

Enerji Uygulamaları İçin Polimer–MOF’lar (Metal-Organik İskeletler)

Nihal Deligönül¹

Özet

Sürdürülebilir enerji çözümlerine artan talep, enerji depolama ve dönüşümü için ileri malzemelerin araştırılmasını teşvik etmiştir. Geleneksel malzemeler sıklıkla düşük yüzey alanı, sınırlı ayarlanabilirlik ve sınırlı mekanik stabilite gibi kısıtlamalarla karşı karşıyadır. Metal-organik çerçeveler (MOF’lar) ve polimer bazlı hibritleri bu konuda çok yönlü bir çözüm sunar. MOF’lar yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir gözeneklilik ve çok işlevli özellikler sağlayarak piller, süperkapasitörler, gaz adsorpsiyonu ve fotokataliz gibi uygulamalara uygun hâle gelir.

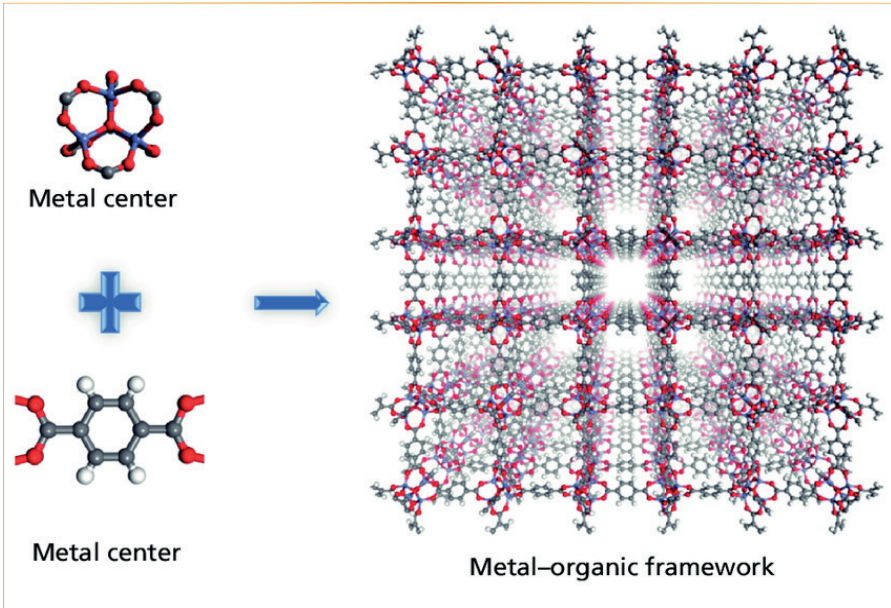
Polimerler ise esneklik, kimyasal ayarlanabilirlik ve işlenebilirlik katarak MOF hibritlerinde mekanik stabiliteyi ve arayüz uyumluluğunu artırır. Bu polimer–MOF malzemeler, MOF’un gözenekliliği ve aktivitelerini polimerin iletkenliği ve dayanıklılığı ile sinerjik şekilde birleştirerek iyonik/elektronik taşıma, döngü stabilitesi ve yapısal sağlamlığı iyileştirir. Uygulama alanları arasında gaz depolama ve ayırma (H_2 , CH_4 , CO_2), enerji depolama, enerji dönüşümü (yakıt hücreleri, fotokataliz) ve katalitik süreçler yer alır.

Potansiyeline rağmen, uzun dönem stabilite, ölçeklenebilir sentez, tekrarlanabilirlik ve MOF’un intrinsik iletkenliği hâlâ önemli zorluklar olarak durmaktadır. Gelecek yönelimler arasında esnek/giyilebilir cihazlar, katı elektrolitler, 2D veya katmanlı MOF’lar, çevre dostu sentez yöntemleri ve çok işlevli hibritler öne çıkmaktadır. Bu zorlukların aşılması, polimer–MOF hibritlerinin sürdürülebilir ve yüksek performanslı enerji teknolojileri için temel malzemeler hâline gelmesini sağlayacaktır.

1 Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, nihal.deligonul@gop.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-7381-2611

1. Giriş

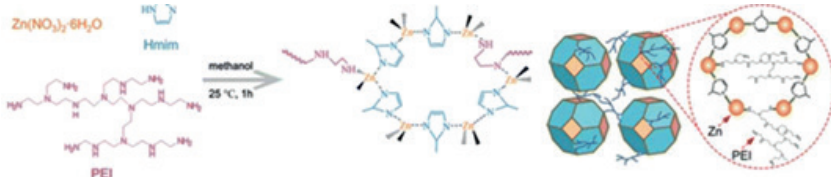
Sürdürülebilir ve verimli enerji çözümlerine yönelik küresel talep, enerji depolama ve dönüşümü alanında ileri malzemeler üzerine kapsamlı araştırmaları teşvik etmiştir. Geleneksel enerji malzemeleri sıklıkla düşük yüzey alanı, sınırlı kimyasal ayarlanabilirlik, çok işlevlilik eksikliği ve yetersiz mekanik kararlılık gibi kısıtlamalarla karşılaşır. Bu sınırlamaları aşmak için, yapısal ve fonksiyonel özellikleri özenle tasarlanmış yenilikçi malzemelere ihtiyaç vardır. Bu bağlamda, metal-organik çerçeveler (MOF’lar) ve bunların türevleri ile kompozitleri son derece esnek ve çok yönlü platformlar olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1.1). Kristal gözenekli yapıları, ayarlanabilir kimyasal bileşimleri ve çok işlevli özellikleri, MOF’ları piller, süperkapasitörler, gaz adsorpsiyonu ve fotokataliz gibi geniş bir enerji uygulamaları yelpazesi için uygun hâle getirir. MOF’lar, yüksek düzeyde organize ve ayarlanabilir bir iskelet sağlayarak, geleneksel malzemelerin karşılaştığı temel kısıtlamaları aşmakta ve gelecek nesil enerji cihazlarının tasarımında yeni fırsatlar sunmaktadır (Cui et al., 2025; Durán-Egido et al., 2025; Ismail et al., 2025; Yang et al., 2024).



