

İyonik Sıvı Esaslı Polimer Kompozitlerin Gelişimi ve Fonksiyonel Kullanım Alanları

Hüseyin Akbaş¹

Özet

Günümüzde iyonik sıvılar, çok yönlü ve yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesine olanak tanıyan yeni bir kimyasal bileşik sınıfı olarak dikkat çekmektedir. Düşük buhar basıncı, yüksek termal kararlılık, yanmazlık, güçlü iyonik iletkenlik ve geniş elektrokimyasal pencere gibi ayırt edici özellikleri nedeniyle iyonik sıvılara yönelik ilgi giderek artmaktadır. İyonik sıvıların özellikleri; katyon, anyon veya her ikisine birden belirli işlevsel grupların entegre edilmesiyle geniş bir yelpazede ayarlanabilir niteliktedir. İyonik sıvıların polimerlerle birleştirilmesi, iki bileşenin özgün özelliklerinin sinerjik şekilde birleşmesini sağlayarak akıllı ve fonksiyonel kompozit malzemelerin tasarımına olanak sunmaktadır. Hem iyonik sıvının hem de polimer matrisinin yapısal veya kimyasal olarak modifiye edilebilmesi, çok çeşitli fonksiyonel kompozitlerin elde edilmesine ve farklı uygulamaların özgül gereksinimlerine uygun malzemelerin geliştirilmesine imkân tanır. Bu doğrultuda, duyarlı ve hassas sensörler, aktüatörler, çevresel izleme sistemleri, piller, yakıt hücreleri ve biyomedikal teknolojiler başta olmak üzere çok geniş bir uygulama alanı için akıllı iyonik sıvı/polimer bazlı malzemeler tasarlanmakta ve geliştirilmektedir.

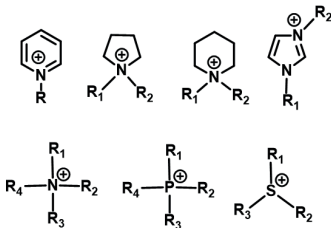
1. İyonik Sıvılar

İyonik sıvılar, anyon ve katyonlardan oluşan ve çoğunlukla 100 °C'nin altında erime sıcaklığına sahip iyonik bileşikler olarak tanımlanmaktadır (Coimbra vd. 2025). Erimiş sıvılar, 100 °C'nin üzerinde sıvı halde bulunanlar olarak tanımlanırken, iyonik sıvılar bu sıcaklığın altında sıvı halde bulunanlardır (Kianfar ve Mafi 2020). Bu sistemler, geniş bir çeşitlilikte organik katyonlar ile organik veya inorganik anyonları içerebilir. Şekil 1.1'de iyonik sıvıların sentezinde yaygın olarak kullanılan tipik katyon ve anyon türleri sunulmuştur. İyonik sıvılarda bulunan iyon çiftleri; hidrojen

1 Doç. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, huseyin.akbas@gop.edu.tr, ORSID ID: 0000-0002-3013-9033

bağları, Coulomb çekim kuvvetleri ve van der Waals etkileşimleri gibi çeşitli fiziksel etkileşimler aracılığıyla bir arada tutulmaktadır (Wei vd. 2023). İlk iyonik sıvı örneği olan etilamonyum nitrat (EAN), 1914 yılında Walden tarafından rapor edilmiştir (Welton 2018). Bunu takiben, 1970-1980 yılları arasında alüminyum halojenürlerin imidazolyum halojenürlerle reaksiyonu sonucu elde edilen alkilimidazolyum halojenoalüminat türleri, literatürde ‘birinci nesil’ iyonik sıvılar olarak tanımlanmıştır. **İyonik sıvıların gelişimi literatürde genel olarak dört nesil altında sınıflandırılmaktadır.** Birinci nesil iyonik sıvılar, temel olarak çevre dostu çözücüler olarak tasarlanmış ve düşük uçuculukları nedeniyle “yeşil çözücü” yaklaşımının öncülerini oluşturmuştur. **İkinci nesil** iyonik sıvılar, belirli katalitik süreçlerde ve elektrokimyasal sistemlerde kullanılmak üzere fonksiyonelleştirilmiş, uygulamaya özel özelliklerle geliştirilmiştir. **Üçüncü nesil** iyonik sıvılar ise biyolojik kaynaklı bileşenlerin dahil edilmesi ve görev-spesifik fonksiyonların kazandırılmasıyla biyomedikal, farmasötik ve çevresel uygulamalara yönelik olarak tasarlanmıştır. Son olarak, **dördüncü nesil** iyonik sıvılar, sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda biyolojik olarak parçalanabilirlik, çevresel uyumluluk ve çok işlevlilik gibi niteliklere odaklanarak geliştirilen yeni nesil iyonik sıvı sınıfını temsil etmektedir (Alreshidi vd. 2025).

