaklığı gerektirir ve 2.45 GHz mikrodalga plazma heyecan verici kaynağı kullanır. Bu biriktirme yöntemi, silikon dioksit, karbon nitrür

ve kübik bor nitrür biriktirmek için kullanılmıştır (Gao, 2012).

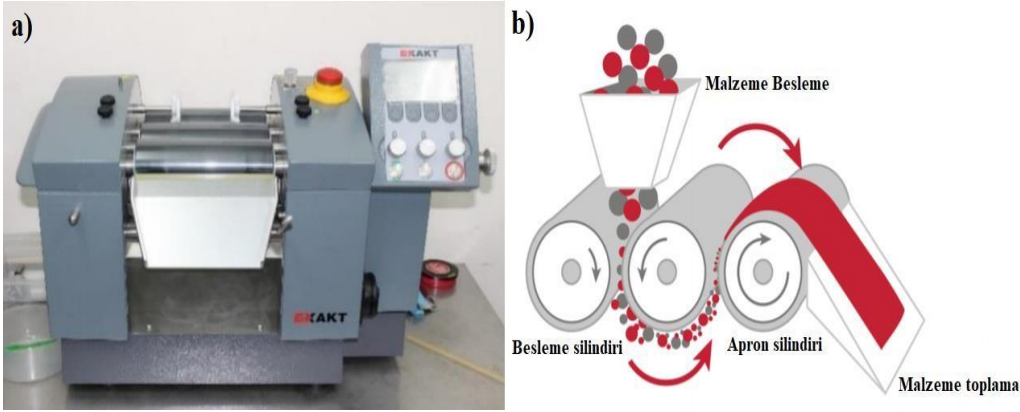
1.1.4. Kimyasal ve elektrokimyasal biriktirme

Kimyasal ve elektrokimyasal biriktirme, hem temel hem de uygulamalı bir bakış açısıyla oldukça ilgi çeken bir alandır; bu yöntemler elektrokaplama ve çözelti analizi için kullanılabilir. Düşük iyonlaşma sıcaklığı (çoğu durumda sıcaklık ortam olabilir) kaplama hedefleri üzerinde ihmal edilebilir bir tehlikeli etkiye sahip olmalıdır (Rao ve ark., 2005). Kimyasal ve elektrokimyasal birikimin temel amacı, polielektrolit matrisine uygulanan bir giriş voltajı veya indirgeyici maddeler yoluyla öncülerini aktif türlerine indirgemektir. Bu ön koşula dayalı olarak, polianilin (PANI), politiyofen (PTh), polipirol ve poli(3,4- etilendioksitiyofen) (PEDOT) gibi iletken polimerler, nanokompozitlerde iletken polimer matrisi için en yaygın olarak kullanılanlardır (Baptista ve ark., 2018). Bu kaplama teknolojisinin mekanizması oldukça basittir ve normalde iki adımı içerir: (1) hedef öncüler, katodik veya serbest radikaller de dahil olmak üzere aktif monomerler olmaya yönlendirilir ve (2) aktif monomerler katoda yayıldıktan sonra (çalışan elektron kaynağı ve hedef substrat) yavaş yavaş substratın yüzeyinde birikir. Bununla birlikte, elektrokimyasal yöntemde indirgeme, harici bir akım gerektirir. Anodik ve katodik reaksiyonların yerleri ayrıdır. Kimyasal birikme için, indirgeme bir indirgeyici ajan

tarafından indüklenir. İş parçası üzerinde anodik ve katodik reaksiyonlar birlikte meydana gelir. Ek olarak, bu reaksiyonlar sadece katalitik olarak aktif yüzeylerde ilerler, yani yeni kaplanmış metalik yüzeyler redoks reaksiyonlarını teşvik etmek için katalitik olarak yeterince aktif olmalıdır. . Elektrokimyasal biriktirme, iletken polimer matrisi içinde bulunan ağır metal kolloidleri veya spesifik enzimler gibi nano dolgu maddelerini hareketsiz hale getirmek için iletken polimer nanokompozitlerle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, biyoaktif ince filmler, analog biyosinyalleri elektronik sinyallere dönüştürmek için biyotransistör görevi görebilir (Gao ve ark., 2012).