Şekil 1.1. Bir MOF kafesinin gözenekli kristal yapı

Polimerler, enerji malzemelerinin geliştirilmesinde, doğal esneklikleri, kimyasal ayarlanabilirlikleri ve kolay işlenebilirlikleri sayesinde benzersiz

avantajlar sunar. Kompozitlere dahil edildiklerinde mekanik sağlamlık, yapısal bütünlük ve uyarlanabilir fonksiyonel özellikler sağlayabilirler. Enerji uygulamalarında polimerler, iyonik iletkenliği artıran, ara yüzey direncini azaltan ve cihazların genel kararlılığını iyileştiren katı hal elektrolitleri için etkili matrisler olarak görev yapar. Çok yönlü kimyasal yapıları, fonksiyonel grupların veya çapraz bağlama stratejilerinin eklenmesine olanak tanır; bu sayede MOF'lar gibi diğer bileşenlerle etkileşimleri optimize ederek hibrit malzemeleri belirli uygulamalara uyarlamak mümkündür. MOF'lar, metal iyonları veya kümelerinin organik bağlantılayıcılarla koordine edilmesiyle oluşan kristal yapıları, yüksek gözenekli üç boyutlu malzemelerdir. Yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir gözenek boyutu, kristallik ve kimyasal fonksiyonellik gibi ayırt edici özellikleri, onları enerji uygulamaları için son derece cazip kılar. MOF'lar, iyon taşınımı, kataliz, gaz depolama ve enerji dönüşümü süreçlerini kolaylaştırabilir. Ancak, saf MOF'lar genellikle düşük elektriksel iletkenlik, sınırlı mekanik kararlılık ve döngüsel koşullar altında zorluklar gibi problemlerle karşılaşır; bu da cihazlarda doğrudan kullanılmalarını sınırlayabilir. Bu sınırlamalar, MOF'ları diğer fonksiyonel bileşenlerle entegre ederek performanslarını artıracak kompozit malzemelerin geliştirilmesini motive etmektedir (Schmidt & Schmidt, 2020; W. Wang et al., 2024; Y. Wang et al., 2024a).



Şekil 1.2. Zn(II)-Temelli Metal-Organik Çerçeve (MOF) ve PEI Polimeri ile Hibrit Yapı Sentezi ve Mekanizması

Polimer ve MOF kombinasyonu, her iki bileşenin avantajlarını sinerjik şekilde birleştiren hibrit malzemeler oluşturur (Şekil 1.2). Polimer-MOF hibritleri, MOF'ların yüksek gözenekliliğini, yüzey alanını ve katalitik aktivitesini korurken, polimerlerin mekanik esnekliği, işlenebilirliği ve kimyasal ayarlanabilirliğinden faydalanır. Bu sinerji, iyileştirilmiş iyonik iletkenlik, daha yüksek kapasitans, daha iyi döngüsel stabilite ve mekanik sağlamlık gibi geliştirilmiş performans özelliklerine dönüşür. Bu hibritler, iletkenlik, kararlılık ve esneklik gibi gereksinimlerin birleşimini karşılamakta zorlanan geleneksel malzemelere kıyasla, katı hal elektrolitleri, esnek enerji depolama cihazları ve giyilebilir elektronikler için özellikle umut vericidir. Polimer zincirleri ile MOF iskeletleri arasındaki ayarlanabilir etkileşimler,

yük taşınımını, ara yüzey özelliklerini ve yapısal bütünlüğü hassas şekilde kontrol etmeye olanak tanır ve özelleştirilmiş enerji cihazlarının tasarımına imkân sağlar.

2. Polimerler, MOF'lar ve Kombinasyonlarının Temelleri

2.1. Enerji ile İlgili Polimer Özellikleri

Polimerler, yapısal esneklikleri, ayarlanabilir fiziko-kimyasal özellikleri ve büyük ölçekli üretime uyumları sayesinde modern enerji teknolojilerinde merkezi bir rol oynar. Katı hâl piller ve yakıt hücrelerinden süperkapasitörlere ve esnek enerji hasadı sistemlerine kadar pek çok uygulamada bir polimerin performansı temelde dört ana özelliğine dayanır: esneklik, iyonik/elektriksel iletkenlik, kimyasal kararlılık ve kolay üretim. Bu bağlamda özellikle PEO (polyethylene oxide), PEDOT (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) ve PVK (poly(vinyl carbazole)) gibi yaygın sistemler dikkat çeker. Polimerlerin enerji sistemlerindeki belirgin avantajlarından biri, zincir segmentlerinin hareketliliğinden kaynaklanan mekanik esnekliktir; bu özellik, malzemelerin kırılmadan bükülmesine, gerilmesine ve düzensiz yüzeylere uyum sağlamasına olanak tanır. Esneklik, katı polimer elektrolitlerinde elektrot arayüzleriyle iyi temas, giyilebilir veya bükülebilir enerji cihazlarında mekanik dayanım ve MOF-polimer hibritlerinde MOF kristallerinin gevrekliğini telafi etmek açısından kritiktir. PEO ve PVK yüksek zincir hareketliliği sayesinde ince ve esnek filmler oluşturabilirken, nispeten daha rijit yapıları PEDOT kompozitler, katkı maddeleri veya elastomer karışımlarıyla oldukça esnek hâle getirilebilir.