KATYONLAR

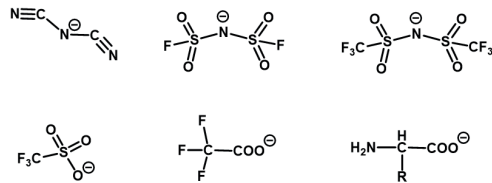


ANYONLAR

F^- , Cl^- , Br^- ,

BF_4^- , PF_6^- , NO_3^- ,

RSO_3^- , $RCOO^-$, $R_2PO_4^-$



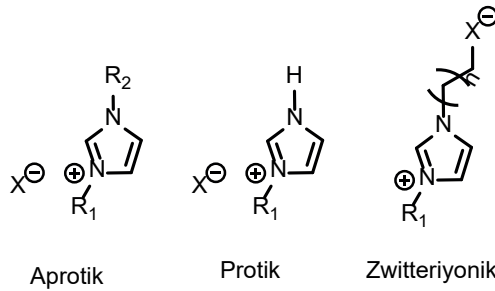
Şekil 1.1. İyonik sıvılarda bazı yaygın katyon ve anyonların yapıları

Genel olarak iyonik sıvılar, kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından konvansiyonel çözücülerden belirgin biçimde ayrılan bir dizi üstün nitelik sergiler (Mahmood vd. 2017; Usman vd. 2025). Bu özgün özellikler aşağıda özetlenmiştir:

- İhmal edilebilir düzeyde buhar basıncı, bu da uçuculuklarının son derece düşük olması nedeniyle güvenli kullanım ve çevresel açıdan avantaj sağlar.
- Yüksek iyonik iletkenlik ($\sim 10^{-3}$ - 10^{-2} S/cm aralığında), elektroaktif uygulamalarda etkin performans sunar.
- Görece yüksek viskozite ve yoğunluk, yapıdaki güçlü iyon-iyon etkileşimlerinin bir sonucudur.
- Organik, inorganik ve polimerik sistemlerle geniş çözünürlük ve karışılabilirlik, iyonik sıvıları çok yönlü çözücüler ve ortamlar hâline getirir.
- Yüksek termal kararlılık, çoğu iyonik sıvının 350 °C'nin üzerinde bozunmasıyla kendini gösterir.
- Geniş elektrokimyasal pencere (genellikle 4-6 V veya daha üzeri), elektrokimyasal cihazlarda kullanım alanını genişletir.
- Yanmazlık özellikleri, güvenlik açısından organik çözücülere kıyasla önemli bir avantaj sağlar.

Ayrıca, iyonik sıvılar organik reaksiyonlar, kataliz, ekstraksiyon ve ayırma gibi çeşitli süreçlerde geleneksel uçucu organik çözücülerin yerini alabilmekte ve böylece yeşil kimya ile temiz teknolojilerin gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu özellikleri, iyonik sıvıları hem güvenli işlem ortamları oluşturmak hem de sürdürülebilir kimyasal süreçleri desteklemek amacıyla tercih edilen malzemeler hâline getirmektedir.

İyonik sıvılar genellikle üç alt sınıfa ayrılmaktadır: aprotik, protik ve zwitteriyonik (Şekil 1.2) (Fernandes vd. 2025). Her alt sınıf, genellikle belirli uygulama gereksinimlerine göre tasarlanmakta ve sentezlenmektedir. Bu sınıflar, örneğin lityum-iyon bataryaları, süper kapasitörler, yakıt hücreleri ve iyonik sıvı esaslı membranlar gibi ileri teknoloji uygulamalarında önemli rol oynamaktadır.