Rulodan ruloya işleme biriktirme R2R (Şekil 2) işleme biriktirme, organik ışık yayan diyotlar (OLED'ler) gibi düz cihazların imalatında kullanılan, yüksek üretim kapasiteli ve düşük

maliyetli bir endüstriyel kaplama teknolojisidir. Fotovoltaik (PV) ve elektroforez ekranları (EPD'ler). Basit bir rulo kaplama Coyle ve diğerleri tarafından tanımlanmıştır. Aşağıdaki gibi: sıvı, kaplanmış filmin hem kalınlığını hem de homojenliğini kontrol eden bir çift döner silindir arasındaki boşluğa akar. Bu tanımın ters merdaneli kaplama, gravürlü kaplama, rulo üstü bıçakla kaplama (boşluk kaplama) ve özel amaçlar için endüstriyel olarak kullanılan yarı kalıp kaplama gibi bazı varyasyonları vardır. R2R, "kesintisiz" bir kaplama işlemidir ve diğer kaplama tekniklerinin çoğuyla birleştirilebilir. Birçok pratik teknik, örneğin R2R döküm, R2R püskürtme ve R2R plazma destekli CVD, foto-dönüşümlü ince filmler için nanokompozitlerin üretiminde kullanılmıştır (Gao ve ark., 2012).



Şekil 2. a) Kalenderleme (veya üç silindirli öğütme) makinesi için kullanılan parçacıkları bir polimer matrisine dağıtmak (Zainal ve ark., 2018). b) Genel konfigürasyon ve mekanizma (Atif ve ark., 2016).

1.1.5. Polimer nanokompozit performansı

Malzemelerin organik esasla kaplama prosesleri metalleri aşındırıcı ortamlara karşı korumak için uzun süredir endüstriyel ortamlarda kullanılmaktadır. Burada birincil amacı, O₂ ve H₂O gibi aktif türlere karşı fiziksel bir bariyer görevi görmektir. Son zamanlarda yeni bir kaplama tekniklerinde: hibrit organik-inorganik kaplamaları üzerinde bir çok çalışmalar devam etmektedir (Liu ve ark., 2020; Liu ve ark., 2021). Bu kaplamalar, polimerlerin esnekliğini ve işleme kolaylığını inorganik malzemelerin sertliği ile birleştirir ve çeşitli alt tabakalara başarıyla uygulanmıştır. Örneğin, Giraldo Mejía ve çalışma arkadaşları, Kil ve gümüş nanopartiküller içeren hibrit nano-

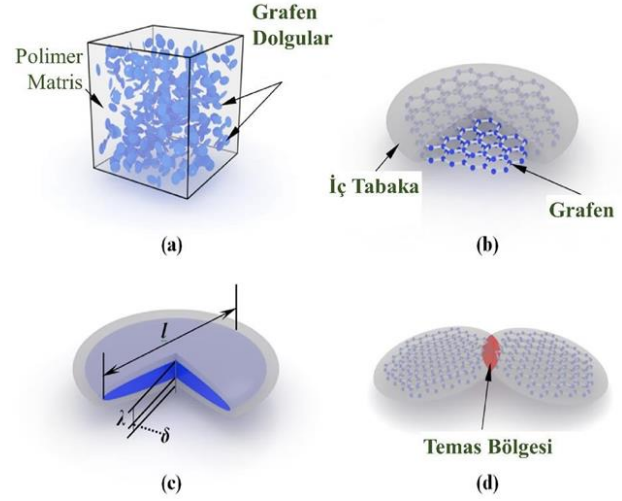
kompozit kaplamaları hazırlayarak malzemenin antibakteriyel performansını etkili bir şekilde arttırabileceğini gösterdiler (Giraldo Mejía ve ark., 2021). Kil dışında bu avantaja sahip bir diğer önemli malzeme SiO₂'dir. Düşük maliyetli SiO₂ nanoparçacıklarının polimerlere dahil edilmesi, termal özellikleri (Taborda ve ark., 2021) mekanik özellikleri (Ma ve ark., 2021), korozyon önleyici (Giraldo ve ark., 2017), aşınma direncini (Zarei ve ark., 2017), bariyer özelliklerini (Safronova ve ark., 2021) ve elektronik paketleme özelliklerinin (Wu ve ark., 2019) özelleştirilmesini önemli ölçüde iyileştirebilir. Nanoparçacıklar polimer zincir hareketliliğindeki değişiklikler nedeniyle partikül yüzeyine yakın polimerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir (Giraldo ve ark., 2017). İki boyutlu bir kafes içinde düzenlenmiş sp²-

hibritleştirilmiş karbon atomlarından oluşan bir tek tabaka olan grafen, aynı zamanda bir nanodolgu maddesi olarak da büyük ilgi görmüştür (Li ve ark., 2021; Wang ve ark., 2021). Grafen nanokompozit malzeme sistem şeması Şekil 3'te verilmiştir.