İyonik ve elektriksel iletkenlik, enerjiyle ilişkili polimerlerin işlevlerinin temel belirleyicilerindendir. PEO, eter oksijen gruplarının Li^+ ve diğer katyonlarla koordinasyonu sayesinde yaygın olarak çalışılan bir polimer elektrolittir ve amorf bölgelerindeki segmental hareketlilik iyon taşınımını destekler. PEDOT ve PVK gibi iletken polimerler ise π -konjuge omurgaları boyunca delokalize yük taşıyıcıları ile elektronik iletkenlik sağlar. PEDOT (özellikle PEDOT:PSS formunda) süperkapasitörlerden enerji hasat cihazlarına kadar pek çok alanda kullanılan yüksek iletkenliğe sahip bir malzemedir; iletkenliği dopantlar, işleme katkıları veya MOF/karbon yapılarıyla birleştirme yoluyla ayarlanabilir. PVK doğal hâliyle yüksek iletken olmasa da katkıma veya foto-uyarılma durumlarında etkin yük taşınımı sağlayarak özellikle optoelektronik ve fotovoltaiik uygulamalarda önemli bir rol oynar. Bu polimerlerdeki iyonik ve elektronik yolların bir arada bulunabilmesi, hibrit elektrolitlerde karma iletkenlik veya elektrot kaplamalarında hızlı yük transferi gibi gelişmiş enerji işlevlerini mümkün kılar (Şekil 1.3) (Dëdek et al., 2022a; Kermanshahi et al., 2025; Wu et al., 2025).



Şekil 1.3. CP, MOF ve MOF@CP Sinerjik Özelliklerinin Şematik Görünümü

Kimyasal kararlılık, polimer tabanlı enerji bileşenlerinin uzun vadeli güvenilirliği için kritik bir özelliktir. Enerji cihazları yüksek sıcaklık, nem, oksidatif ortamlar veya reaktif türler gibi zorlu koşullarda çalıştığından, kullanılan polimerlerin zincir kırılması, oksidasyon veya hidroliz gibi bozunma mekanizmalarına karşı direnç göstermesi gerekir. PEO birçok pil ortamında kararlı olmakla birlikte zamanla kristalleşmeye eğilimlidir; çapraz bağlama veya karışım yöntemleri bu durumu iyileştirir. PEDOT, süperkapasitör ve elektrokimyasal sistemlerde çoklu döngüler boyunca işlevini sürdürebilen yüksek redoks kararlılığıyla bilinir. PVK ise aromatik yapısının sağladığı fotokimyasal ve termal dayanım nedeniyle güneş enerjisi ve optoelektronik uygulamalarda güvenilir performans sunar. Polimerlerle MOF'ların birleştirilmesi, MOF partiküllerinin stabilize edici dolgu görevi görmesi veya polimerlerin metal merkezleri pasive etmesi gibi ek kararlılık avantajları da sağlar. Polimerlerin enerji uygulamalarındaki en cazip özelliklerinden biri de kolay işlenebilirlik ve ölçeklenebilirliktir. Yüksek sıcaklık veya basınç gerektiren inorganik malzemelerin aksine polimerler çözelti dökümü, elektrospindleme, yüzeyde veya gözenek içinde in situ polimerizasyon, baskı ve kaplama teknikleri gibi düşük maliyetli yöntemlerle üretilebilir. PEO bazlı elektrolitler basitçe polimer ve tuzun çözülmesi ve solventin buharlaştırılmasıyla hazırlanabilir; PEDOT:PSS su bazlı olması sayesinde geniş alanlı iletken kaplamalar için uygundur; PVK ise spin-

coating veya baskı teknikleriyle kolaylıkla işlenebilir ve bu durum güneş pilleri ve LED'ler gibi cihazların ölçeklenebilir üretimine katkıda bulunur (Durán-Egido et al., 2025; Namsheer & Rout, 2021; Prunet et al., 2021).

Sonuç olarak, enerji teknolojilerinde kullanılan polimerler mekanik esneklik, ayarlanabilir iyonik/elektriksel iletkenlik, yüksek kimyasal kararlılık ve basit-ölçeklenebilir üretim gibi benzersiz özellikleri bir araya getirir. Bu özellikler polimerleri hem geleneksel hem de yeni nesil enerji cihazları için vazgeçilmez kılar. Ayrıca polimerlerin yüksek yüzey alanlı ve düzenli yapıları MOF'larla birleştirilmesi, bu özelliklerin daha da geliştirilmesine ve sinerjik avantajlara sahip üstün hibrit malzemelerin ortaya çıkmasına olanak tanır.

2.2 Enerji ile İlgili MOF Özellikleri

Metal-organik kafesler (MOF'lar), enerji, çevre ve adsorpsiyon uygulamaları için en umut verici malzeme sınıflarından biri olarak öne çıkar; bunun nedeni yapısal ve kimyasal özelliklerinin benzersiz birleşimidir. MOF'lar yüksek yüzey alanı, iyi tanımlanmış ve ayarlanabilir gözenek yapısı, değiştirilebilir metal merkezleri ve fonksiyonelleştirilebilir organik bağlayıcılar gibi temel özelliklere sahiptir. Bu özellikler, onları enerjiyle ilgili uygulamalar için son derece çekici hâle getirir. MOF'ların en belirgin avantajlarından biri, olağanüstü büyük iç yüzey alanıdır. Metal düğüm kümeleri ve organik bağlayıcılarla inşa edilen MOF'lar, son derece gözenekli ve açık çerçeve yapıları oluşturur; bu, geleneksel gözenekli malzemelerin (aktif karbonlar, zeolitler vb.) çok ötesinde yüzey alanı sağlar. Yüksek yüzey alanı, adsorpsiyon, konuk-madde etkileşimleri, iyon taşınımı veya katalitik reaksiyonlar için geniş iç arayüzler sunar. Enerji uygulamalarında, örneğin gaz depolama (H_2 , CH_4), CO_2 yakalama veya piller ve süperkapasitörlerde iyon depolama gibi alanlarda, büyük yüzey alanı birim kütle başına yüksek kapasite ve aktif bölgelerin verimli kullanılmasını sağlar. Bu nedenle MOF'lar, yüksek adsorpsiyon kapasitesi veya yoğun etkileşim gerektiren uygulamalarda mükemmel iskelet veya taşıyıcı görevi görür ve birçok geleneksel malzemeyi geride bırakır (Sher et al., 2024).