Şekil 1.2. İyonik sıvıların genel sınıflandırması

Aprotik iyonik sıvılar, genellikle piridinyum, imidazolyum ve fosfonyum gibi büyük katyonlar ile daha küçük anyonları içerir ve en yaygın kullanılan iyonik sıvı türüdür (Koutsoukos vd. 2024). Protik iyonik sıvılar ise Brönsted asidi ve Brönsted bazının kombinasyonu yoluyla proton transferi ile hazırlanır; bu durum, hidrojen bağlı bir ağ oluşturmak için kullanılabilen proton verici ve alıcı bölgelerin varlığını sağlar (Greaves ve Drummond 2015). Bu özellikleri nedeniyle protik iyonik sıvılar, yakıt hücresi uygulamalarında yeni proton iletkenleri ve N-katkılı karbon malzemeler olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Geleneksel polimer öncülleri yerine, doğrudan karbonizasyon işlemleri yoluyla yeni küçük molekül öncülleri olarak protik iyonik sıvılar da kullanılmaktadır. Zwitteriyonik iyonik sıvılar ise, yüzey aktif madde sistemlerine iyonik sıvıların eklenmesiyle elde edilir ve iyonik sıvıları katkı maddesi olarak etkinleştirerek, sulu zwitteriyonik yüzey aktif madde sistemlerinin özelliklerini modifiye etmeyi amaçlar (Huang vd. 2023). Sistemin ortaya çıkan özellikleri, iyonik sıvının katyon ve anyonu ile yüzey aktif madde baş grubu arasındaki etkileşimin türüne ve kapsamına bağlı olarak değişir.

Polimerlerle birlikte kullanılan iyonik sıvılar incelendiğinde, özellikle imidazolyum, fosfonyum, piridinyum ve amonyum bazlı türlerin öne çıktığı görülmektedir. Bu gruplar arasında imidazolyum türevleri, geniş kimyasal çeşitlilik sunmaları, kapsamlı biçimde araştırılmış olmaları ve ticari olarak yaygın bulunabilirlikleri nedeniyle polimer sistemleriyle kombinasyonda en çok tercih edilen iyonik sıvılardır. Bu özellikler, onları farklı uygulama alanlarında erişilebilir ve işlevsel katkı maddeleri hâline getirmektedir. Buna karşın, fosfonyum ve piridinyum bazlı iyonik sıvıların polimerlerle kullanımı daha sınırlıdır. Özellikle yanıcılık özelliklerine yönelik çalışmalarda belirli avantajlar sunsalar da, ticari erişilebilirliklerinin görece düşük olması bu türlerin araştırma ve uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır. Benzer şekilde, amonyum bazlı iyonik sıvılar da polimerlerle düşük uyumluluk göstermeleri nedeniyle polimer harmanlama ve kompozit hazırlama çalışmalarında nadiren tercih edilmektedir. Uyumluluktaki bu sınırlılık, hedeflenen malzeme özelliklerinin elde edilmesini güçleştirebilmektedir (Shamsuri vd. 2023a,b).

2. İyonik Sıvı Esaslı Polimer Kompozitlerin Üretimi ve Özellikleri

İyonik sıvıların işlevsellikleri; katyon, anyon veya her ikisine birden kovalent olarak bağlanan fonksiyonel gruplar aracılığıyla özelleştirilebilir ve bu sayede kataliz, tıp, CO₂ yakalama, enerji depolama, triboloji ve yakıt teknolojileri gibi çeşitli uygulamalardaki performansları artırılabilir (Zhou vd. 2023). İyonik sıvıların fiziksel ve kimyasal özellikleri; alkil

zincir uzunluğu, fonksiyonel grupların türü, manyetik ve lüminesan özellikler ya da katalitik davranış gibi yapısal parametrelere bağlı olarak değiştirilebildiği gibi, polimerler gibi başka bileşenlerle birleştirilerek de geniş bir aralıkta ayarlanabilir. İyonik sıvılar, polimer kompozitlere çeşitli işlevsel özellikler kazandırarak bu malzemelerin performansını önemli ölçüde artırır. Öncelikle, iyonik sıvıların çözünme ve etkileşim özellikleri, polimer zincirlerinin hareketliliğini artırarak kompozitlere etkili plastikleştirici nitelik kazandırır; bu durum hem esnekliği hem de işlenebilirliği geliştirir. Ayrıca, güçlü dağıtıcı özellikleri sayesinde dolgu maddelerinin polimer matris içinde aglomerasyonunu engeller ve homojen bir dağılım sağlar. Bu kontrol edilmiş dispersiyon, takviye fazının etkinliğini artırarak çekme dayanımı ve elastik modül gibi mekanik özelliklerin iyileşmesine katkı sunar. İyonik sıvıların yapısal olarak ayarlanabilir olmaları, kompozitlerin hedeflenen elektriksel iletkenlik düzeylerine göre tasarlanabilmesine imkân tanır; bu da iletken polimerler, sensörler ve elektroaktif cihazlar gibi ileri teknolojik uygulamalar için önemli avantajlar sağlar. Son olarak, uçucu olmamaları ve düşük toksisiteleri, onları çevre açısından güvenli ve sürdürülebilir katkı maddeleri hâline getirerek biyobozunur lifler ve çevre dostu kompozitlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamalarını mümkün kılar (Shamsuri vd. 2024).