İki boyutlu bir kafes içinde düzenlenmiş sp²-hibritleştirilmiş karbon atomlarından oluşan bir tek tabaka olan grafen, olağanüstü termal, mekanik ve bariyer özellikleri nedeniyle son yıllarda bir nanodolgu maddesi olarak büyük ilgi görmüştür. Grafen dolgu maddelerinin miktarı, düzgün polimer matrisine göre bir polimer kompozit içinden gaz geçirgenliğini önemli ölçüde azaltabilir. Düşük konsantrasyonlarda (hacimce %0.05'in altında), buruşuk grafen levhalar, yaklaşık 25-130 kat daha yüksek yüklemelere sahip kil bazlı nano doldurucular kadar etkilidir (Li ve ark., 2021; Wang ve ark., 2021). Compton ve arkadaşları bir polistiren matrisi içinde süspansiyon edilen buruşuk grafen ile, oluşan polimer-grafen nanokompoziti yoluyla oksijen moleküllerinin nüfuzunu büyük ölçüde engellediler (Compton ve ark., 2010). Şekil 4'te oksijen geçirgenlik potansiyeli verilmiştir.

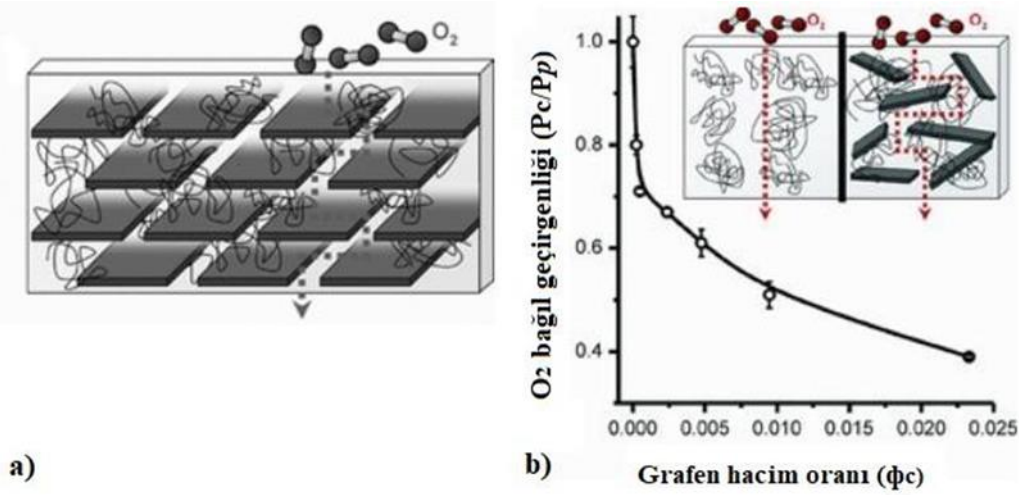
Huang ve ark. pasivasyon oksit katmanlarının görsel gözlemi, CRS üzerinde elektroaktif poliimid ve

elektroaktif kopoliimid kaplama altında CRS yüzeyi üzerinde grimsi bir oksit tabakası formu sergiledi.



Şekil 3. (a) grafen-polimer nanokompozit sisteminin bir şeması, (b) çevreleyen ince bir ara tabaka ile son derece yassı küresel grafen dolgu maddesi, (c) grafen nanodolgu maddesi için geometrik parametreler ve (d) işaretli grafen-grafen temas bölgesi kırmızı renge göre (Li ve ark., 2021).

Şekil 5'te SEM görüntüleri, elektroaktif poliimid ve elektroaktif kopoliimid kaplama ile CRS yüzeyi arasında oksit tabakalarının oluştuğunu ortaya koymuştur (Huang ve ark., 2009).