MOF'lar sadece gözenekli olmakla kalmaz, aynı zamanda metal düğümler, organik bağlayıcılar ve sentez koşullarının seçimiyle gözenek boyutları, şekilleri ve topolojisi üzerinde hassas kontrol sağlar. Bu ayarlanabilirlik, mikrogözeneklerden (<2 nm) mezogözeneklere (2–50 nm) kadar ve gelişmiş sistemlerde hiyerarşik çok ölçekli gözenekliliğe (mikro + mezo + makro) olanak tanır. Bu tanımlı gözenek yapısı, boyut, şekil veya kinetik/termodinamik uyumluluğa göre konuk türlerin seçici adsorpsiyonu ve ayrımı, hiyerarşik yapı sayesinde hızlı difüzyon ve taşınım, ayrıca büyük veya

işlevsel moleküllerin gözeneklere yerleşmesi gibi avantajlar sağlar. Böylece MOF'lar, gaz ayrımı, kataliz, depolama ve hibrit malzeme tasarımı gibi çok çeşitli enerji ve adsorpsiyon görevleri için özelleştirilebilir (Sandhu et al., 2024).

MOF'lardaki metal düğümler, yapısal omurga oluşturma yanısıra çerçevenin kimyasal reaktivitesini ve redoks özelliklerini de belirler. Farklı metal türleri (ör. Zn, Zr, Cu, Fe) veya karışık metal kompozisyonları seçilerek redoks davranışı, katalitik aktivite, bağlanma afinitesi ve kimyasal kararlılık gibi özellikler ayarlanabilir. Metal merkezlerinin bu şekilde ayarlanabilir olması, enerji dönüşümü (elektrokataliz, su ayrıştırma, CO₂ indirgeme), redoks aracılı depolama ve yakıtla ilgili reaksiyonlar için katalitik veya redoks aktif bölgeler sağlarken, açık metal merkezleri gaz molekülleri (H₂, CO₂, CH₄) veya diğer konuklarla güçlü etkileşim kurarak adsorpsiyon kapasitesini ve seçiciliği artırır. Ayrıca, metal seçimine bağlı olarak MOF'ların kimyasal ve termal kararlılığı optimize edilebilir, bu da gerçek dünyadaki enerji uygulamaları için kritik bir faktördür (Dedek et al., 2022b). MOF'lardaki organik bağlayıcılar yalnızca yapısal boşluklar sağlamakla kalmaz; aynı zamanda gözeneklere istenilen etkileşimleri, kimyasal ortamları veya işlevsel özellikleri kazandırmak için kimyasal “kulp” görevi görür. Bağlayıcılara polar fonksiyonel gruplar (–NH₂, –OH, –COOH), heteroatomlar, aromatik halkalar veya diğer fonksiyonel moceküller eklenebilir. Bu sayede adsorpsiyon seçiciliği, kimyasal reaktivite, katalitik potansiyel ve çerçevenin stabilitesi gibi özellikler ayarlanabilir. Bağlayıcıların seçimi veya modifikasyonu, MOF'ların belirli uygulamalara göre “programlanmasına”, moleküler düzeyde kimyasal ortamın şekillendirilmesine ve hibrit malzemelerin entegrasyonuna imkân tanır. Tüm bu özelliklerin birleşimi — yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir ve hiyerarşik gözeneklilik, değiştirilebilir metal merkezleri ve fonksiyonelleştirilebilir bağlayıcılar — MOF'ları son derece çok yönlü bir platform hâline getirir. Bu çok yönlülük, yüksek kapasiteli gaz veya yakıt depolama ve ayrımı, metal merkezler ve özel gözenek ortamları kullanarak kataliz ve enerji dönüşümü, polimerler, iletken dolgu maddeleri, elektrolitler, katalizörler veya diğer işlevsel bileşenlerin entegre edilebileceği hibrit malzemeler için taşıyıcı iskeletler, gaz filtreleme ve CO₂ yakalama gibi seçici membran ve filtre uygulamaları ile enerji depolama cihazlarında verimli iyon ve konuk madde yerleşimi gibi çok sayıda uygulamada avantaj sağlar. Sistematik incelemeler ve kritik değerlendirmeler, doğru tasarım ve sentezle MOF'ların geleneksel gözenekli malzemelere kıyasla enerjiyle ilişkili uygulamalarda önemli ölçüde üstün performans sergileyebileceğini göstermektedir (Feng et al., 2019; Tao & Xu, 2024).