Ekonomik ve hafif malzemelere duyulan ihtiyaç, polimer bazlı kompozitlere olan ilgiyi artırmıştır (Platnieks vd. 2021; Uppal vd. 2022). Polimer kompozitler; matris polimer içinde farklı tipte dolgu maddelerinin dağıtılmasıyla elde edilen ve tek başına polimerin sağlayamayacağı mekanik ve fonksiyonel performans sunan çok fazlı malzemelerdir (Hsissou vd. 2021). Genel olarak polimer kompozitler iki ana bileşenden oluşur: matris ve takviye fazı (lif, partikül veya tabaka). Kompozitler, kaynaklarına, matris türüne ve takviye tipine göre sınıflandırılabilir. İyonik sıvı esaslı polimer kompozitlerin genel sınıflandırılması:

- *Kaynaklara göre:* Lif kompozitleri (Agarwal vd. 2017), doğal lif kompozitleri (Vigneshwaran vd. 2020) ve biyokompozitler (Manu vd. 2022).
- *Matris tipine göre:* Lif takviyeli kompozitler (Prashanth vd. 2017), tabakalı (laminar) kompozitler (Zhao vd. 2023) ve parçacıklı kompozitler (German 2016).
- *Takviyeye göre:* Organik veya metal matrisli kompozitler (Mussatto vd. 2021) ve seramik matrisli kompozitler (Sun vd. 2023).

İyonik sıvıların işlevselliğinin polimer sistemleriyle bütünleştirilmesi, geleneksel nanokompozitlere kıyasla üstün özelliklere sahip akıllı malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlar. Bu tür kompozitler; film, membran ve lif gibi çeşitli morfolojilerde üretilebilmekte olup, farklı uyaranlara (sıcaklık, ışık, elektriksel alan vb.) duyarlı çok işlevli sistemlerin tasarlanmasına uygun bir platform sunar. Malzemenin nihai performansı; kullanılan iyonik sıvının yapısal özellikleri (katyon/anyon boyutu, viskozite, iletkenlik, yoğunluk, moleküler ağırlık), polimer türü ve iyonik sıvı-polimer etkileşimlerinin doğası tarafından belirlenir. Örneğin, farklı anyon ve katyonlara sahip iyonik sıvıların poli(viniliden florür) (PVDF) matrisine dahil edilmesi, kompozitin elektroaktif β -faz oranını ve mekanik davranışını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Bu durum, PVDF zincirindeki pozitif CH_2 gruplarının iyonik sıvı anyonları ile, negatif CF_2 gruplarının ise iyonik sıvı katyonları ile etkileşime girmesinden kaynaklanmaktadır. PVDF ve kopolimerlerinin morfolojisi üzerine yapılan çalışmalar, iyonik sıvı ilavesinin polimer matrisinde gözenekli yapılar oluşturabildiğini de göstermektedir (Correia vd. 2019). İyonik sıvılar geniş fonksiyonellik sunma kapasiteleri sayesinde, bir nanokompozite çoklu özellik kazandırmak için genellikle birden fazla dolgu maddesi kullanımını gereksiz kılabilir. Böylece malzemenin özgün özelliklerinin bozulmadan korunması ve hedef uygulamaya yönelik daha kontrollü bir fonksiyonelleştirme sağlanır.