Şekil 4. a) Trombositlerin "dolambaçlı yolu", gazların bir polimer kompozit yoluyla difüzyonunu engeller (Nielsen modeli). b) Dolgu yüklemesinin bir fonksiyonu olarak polistiren/grafen (PGN) ve polistiren/kil (PCN) kompozitlerinin oksijen geçirgenliği, iki teorik kompozit geçirgenlik modeliyle karşılaştırıldığında (Compton ve ark., 2010)

1.1.6. Elektroaktif Polimer Kaplamalar

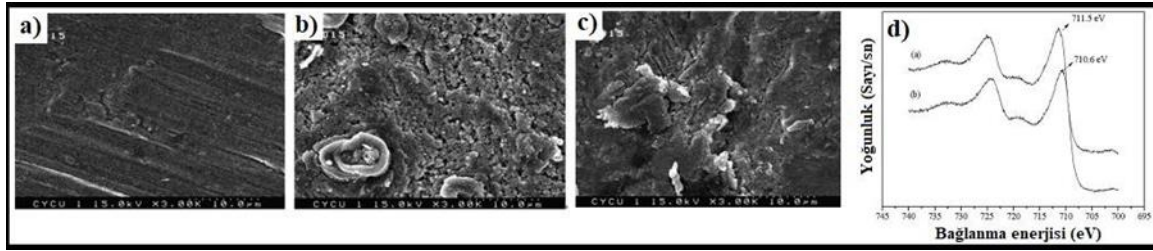
PANI nanokompozitleri mükemmel korozyon önleyici özelliklere sahip olmasına rağmen, PANI'nın yaygın organik çözücülerdeki zayıf çözünürlüğü, birçok alanda pratik uygulamasını sınırlamıştır (Daikh ve ark., 2018; Ma ve ark.,

2020). Son zamanlarda, bir anilin oligomeri içeren elektroaktif polimerler, iyi çözünürlük, mekanik mukavemet ve film oluşturma yeteneği gibi gelişmiş özellikleri nedeniyle büyük araştırma ilgisini çekmiştir (Chen ve ark., 2019). Rehman ve ark. süper kapasitör için elektrot malzemesi olarak

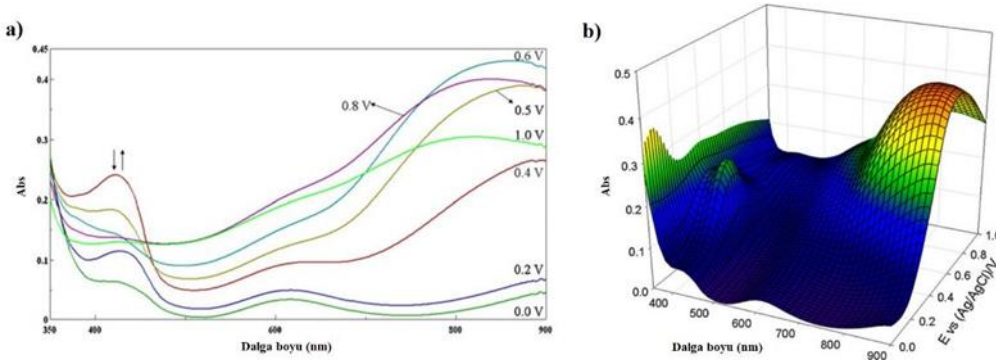
kullanılan iletken polimer-metal oksit bazlı çekirdek-kabuk PANI-Pr2O-NiO-Co3O4 nanokompozitinin kolay sentezini gerçekleştirdiler. Üretilen nanokompozit sadece iyi tanımlanmış konjuge segmentler içermekle kalmadı, aynı zamanda yapı-özellik ilişkilerinin ve konjuge polimerlerin iletken mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını sağladı.

Guo ve çalışma arkadaşları, biyolojik olarak parçalanabilen ve elektroaktif kopolimerler elde etmek için elektroaktif anilin oligomerini bir polimere dahil etti. Anilin oligomeri, iyi tanımlanmış bir elektroaktif yapıya, iyi işleme özelliklerine ve yüksek parçalanabilirliğe sahiptir (Guo ve ark., 2013). Elektroaktif poliimid (EPI) (Ji ve ark., 2017; Monetta ve ark., 2019) ve elektroaktif epoksi (EE) (Ji ve ark., 2017; Monetta ve ark., 2019), elektrokimyasal sensörler (Deshpande ve ark., 2021), fonksiyonel membranlar (Gao ve ark., 2020), elektrokromik