2.3 Polimer–MOF Hibritlerinin Avantajları

Polimerlerin metal-organik kafesler (MOF’lar) ile entegrasyonu, enerjiyle ilişkili malzemelerin geliştirilmesinde son derece umut verici bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Polimer–MOF hibritleri, her iki bileşenin benzersiz özelliklerini sinerjik olarak birleştirerek, bir dizi kritik parametrede geliştirilmiş performans sağlar. MOF’lar olağanüstü yüksek yüzey alanları ve ayarlanabilir gözeneklilikleriyle bilinir; ancak organik bağlayıcıları ve metal düğümleri nedeniyle doğal elektriksel iletkenlikleri genellikle sınırlıdır. Polimetilen oksit (PEO), poli(3,4-etilendioksitofen) (PEDOT) veya poli(vinil karbazol) (PVK) gibi iletken polimerlerin MOF matrislerine eklenmesi, hem elektriksel hem de iyonik iletkenliği önemli ölçüde artırır. İletken polimerler sürekli elektron yolları sağlar ve hibrit malzeme içinde daha hızlı yük taşınımına olanak tanır. Bu geliştirme, yüksek iletkenliğin doğrudan daha iyi enerji ve güç yoğunluklarına dönüştüğü piller ve süperkapasitörler gibi uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Son çalışmalar, polimer infiltrasyonu veya MOF gözeneklerine bağlanmasının, elektron ve iyon hareketini kolaylaştıran perkolasyon ağları oluşturabileceğini ve saf MOF’larda tipik olan iletkenlik sınırlamasını aşabileceğini göstermektedir (Dëdek et al., 2022b; Ma et al., 2025a).

Saf MOF kristalleri genellikle kırılgandır ve mekanik stres veya termal döngüleme altında bozulabilir; bu da pratik kullanımlarını sınırlar. Polimerler esneklik ve dayanıklılık sağlayarak hibritin mekanik bütünlüğünü iyileştirir. Bu etki, polimerlerin termal genleşme ve büzölmeye tampon görevi görmesi nedeniyle termal kararlılığı da artırır; tekrarlayan kullanımlar sırasında çatlama veya parçalanma olasılığı azalır. Ortaya çıkan polimer–MOF kompozitleri, esnek veya giyilebilir cihazlar için daha uygundur ve daha zorlu çalışma ortamlarına dayanabilir. Örneğin, MOF partiküllerine polimer kaplama veya kabuk eklenmesi, termal ve mekanik stres altında kristallik ve gözenekliliğin korunmasına yardımcı olur (Ma et al., 2025a).

Enerji depolama cihazlarında uzun vadeli çevrim kararlılığı hayati öneme sahiptir. Polimer–MOF hibritleri, artırılmış iletkenlikleri, mekanik dayanıklılıkları ve şarj/deşarj döngüleri sırasında hacim değişimlerini karşılayabilme yetenekleri sayesinde geliştirilmiş çevrim performansı sergiler. Polimer matrisi MOF parçacıklarının kümelenmesini önler ve yapısal bozulmayı azaltırken verimli iyon taşınımını sürdürür. Bu hibritler, saf MOF veya polimer elektrotlara kıyasla kapasite kaybını azaltır ve uzun döngü ömrü sunar. Ayrıca polimerler, stabil katı elektrolit ara yüzlerinin oluşmasını kolaylaştırarak pil güvenliğini ve performansını artırır.

MOF'ların en önemli avantajlarından biri, gaz moleküllerinin seçici olarak adsorbe edilmesine olanak tanıyan son derece ayarlanabilir gözenek yapılarıdır; bu gazlar arasında hidrojen (H_2), metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) yer alır. Polimerlerle birleştiğinde, bu hibritler seçici gaz alımı ve ayrımı gerçekleştirebilir ve stabilite ile işlenebilirlik açısından avantaj sağlar. Polimerler, yüzey kimyasını özelleştirebilir, istenmeyen difüzyon yollarını engelleyebilir veya MOF gözenekliliğini ve seçiciliğini koruyan koruyucu matrisler olarak işlev görebilir. Bu hibritler, gaz depolama, yakıt saflaştırma ve karbon-nötr enerji teknolojileri için CO_2 yakalama gibi uygulamalarda umut vadeder (Dedek et al., 2022a; Kalaj et al., 2020).

3. Polimer–MOF Hibritlerinin Enerji Uygulamaları

Polimerler ve metal-organik kafesler (MOF'lar) bir araya getirildiğinde, gaz/yakıt depolama ve ayrımı, enerji depolama (piller ve süperkapasitörler), enerji dönüşümü (yakıt hücreleri, güneş/ fotokataliz) ve enerji toplama veya katalitik süreçler gibi geniş bir enerji uygulamaları yelpazesi için son derece esnek ve çok yönlü bir platform oluştururlar. Polymer–MOF hibritleri, her iki bileşenin benzersiz özelliklerini birleştirerek performansı artırır: MOF'lar yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir gözenek yapısı, fonksiyonelleştirilebilir metal merkezleri ve organik bağlayıcılarla gaz depolama ve ayrımı, kataliz, enerji dönüşümü ve depolama için ideal iskeletler sağlar. Polimerler ise mekanik esneklik, iletkenlik, işlenebilirlik ve çevresel kararlılık kazandırarak, hibrit malzemelerin gerçek dünya uygulamalarına uygun hale gelmesini sağlar .

Gaz depolama ve ayrımında, polimer–MOF hibritleri özellikle hidrojen (H_2), metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) için dikkat çekicidir. MOF'ların yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve seçici gözenek kanalları, polimer matrisle birleştirildiğinde mekanik dayanıklılık, işlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik sunar; bu, tanklar, membranlar veya ayırma üniteleri gibi pratik uygulamalar için önemlidir. Karma polimer-MOF membranlar (mixed-matrix membranes, MMM) CO_2/CH_4 seçiciliği ve permeabilitiyi artırırken, arayüz kusurlarını ve plastikleşmeyi azaltır.