İyonik sıvılarla birleştirilmiş polimerlerin hazırlanmasında çözelti karıştırma yöntemi, iyonik sıvıların hem termoplastik hem de termoset polimerlerle birleştirilebilmesini sağladığı için oldukça çok yönlüdür. Bu yöntemde, polimer ve iyonik sıvı uygun bir çözücüde karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. Termoplastik polimerlerde ise öğütme ve eriyik karıştırma yöntemleri yaygın şekilde uygulanır. Öğütme tekniği, polimerin mekanik olarak küçültülmesini ve ardından iyonik sıvının eklenmesini içerir; bu yaklaşım, iyonik sıvının polimer yapısı boyunca etkili bir şekilde dağılmasına olanak tanır. Eriyik karıştırma ise polimerin eritilmesi ve eriyik fazdaki polimere iyonik sıvının eklenmesi prensibine dayanır; böylece homojen bir dağılım elde edilir. Hazırlama koşulları açısından, çözelti karıştırma ve öğütme yöntemlerinin genellikle oda sıcaklığında yapılabilmesi işlem kolaylığı sağlar. Buna karşın eriyik karıştırma, polimerin eriyik hale geçebilmesi için belirli sıcaklıkların uygulanmasını gerektirir. Ayrıca, birleştirme süresi de önemlidir: Çözelti karıştırma yöntemi, polimer ve iyonik sıvının tamamen çözünüp homojen dağılması için genellikle daha uzun işlem süresi gerektirirken, öğütme ve eriyik karıştırma daha kısa sürede tamamlanabilir. Kısacası, sentetik polimerler iyonik sıvılarla çözelti karıştırma, öğütme ve eriyik karıştırma gibi çeşitli yöntemlerle birleştirilebilir.

Çözelti karıştırma yöntemi her iki polimer türü için uygunken, öğütme ve eriyik karıştırma özellikle termoplastik polimerler için tercih edilmektedir. Hazırlama sıcaklığı ve işlem süresi yönetime göre değişmekte olup, her bir yaklaşımın seçiminde polimerin türü ve hedeflenen kompozit özellikleri belirleyici olmaktadır (Shamsuri vd. 2023).

İyonik sıvı esaslı polimer kompozitlerin üretiminde kullanılan güncel yöntemler; yerinde polimerizasyon, eriyik karıştırma, çözelti harmanlama ve polimer matrisine dolgu maddesi olarak iyonik sıvı eklenmesi gibi çeşitli stratejileri içermektedir (Mishra vd. 2022). Bu yöntemler, iyonik sıvı/polimer kompozitlerinin fonksiyonel özelliklerini geliştirmede önemli yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Termoplastik, termoset ve elastomer kompozitlerin iyonik sıvılarla birleştirilmesinde kullanılan yöntemler, her bir polimer türünün işlenme özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Termoplastik kompozitlerde en yaygın yaklaşım, eriyik karıştırma yöntemidir. Bu yöntemde termoplastik polimer önce eritilmekte, ardından dolgu maddesi ile iyonik sıvı (veya iyonik sıvı ile işlem görmüş dolgu maddesi) eriyik faza eklenmektedir. Ekstrüzyonla sağlanan homojenleştirme, dolgu ve iyonik sıvının polimer matrisi boyunca eşit dağılımını mümkün kılmakta ve elde edilen kompozit daha sonra enjeksiyon veya sıkıştırma kalıplama gibi tekniklerle şekillendirilmektedir. Termoset kompozitlerde ise karıştırma yöntemi tercih edilir. Termoset reçine, dolgu maddesi ve iyonik sıvı kontrollü bir şekilde karıştırılarak homojen bir dağılım sağlanır; daha sonra karışım kalıba dökülerek kütleme işlemine tabi tutulur. Bu süreç, reçinenin çapraz bağlanmasını ve kompozit malzemenin mekanik olarak güçlenmesini sağlar. Elastomer kompozitlerde uygulanan birleştirme yöntemi, elastomerin karıştırma değeriminde mekanik olarak işlenmesiyle başlar. Ardından dolgu maddesi ve iyonik sıvı, hafifçe ısıtılmış elastomer matrise eklenir ve homojen dağılım sağlanıncaya kadar harmanlanır. Son aşamada yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleştirilen kütleme işlemi, elastomerin elastik özelliklerini geri kazandırırken kompozit yapının kararlılığını artırır. Özetle, polimer türüne bağlı olarak seçilen bu yöntemler, iyonik sıvı ve dolgu maddesinin ilgili polimer matrisinde etkin dağılımını sağlayarak farklı uygulamalara uygun, geliştirilmiş özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimine olanak tanımaktadır.