malzemeler (Zhang ve ark., 2019; Norouzzian ve ark., 2020) ve korozyon önleyici kaplamalar olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Huang ve ark. korozyona karşı koruma ve elektrokromik özelliklere sahip anilin-pentamer bazlı elektroaktif poliimid kaplama üzerine elektrokimyasal çalışmalar yaptılar (Huang ve ark., 2011). CRS elektrotları üzerinde EPI kaplamalarının korozyona karşı daha iyi korunması için olası bir mekanizma şudur: (1) EPI kaplamaları fiziksel bir bariyer görevi görebilir ve (2) EPI'deki anilin pentamer birimlerinin redoks katalitik özellikleri, tarama ile kanıtlandığı gibi, CRPolymer nanokompozit kaplama elektrotu üzerinde pasif bir metal oksit tabakasının oluşumunu indükleyebilir (Weng ve ark., 2010; Huang ve ark., 2011). Şekil 6'da gösterildiği gibi, oksijen gazı ve su buharı için difüzyon yollarının ve kaplamaların gaz geçirgenliğinin azalmasına neden olur.



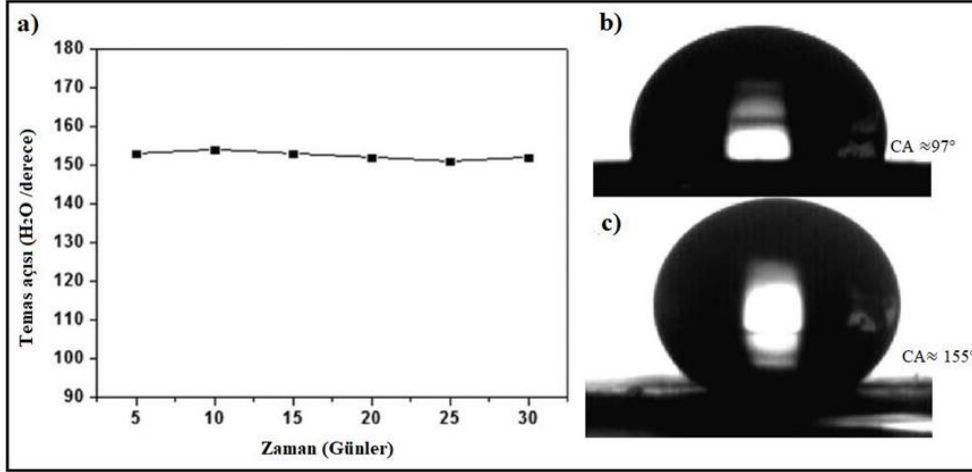
Şekil 5. a) cilalı, b) elektroaktif kopolimide kaplamalı ve c) elektroaktif poliimide kaplı CRS yüzeyleri için 18.12 SEM görüntüleri. d) (i) elektroaktif kopolimide ve (ii) elektroaktif poliimide ESCA e 2p çekirdek seviyesi spektrumları (Huang ve ark., 2009).



Şekil 6. a) EPI ince filmin farklı oksidasyon potansiyellerinde indiyum kalay oksit (ITO) ile kaplanmış cam elektrotlar üzerindeki elektrokromik davranışı. b) 0,00 ve 1,00 V (vs. Ag/AgCl) arasında bir ITO kaplı cam elektrot üzerindeki EPI ince filminin üç boyutlu spektroeletrokimyasal davranışı (Huang ve ark., 2011).

Weng ve ark. yeni bitki yaprakları çoğaltılarak yeni korozyon önleyici kaplama malzemeleri hazırladılar. Bu malzemeler süperhidrofobiklik ve redoks katalitik yeteneğinin sinerjik bir etkisine sahipti. Korozyon koruması için uygulanan süperhidrofobik elektroaktif epoksi (SEE)

kaplama, taze Xanthosoma sagittifolium yapraklarının yüzey yapısından bir nano döküm tekniği kullanılarak soğuk haddelenmiş çelik (CRS) yüzeyi üzerine hazırlanmış ve kaplanmıştır (Weng ve ark., 2011). Malzeme performansı Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Su damlacıklarının CCD görüntüleri: a) SEE için zamanla su temas açısındaki değişim, b) 97° CA ile EE ve c) 155° CA ile SEE (Weng ve ark., 2011).