Enerji depolama uygulamalarında, saf MOF'lar düşük elektriksel iletkenlik ve sınırlı yük taşıma kapasitesi nedeniyle doğrudan elektrot veya elektrolit olarak kullanılamaz. Hibritleşme, iletken polimerler veya polimer matrisine gömülü MOF malzemeleri aracılığıyla bu sınırlamaları aşar, böylece süperkapasitörlerde spesifik kapasite, hız performansı ve döngü stabilitesi artar. Benzer şekilde, hibrit polimer–MOF kompozit elektrolitler, iyon taşınımını iyileştirir, iyon kanallarını düzenler ve dendrit

oluşumu veya elektrolit bozunumu gibi sorunları azaltabilir. MOF kaynaklı gözenekli karbonlar, iletken polimer kaplamalar veya kompozit mimarilerle birleştirildiğinde yüksek kapasiteli elektrotlar veya süperkapasitör malzemeleri için ideal bir yol sunar (Ma et al., 2025b; Y. Wang et al., 2024b).

Enerji dönüşümü alanında, polimer–MOF hibritleri proton iletken membranlar, güneş-yakıt üretimi, fotokataliz ve diğer katalitik enerji süreçlerinde etkili özellikler gösterir. MOF’ların gözenekli yapısı ve proton iletken yolları, polimer matrisle birleştirildiğinde su tutma, proton hareketliliği ve mekanik dayanıklılığı artırarak yakıt hücreleri veya akışkan pillerin performansını yükseltebilir. MOF kaynaklı gözenekli metal-oksit filmler ise ışık absorplayıcılar için stabil bir iskelet sağlayarak fotovoltaiik ve fotoelektrokimyasal uygulamalarda yük taşıma ve ayrımı destekler. Ayrıca hibritler, katalitik veya adsorpsiyon aktif çerçeveleri polimer veya karbon iletken ağlarla birleştirilerek etkin elektron/proton iletimi, yapısal sağlamlık ve üretilebilirlik sağlar.

Enerji toplama ve kataliz uygulamalarında (termoelektrik, piezoelektrik, OER/HER, CO₂ indirgeme, biyokütle dönüşümü), polimer–MOF hibritleri mekanik ve termal stabiliteyi artırır, çevresel dayanıklılığı geliştirir ve elektriksel özellikleri iyileştirir. MOF metal merkezleri katalitik olarak aktif kalarken, polimer veya karbon matrisler iletkenlik ve yapısal bütünlüğü destekler. Bu hibrit yaklaşım, yüksek yüzey alanı, katalitik merkezler ve iletken yolları bir araya getirerek çok işlevli sistemler oluşturur; adsorpsiyon, kataliz ve iletimi tek bir malzemede birleştirmek mümkün olur (Dėdek et al., 2022c; Szcze’sniak et al., 2025).

Her ne kadar polimer–MOF hibritleri büyük potansiyele sahip olsa da, pratik uygulamalara geçişte üretim, stabilite ve performans sorunları gibi zorluklar bulunmaktadır. Kompozit elektrolitlerde MOF dolgu maddelerinin polimer zincir dinamiği ve iyon taşınımına etkisi tam olarak anlaşılmamış, gaz ayırım membranlarında uzun dönem kararlılık ve endüstriyel koşullarda yeniden üretilebilirlik hâlâ sorun teşkil etmektedir. MOF tabanlı elektrotlarda düşük iletkenlik hâlen bir sınırlamadır; hibritleşme yardımcı olsa da homojen perkolasyon ve arayüz kalitesini sağlamak zordur (Ma et al., 2025b; Y. Wang et al., 2024b).

Genel olarak, polimer–MOF hibritleri MOF’ların adsorpsiyon, gözeneklilik, katalitik potansiyel ve yüksek yüzey alanını polimerlerin iletkenlik, esneklik, işlenebilirlik ve mekanik kararlılığı ile birleştirilerek, saf MOF veya saf polimerin sınırlamalarını aşar. Gaz/yakıt depolama ve ayrımı, piller, süperkapasitörler, yakıt hücreleri, fotokatalitik H₂ üretimi, kataliz ve enerji toplama gibi uygulamalarda, bu hibrit malzemeler sürdürülebilir

ve düşük karbonlu bir enerji geleceğinde önemli rol oynama potansiyeline sahiptir. Araştırmalar arayüz uyumu, uzun dönem stabilite, ölçek büyütme ve yeniden üretilebilirlik gibi kalan zorlukları çözdükçe, hibritlerin daha fazla demo ve ticari ölçekli uygulamaları ortaya çıkacaktır.

4. Zorluklar ve Gelecek Yönelimler

Polimer–MOF hibritleri enerji uygulamaları için büyük bir potansiyel taşıırken, laboratuvar ölçeğindeki başarıları gerçek dünya teknolojilerine taşımak için aşılması gereken birkaç kritik zorluk bulunmaktadır. MOF’lar çoğu zaman nem, su veya elektrokimyasal olarak agresif koşullara karşı hassastır; pil döngüsü veya yakıt hücresi çalışması sırasında maruz kalınan reaktif türler MOF kristal yapısının bozulmasına, gözeneklerin çökmesine veya metal merkezlerin çözülmesine yol açabilir. Polimerle birleştirildiğinde, hibrit arayüz bu kararlılık sorunlarını daha da artırabilir. Bu nedenle, gerçek çalışma koşulları altında uzun dönem kimyasal, termal ve elektrokimyasal stabilite sağlamak hâlâ bir zorluktur (Argirusis et al., 2025). Hibrit malzemelerin etkin olması, polimer matrisi ile MOF çerçevesi arasında yakın temas ve iyi uyumluluk gerektirir. Birçok bildirilen kompozitte arayüz kusurları, zayıf yapışma veya düzensiz dağılım gözlemlenmiştir; bu durum iyon/elektron taşınımını, mekanik bütünlüğü ve homojen performansı olumsuz etkiler. Fonksiyonelleştirme, uyum sağlayıcılar veya yüzey graftlama gibi yöntemlerle moleküller arası etkileşimleri optimize etmek ve homojen, kusursuz arayüzler oluşturmak önemlidir, ancak özellikle büyük ölçeklerde zordur (Cao et al., 2022). Laboratuvar ölçeğinde iyi performans gösteren hibritler, endüstriyel üretime ölçeklendirildiğinde yeni zorluklarla karşılaşır. Üretimde tekrar edilebilirlik, yüksek kaliteli MOF temini, çözücü kullanımı ve çevresel etkiler ile büyük alanlı filmler, membranlar veya hacimsel kompozitler için uygun üretim yöntemleri hâlâ sorun teşkil etmektedir. Ölçeklenebilir ve maliyet-etkin sentez ve işleme yöntemleri olmadan, polimer–MOF hibritleri akademik prototiplerin ötesine geçemez (Lacim et al., 2025; Pander et al., 2023; Vrtovec et al., 2023).