İyonik sıvı esaslı nanokompozitlerin çevre dostu ve uygulanabilir bir üretim yöntemi, 1-bütill-3-metilimidazolyum bromür (BMIM-Br) iyonik sıvısının polianilin (PANI) matrisine dahil edildiği yerinde polimerizasyon tekniğidir. Bu yöntemde katyonik yüzey aktif madde kullanılarak sentezlenen nanokompozit, 3 MHz frekansta ve 120 °C sıcaklıkta yüksek iletkenliğini koruyabilmektedir (Shaviu vd. 2013). Yerinde polimerizasyonun bir diğer

örneği, indirgenmiş grafen oksit (RGO) esaslı poli iyonik sıvı/poli(p-fenilen benzoisoksazol) (RGO@PIL/POB) hibrit nanokompozitidir. Bu çalışmada 1-vinil-3-aminopropilimidazol tetrafloroborat iyonik sıvısı, serbest radikal mekanizmasıyla amin grubu ile fonksiyonelleştirilmiş poli(1-vinil-3-aminopropilimidazolyum) (PIL-NH₂)⁺'ye dönüştürülmüş ve oluşan PIL, RGO yüzeyine π - π konjugasyonu yoluyla bağlanmıştır. Daha sonra bu hibrit, fonksiyonel dolgu ile polimer matrisi arasında oluşan **amid bağları** sayesinde **yerinde polimerizasyon** yöntemiyle RGO@PIL/PBO nanokompozitlerine dönüştürülmüş ve termoformlama işlemiyle filmler hazırlanmıştır. Elde edilen kompozit, geliştirilmiş dielektrik özellikler (35.51 dielektrik sabitine, **0.09 dielektrik kaybına**), yüksek termal kararlılık (500 °C altına kadar) ve artırılmış enerji yoğunluğu gibi üstün nitelikler sergilemektedir (Yuan vd. 2022).

İyonik sıvılar farklı kation ve anyon bileşimlerinden oluştuğundan, uygun iyon çiftinin seçimi kompozitin nihai performansı üzerinde kritik bir rol oynar. Polimer türünün yanı sıra:

- Kation ve anyon boyutu,
- Alkil zincir uzunluğu,
- Anyonun yapısal kararlılığı,
- İyonlar arası etkileşim tipi,

gibi parametreler iyonik sıvı/polimer kompozitinin termal, mekanik ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Örneğin amonyum, imidazolyum ve fosfonyum kationları içeren iyonik sıvılar, yüksek difüzyon hızları sayesinde geleneksel polivinil klorür (PVC) plastikleştiricilerine etkili bir alternatif oluşturabilmektedir. Ayrıca, anyon seçiminde termal kararlılık, önemli bir belirleyici olup bilinen kararlılık sırası şu şekildedir:



Bu sıralama, yüksek sıcaklıklı uygulamalarda uygun anyonun belirlenmesine yol gösterir. Alkil zincir uzunluğu da iyonik sıvının viskozite, polarite ve polimerle etkileşim kapasitesini belirleyen önemli bir faktördür. Poli(metilmetakrilat), PMMA, matrisi içinde BMIM⁺, N-trimetil-N-bütıl amonyum, N-trimetil-N-heksil amonyum kationlarını ve karşı anyon olarak Br⁻, PF₆⁻ ve TFSI⁻ içeren iyonik sıvı yapısal etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir (Fedosse Zornio vd. 2019).

İyonik sıvı tabanlı polimerlerin temel sınırlamalarından biri, ortam sıcaklıklarında iyonik iletkenliğin düşmesidir. Literatürde bu soruna yönelik geliştirilen yaklaşımlardan biri, iyon hareketliliğini koruyabilen düşük cam

geçiş sıcaklığına (Tg) sahip poliyonik sıvıların tasarlanmasıdır. Poliyonik sıvı sistemlerinde **Coulomb** ve elastik kuvvetlerin iyon taşınımına katkısını ortaya koymuş ve iyon boyutunun difüzyon mekanizmasını nasıl etkilediğini ayrıntılı biçimde incelemiştir (Stacy vd. 2018).