2. SONUÇ

İletken polimerler ve iletken olmayan polimerler, antistatik kaplamalar, EMI ekranlama, korozyon önleyici kaplamalar, aşınmaya dayanıklı kaplamalar vb. gibi uygulamalarda birçok alanda kullanılmıştır. Son zamanlarda, sentetik elektroaktif polimerlerin iletken polimerlere benzer şekilde redoks reaksiyonlarına girdiği gösterilmiştir ve ayrıca iyi çözünürlüğe ve film oluşumuna sahip oldukları gösterilmiştir. Bu avantajlı özelliklerinden dolayı, elektrokimyasal sensörler, fonksiyonel membranlar, elektrokromik malzemeler, korozyon önleyici kaplamalar ve biyomalzemelerde kullanım için elektroaktif polimerler kullanılabilir. Bununla birlikte, bu malzemeler henüz yeni bir araştırma alanı olduğundan mekanik, termal ve elektriksel özellikler çok derinlemesine çalışılmamıştır. Bildirilen davranışları, değerli özelliklerinden yararlanma umuduyla daha fazla araştırma yapılması için yeterince umut vericidir.

KAYNAKLAR

- Atif, R. and Inam, F. (2016). Reasons and remedies for the agglomeration of multilayered graphene and carbon nanotubes in polymers. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 7, 1174-1196.
- Baptista, A., Silva, F.J.G., Porteiro, J., Míguez, J.L., Pinto, G. and Fernandes, L. (2018). On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications. *Procedia Manufacturing*, 17, 746-757.
- Bharathidasan, T. and Sathiyanyanan, S. (2020). Self-replenishing superhydrophobic durable polymeric

nanocomposite coatings for heat exchanger channels in thermal management applications. *Progress in Organic Coatings*, 148, 105828.

- Chen, K.Y., Lai, Y.S., You, J.K., Santiago, K.S. and Yeh, J.M. (2019). Effective anticorrosion coatings prepared from sulfonated electroactive polyurea. *Polymer*, 166, 98-107.
- Chen, Y., Zhang, Q., Jing, X., Han, J. and Yu, L. (2019). Synthesis of Cu-doped polyaniline nanocomposites (nano Cu@PANI) via the H₂O₂-promoted oxidative polymerization of aniline with copper salt. *Materials Letters*, 242, 170-173.
- Compton, O.C., Kim, S., Pierre, C., Torkelson, J.M. and Nguyen, S.T. (2010). Crumpled Graphene Nanosheets as Highly Effective Barrier Property Enhancers. *22* (42), 4759-4763.
- Daikh, S., Zeggai, F.Z., Bellil, A. and Benyoucef, A. (2018). Chemical polymerization, characterization and electrochemical studies of PANI/ZnO doped with hydrochloric acid and/or zinc chloride: Differences between the synthesized nanocomposites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 121, 78-84.
- Deshpande, A.S., Muraoka, W. and Andreescu, S. (2021). Electrochemical sensors for oxidative stress monitoring. *Current Opinion in Electrochemistry*, 29, 100809.
- Fu, S., Zhu, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Zhang, Y., Qiao, L., Yin, N., Song, K., Liu, M. and Wang, D. (2021). Recent advances in carbon nanomaterials-based electrochemical sensors for phenolic compounds detection. *Microchemical Journal*, 106776.