Elektriksel iletkenlik açısından birçok MOF hâlâ yalıtkan özelliktedir. İletken polimerler veya dolgu maddeleri bu sorunu kısmen telafi etse de, ideal olarak MOF’un kendisi ya da türevleri iyonik/elektronik iletimi desteklemelidir. Gözenekliliği ve yapısal stabiliteyi koruyan intrinsik iletken veya redoks-aktif MOF’ların geliştirilmesi, yüksek performanslı hibrit elektrotlar, katı elektrolitler ve elektrokimyasal cihazlar için acil bir ihtiyaçtır.

Geleceğe baktığımızda, polimer–MOF hibritlerinde birkaç umut verici yön öne çıkmaktadır: esnek ve giyilebilir enerji cihazları, MOF gözenekliliği

ile polimer ağ stabilitesini birleştiren katı elektrolitler, 2D veya katmanlı MOF mimarileri, sürdürülebilir ve çevre dostu sentez yöntemleri, biyolojik kökenli polimerler ve çok işlevli hibrit sistemler (depolama + kataliz + ayırım gibi). Bu yönler, hibrit malzemelerin pratik uygulanabilirliğini ve performansını büyük ölçüde artırabilir.

5. Sonuç

Polimer–MOF hibritleri, MOF’ların yapısal ve kimyasal çeşitliliği ile polimerlerin esnekliği, işlenebilirliği ve genellikle iletkenliğinin sağladığı benzersiz bir sinerji sunar. Bu sinerji doğru şekilde kullanıldığında, yüksek gözeneklilik, ayarlanabilir fonksiyonellik, iletkenlik, mekanik dayanıklılık ve uygulamaya özel özellikler kazandırarak çok çeşitli enerji uygulamalarına uygun malzemeler ortaya çıkarır.

Gelecek nesil enerji sistemlerinde — ileri piller, süperkapasitörler, gaz depolama ve ayırım birimleri, yakıt hücreleri ve esnek/giyilebilir enerji cihazları dahil — polimer–MOF hibritleri benzersiz avantajlar sunar. Ancak bu potansiyelin ölçeklenebilir şekilde gerçekleştirilmesi için, gerçek dünya koşullarında stabilite, arayüz mühendisliği, üretim ölçeklendirmesi ve intrinsik iletken MOF geliştirilmesi gibi zorlukların aşılması gereklidir. Gelecek araştırmaların, yalnızca kademeli iyileştirmelerle sınırlı kalmaması önemlidir. Bunun yerine yenilikçi hibrit tasarım stratejileri, yeşil ve ölçeklenebilir sentez yöntemleri, 2D ve katmanlı MOF mimarileri ile çok işlevli kompozit sistemlere odaklanmalıdır. Bu çabalar sayesinde, polimer–MOF hibritleri sürdürülebilir ve yüksek performanslı enerji teknolojileri için temel malzemeler haline gelebilir.

Kaynakça

- Argirusis, C., Alizadeh, N., Katsanou, M. E., Argirusis, N., & Sourkouni, G. (2025). Advances in Metal-Organic Frameworks (MOFs) for Rechargeable Batteries and Fuel Cells. *Batteries* 2025, Vol. 11, Page 192, 11(5), 192.
- Cao, Z., Momen, R., Tao, S., Xiong, D., Song, Z., Xiao, X., Deng, W., Hou, H., Yasar, S., Altin, S., Bulut, F., Zou, G., & Ji, X. (2022). Metal-Organic Framework Materials for Electrochemical Supercapacitors. *Nano-Micro Letters* 2022 14:1, 14(1), 181.
- Cui, M., Pei, M., & Kim, S. (2025). Recent advances in metal-organic framework-based inorganic composite electrodes for capacitors: a comprehensive review. *Advances in Industrial and Engineering Chemistry* 2025 1:1, 1(1), 8-.
- Dědek, I., Kupka, V., Jakubec, P., Šedajová, V., Jayaramulu, K., & Otyepka, M. (2022a). Metal-organic framework/conductive polymer hybrid materials for supercapacitors. *Applied Materials Today*, 26, 101387.
- Dědek, I., Kupka, V., Jakubec, P., Šedajová, V., Jayaramulu, K., & Otyepka, M. (2022b). Metal-organic framework/conductive polymer hybrid materials for supercapacitors. *Applied Materials Today*, 26, 101387.
- Dědek, I., Kupka, V., Jakubec, P., Šedajová, V., Jayaramulu, K., & Otyepka, M. (2022c). Metal-organic framework/conductive polymer hybrid materials for supercapacitors. *Applied Materials Today*, 26, 101387.
- Durán-Egido, V., García-Giménez, D., Martínez-López, J. C., Pérez-Vidal, L., & Carretero-González, J. (2025). Metal-Organic Frameworks as Fillers in Porous Organic Polymer-Based Hybrid Materials: Innovations in Composition, Processing, and Applications. *Polymers* 2025, Vol. 17, Page 1941, 17(14), 1941.
- Feng, L., Wang, K. Y., Lv, X. L., Yan, T. H., & Zhou, H. C. (2019). Hierarchically porous metal-organic frameworks: synthetic strategies and applications. *National Science Review*, 7(11), 1743.
- Ismail, K. M., Hefnawy, M. A., Hassan, S. S., & Medany, S. S. (2025). Synergistic Integration Nanoarchitectonics of Zn-MOF and Poly(1-Amino-9, 10-anthraquinone) for Enhanced Capacitor Performance. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 2025, 1-17.
- Kalaj, M., Bentz, K. C., Ayala, S., Palomba, J. M., Barcus, K. S., Katayama, Y., & Cohen, S. M. (2020). MOF-Polymer Hybrid Materials: From Simple Composites to Tailored Architectures. *Chemical Reviews*, 120(16), 8267-8302.
- Kermanshahi, P. K., Estaji, S., Zivari, E., Moghari, S., Poshtahani, P. A., Mof-takhari, S., & Khonakdar, H. A. (2025). A comprehensive review on electroactive MOF-reinforced nanocomposites: From material design to practical applications. *Materials Today Sustainability*, 32, 101229.