- Gacitua, W., Ballerini, A. and Zhang J. (2005). Polymer Nanocomposites: Synthetic And Natural Fillers A Review. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 7 (3), 159-178.
- Gandara, M. and Gonçalves, E.S. (2020). Electroactive composites: PANI electrochemical synthesis with GO and rGO for structural carbon fiber coating. *Progress in Organic Coatings*, 138, 105399.
- Gao, F. (2012). *Advances in polymer nanocomposites, Types and applications*. Woodhead Publishing Limited, 606-629.
- Gao, Q., Zang, Y., Zhang, Y., Xie, J., Li, J., Gao, J. and Xue, H. (2020). Composite polymerized molecular imprinting membrane-based electrochemical sensor for sensitive determination of curcumin by using 4-pentenoyl-aminoacyl-chitosan oligosaccharide as functional monomer oligomer. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 879, 114793.
- Giraldo, L.J., Giraldo, M.A., Llanos, S., Maya, G., Zabala, R. D., Nassar, N.N., Franco, C.A., Alvarado, V. and Cortés, F.B. (2017). The effects of SiO₂ nanoparticles on the thermal stability and rheological behavior of hydrolyzed polyacrylamide based polymeric solutions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159, 841-852.
- Giraldo Mejía, H. F., Herrera Seitz, K., Valdés, M., Uheida, A., Procaccini, R.A. and Pellice, S.A. (2021). Antibacterial performance of hybrid nanocomposite coatings containing clay and silver nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 628, 127354.
- Guo, B., Glavas, L. and Albertsson, A.C. (2013). Biodegradable and electrically conducting polymers for biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 38 (9), 1263-1286.
- Huang, K.Y., Jhuo, Y.S., Wu, P.S., Lin, C.H., Yu, Y.H. and Yeh, J.M. (2009). Electrochemical studies for the electroactivity of amine-capped aniline trimer on the anticorrosion effect of as-prepared polyimide coatings. *European Polymer Journal*, 45 (2), 485-493.
- Huang, T.C., Yeh, T.C., Huang, H.Y., Ji, W.F., Chou, Y.-C., Hung, W.I., Yeh, J.M. and Tsai, M.H. (2011). Electrochemical studies on aniline-pentamer-based electroactive polyimide coating: Corrosion protection and electrochromic properties. *Electrochimica Acta*, 56 (27), 10151-10158.
- Iftikhar, T., Asif, M., Aziz, A., Ashraf, G., Jun, S., Li, G. and Liu, H. (2021). Topical advances in nanomaterials based electrochemical sensors for resorcinol detection. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 31, e00138.
- Ji, W.F., Chu, C.M., Hsu, S.C., Lu, Y.D., Yu, Y.C., Santiago, K.S. and Yeh, J.M. (2017). Synthesis and characterization of organo-soluble aniline oligomer-based electroactive doped with gold nanoparticles, and application to electrochemical sensing of ascorbic acid. *Polymer*, 128, 218-228.
- Kausar, A., in *Conducting Polymer-Based Nanocomposites*, ed. A. Kausar (Elsevier, 2021), 185-209
- Kumar, H., Kumari, N. and Sharma, R. (2020). Nanocomposites (conducting polymer and nanoparticles) based electrochemical biosensor for the detection of environment pollutant: Its issues and challenges. *Environmental Impact Assessment Review*, 85, 106438.
- Li, C., Wang, J. and Su, Y. (2021). A dual-role theory of the aspect ratio of the nanofillers for the thermal conductivity of graphene-polymer nanocomposites. *International Journal of Engineering Science*, 160, 103453.
- Liu, F., Liu, A., Tao, W. and Yang, Y. (2020). Preparation of UV curable organic/inorganic hybrid coatings-a review. *Progress in Organic Coatings*, 145, 105685.
- Liu, Z., Ren, L., Jing, J., Wang, C., Liu, F., Yuan, R., Jiang, M. and Wang, H. (2021). Fabrication of robust superhydrophobic organic-inorganic hybrid coating through a novel two-step phase separation method. *Progress in Organic Coatings*, 157, 106320.
- Ma, J., Ren, H., Liu, Z., Zhou, J., Wang, Y., Hu, B., Liu, Y., Kong, L.B. and Zhang, T. (2020). Embedded MoS₂-PANI nanocomposites with advanced microwave absorption performance. *Composites Science and Technology*, 198, 108239.
- Ma, L., Song, G., Zhang, X., Zhou, S., Liu, Y. and Zhang, L. (2021). Attaching SiO₂ nanoparticles to GO sheets via amino-terminated hyperbranched polymer for epoxy composites: Extraordinary improvement in thermal and mechanical properties. *European Polymer Journal*, 157, 110677.
- Md Saleh, S.S., Md Akil, H. and Abdul Kudus, M.H., in *Fillers and Reinforcements for Advanced Nanocomposites*, ed. Y. Dong, R. Umer and A.K.T. Lau (Woodhead Publishing, 2015), 81-98

- Monetta, T., Acquesta, A., Carangelo, A., Naddeo, C. and Guadagno, L. (2019). Enhancement of photooxidative and corrosion resistance of epoxy/graphene water-based coatings on metallic substrate. *Progress in Organic Coatings*, 135, 7-18.
- Ng, L.Y., Chua, H.S. and Ng, C.Y. (2021). Incorporation of graphene oxide-based nanocomposite in the polymeric membrane for water and wastewater treatment: A review on recent development. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (5), 105994.
- Norouzian, R.S. and Lakouraj, M.M. (2020). Polyaniline-thiacalix[4]arene metallopolymer, self-doped, and externally doped conductive polymers. *Progress in Organic Coatings*, 146, 105731.
- Rao, C.R.K. and Trivedi, D.C. (2005). Chemical and electrochemical depositions of platinum group metals and their applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 249 (5), 613-631.
- Safronova, E.Y., Yurova, P.A., Ashrafi, A.M., Chernyak, A.V., Khoroshilov, A.V. and Yaroslavtsev, A.B. (2021). The effect of ultrasonication of polymer solutions on the performance of hybrid perfluorinated sulfonic acid membranes with SiO₂ nanoparticles. *Reactive and Functional Polymers*, 165, 104959.
- Sevcik, J., Urbanek, P., Skoda, D., Jamatia, T., Nadazdy, V., Urbanek, M., Antos, J., Munster, L. and Kuritka, I. (2021). Energy resolved-electrochemical impedance spectroscopy investigation of the role of Al-doped ZnO nanoparticles in electronic structure modification of polymer nanocomposite LEDs. *Materials & Design*, 205, 109738.
- Shirazi, M., Rad, G.M. and Tamsilian, Y., in *Encyclopedia of Materials: Composites*, ed. D. Brabazon (Elsevier, Oxford, 2021), 725-745
- Taborda, E.A., Franco, C.A., Lopera, S.H., Castro, R.H., Maya, G.A., Idrobo, E.A. and Cortés, F.B. (2021). Effect of surface acidity of SiO₂ nanoparticles on thermal stability of polymer solutions for application in EOR processes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107802.
- Wang, J., Li, C., Li, J., Weng, G. J. and Su, Y. (2021). A multiscale study of the filler-size and temperature dependence of the thermal conductivity of graphene-polymer nanocomposites. *Carbon*, 175, 259-270.
- Weng, C.J., Chang, C.H., Peng, C.W., Chen, S.W., Yeh, J.M., Hsu, C.L. and Wei, Y. (2011). Advanced Anticorrosive Coatings Prepared from the Mimicked Xanthosoma Sagittifolium-leaf-like Electroactive Epoxy with Synergistic Effects of Superhydrophobicity and Redox Catalytic Capability. *Chemistry of Materials*, 23 (8), 2075-2083.
- Weng, C.J., Huang, J.Y., Huang, K.Y., Jhuo, Y.S., Tsai, M.H. and Yeh, J.M. (2010). Advanced anticorrosive coatings prepared from electroactive polyimide-TiO₂ hybrid nanocomposite materials. *Electrochimica Acta*, 55 (28), 8430-8438.
- Wu, J., Zuo, X., Chen, Q., Deng, X., Liang, H., Zhu, T., Liu, J., Li, W. and Nan, J. (2019). Functional composite polymer electrolytes with imidazole modified SiO₂ nanoparticles for high-voltage cathode lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*, 320, 134567.
- Zainal, N., Arifin, H.H., Zardasti, L., Yahaya, N., Lim, K. S., Lai, J.W. and Md Noor, N. (2018). Tensile Properties of Epoxy Grout Incorporating Graphene Nanoplatelets for Pipeline Repair. *J.M.W.C.* 203, 06012.
- Zarei, M.S., Kolahchi, R., Hajmohammad, M.H. and Maleki, M. (2017). Seismic response of underwater fluid-conveying concrete pipes reinforced with SiO₂ nanoparticles and fiber reinforced polymer (FRP) layer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 103, 76-85.
- Zhang, Q., Qiao, Y., Zhu, J., Li, Y., Li, C., Lin, J., Li, X., Han, H., Mao, J., Wang, F. and Wang, L. (2021). Electroactive and antibacterial surgical sutures based on chitosan-gelatin/tannic acid/polypyrrole composite coating. *Composites Part B: Engineering*, 223, 109140.
- Zhang, S., Chen, S., Yang, F., Hu, F., Yan, B., Gu, Y., Jiang, H., Cao, Y. and Xiang, M. (2019). High-performance electrochromic device based on novel polyaniline nanofibers wrapped antimony-doped tin oxide/TiO₂ nanorods. *Organic Electronics*, 65, 341-348.