- Lacim, H., Molahalli, V., Prajongthath, P., Pattanaporkratana, A., Pathak, G., Phetthong, B., Hongkarnjanakul, N., & gptham, N. (2025). Porosity Tunable Metal-Organic Framework (MOF)-Based Composites for Energy Storage Applications: Recent Progress. *Polymers* 2025, Vol. 17, Page 130, 17(2), 130.
- Ma, R., Hou, Y., Zhang, W., Pan, Y. T., Huo, S., & Shi, C. (2025a). MOF-based nanocomposites in polymer matrix: progress and prospects. *Advanced Composites and Hybrid Materials* 2025 8:5, 8(5), 351-.
- Ma, R., Hou, Y., Zhang, W., Pan, Y. T., Huo, S., & Shi, C. (2025b). MOF-based nanocomposites in polymer matrix: progress and prospects. *Advanced Composites and Hybrid Materials* 2025 8:5, 8(5), 351-.
- Namsheer, K., & Rout, C. S. (2021). Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC Advances*, 11(10), 5659–5697.
- Pander, M., Gil-San-Millan, R., Delgado, P., Perona-Bermejo, C., Kostrzewa, U., Kaczkowski, K., Kubicki, D. J., Navarro, J. A. R., & Bury, W. (2023). MOF/polymer hybrids through in situ free radical polymerization in metal-organic frameworks. *Materials Horizons*, 10(4), 1301–1308.
- Prunet, G., Pawula, F., Fleury, G., Cloutet, E., Robinson, A. J., Hadziioannou, G., & Pakdel, A. (2021). A review on conductive polymers and their hybrids for flexible and wearable thermoelectric applications. *Materials Today Physics*, 18, 100402.
- Sandhu, Z. A., Raza, M. A., Awwad, N. S., Ibrahim, H. A., Farwa, U., Ashraf, S., Dildar, A., Fatima, E., Ashraf, S., & Ali, F. (2024). Metal–organic frameworks for next-generation energy storage devices; a systematic review. *Materials Advances*, 5(1), 30–50.
- Schmidt, B. V. K. J., & Schmidt, B. V. K. J. (2020). Metal-Organic Frameworks in Polymer Science: Polymerization Catalysis, Polymerization Environment, and Hybrid Materials. *Macromolecular Rapid Communications*, 41(1), 1900333.
- Sher, F., Hayward, A., El Guerraf, A., Wang, B., Ziani, I., Hrnjić, H., Boškailo, E., Chupin, A., & Nemțanu, M. R. (2024). Advanced metal–organic frameworks for superior carbon capture, high-performance energy storage and environmental photocatalysis – a critical review. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(41), 27932–27973.
- Szcze’śniak, S., Marcinkowska, A., Gajewski, P., Chen, T., Reddy, N. P., & Li, M. (2025). Enhancing Solid-State Li-Ion Batteries with MOF–Polymer Composite Electrolytes—Effect Mechanisms and Interface Engineering. *Gels* 2025, Vol. 11, Page 946, 11(12), 946.

- Tao, Y. R., & Xu, H. J. (2024). A critical review on potential applications of Metal-Organic frameworks (MOFs) in adsorptive carbon capture technologies. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121504.
- Vrtovec, N., Jurjevec, S., Zabukovec Logar, N., Mazaj, M., & Kovačič, S. (2023). Metal Oxide-Derived MOF-74 Polymer Composites through Pickering Emulsion-Templating: Interfacial Recrystallization, Hierarchical Architectures, and CO₂ Capture Performances. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(14), 18354–18361.
- Wang, W., Chen, D., Li, F., Xiao, X., & Xu, Q. (2024). Metal-organic-framework-based materials as platforms for energy applications. *Chem*, 10(1), 86–133.
- Wang, Y., Pan, T., Yuan, G., Li, Q., & Pang, H. (2024a). MOF and MOF-derived composites for flexible energy storage devices. *Composites Communications*, 52, 102144.
- Wang, Y., Pan, T., Yuan, G., Li, Q., & Pang, H. (2024b). MOF and MOF-derived composites for flexible energy storage devices. *Composites Communications*, 52, 102144.
- Wu, X., Kang, P., Zhang, Y., Guo, H., Yang, S., Zheng, Q., Wang, L., & Jiang, W. (2025). Highly electrically conductive MOF/conducting polymer nanocomposites toward tunable electromagnetic wave absorption. *Journal of Materials Science & Technology*, 205, 258–269.
- Yang, X., Cheng, T. C., & Morris, A. J. (2024). Polymer-grafted metal–organic frameworks: design, synthesis, and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 12(13), 4562–4592.