3. İyonik Sıvı Esaslı Polimer Kompozitlerin Uygulamaları

İyonik sıvılar, sahip oldukları özgün fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde gelişmiş, akıllı ve çok işlevli malzemelerin tasarımında dikkat çekici bir alternatif haline gelmiştir. Uygun katyon-anyon çiftinin ve uygun polimer matrisinin seçimi, belirli uygulama gereksinimlerine yönelik üstün niteliklerde yeni iyonik malzemelerin geliştirilmesini olanaklı kılmaktadır. İyonik sıvı/polimer kompozitleri; jel, film, membran ve lif gibi çeşitli morfolojilerde üretilmekte olup sensör teknolojileri, aktüatörler, piller, yakıt hücreleri, çevresel izleme ve biyomedikal uygulamalar dahil geniş bir kullanım alanına sahiptir. Farklı iyonik sıvı türlerinin polimerlerle birleştirilmesi, bu alanlarda hedeflenen fonksiyonların optimize edilmesine yönelik önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Correia vd. 2020).

Akıllı ve çok işlevli malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlayan başlıca iyonik sıvı işlevsellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- *Duyarlı ve hassas malzemeler:* Işığa duyarlı (Foto-duyarlı), pH'a duyarlı, sıcaklığa duyarlı, gaz algılayan, iyonlara duyarlı, neme duyarlı, manyetik olarak duyarlı, elektrokromik ve kutuplanabilirliği değiştirilebilen iyonik sıvılar.
- *Optik malzemeler:* Lüminesan, doğrusal olmayan optik özellikte, fotonige dayalı iyonik sıvılar ve iyonik sıvı esaslı yapısal renk.
- *Enerjik malzemeler:* Enerjik iyonik sıvılar ve hidrojen depolama.

İyonik sıvıların işlevsellikleri, gelecek nesil kompozit yapısal pillerin performansını artırmada önemli bir potansiyel sunmaktadır. İyonik sıvı esaslı kompozitler veya nanokompozitler, enerji yoğunluğunu geliştirmek, dielektrik özellikleri ayarlamak ve sistemin termal kararlılık profilini optimize etmek amacıyla pil mimarisine entegre edilebilmektedir. Bu bağlamda, iyonik sıvıların hem elektrolit bileşeni hem de polimer matrise gömülü fonksiyonel katkı maddesi olarak kullanımı, enerji depolama sistemlerinin güvenliğini, dayanıklılığını ve verimliliğini geliştiren yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

İyonik sıvıların polimer elektrolit sistemlerine entegrasyonuna yönelik önemli bir örnek, dietil metilamonyum triflorometansülfonat, [dema][TfO], iyonik sıvısının polibenzimidazol (PBI) ile birleştirilmesidir. İyonik sıvı/PBI

tabanlı bu kompozit membran, 100 °C'nin üzerinde çalışma sıcaklıklarına sahip yakıt hücreleri için geliştirilmiştir. Üretilen membran:

- Yüksek termal kararlılık,
- 250 °C'de 108.9 mS/cm seviyesinde olağanüstü proton iletkenliği,
- Geniş sıcaklık aralığında (100-250 °C) iletkenlik kararlılığı

gibi üstün özellikler göstermektedir. Bu bulgular, iyonik sıvı katkısının yüksek sıcaklıkta çalışan elektrokimyasal cihazlar için kritik performans artışları sağladığını ortaya koymaktadır (Niu vd. 2021).

Enerji depolama alanındaki bir diğer önemli çalışma iyonik sıvı, [EMIm] [NTf₂], fonksiyonelleştirilmiş MXene tabanlı kompozit sistemdir. Polipirol (PPy) ve iyonik sıvı esaslı mikroemülsiyon parçacıklarıyla fonksiyonelleştirilen Ti₃C₂-MXene tabanlı katmanlı yapı, süperkapasitör elektrotu olarak yüksek performans göstermektedir. Elde edilen filmin özellikleri şu şekildedir:

- 4-50 °C çalışma aralığında yüksek özgül kapasitans,
- Hızlı yükleme/boşaltma kapasitesi,
- Üstün döngü kararlılığı,

Ayrıca bu malzemeye dayalı simetrik süperkapasitör cihazı, oda sıcaklığında 31.2 Wh/kg enerji yoğunluğu ve 1030.4 W/kg güç yoğunluğu değerlerine ulaşarak literatürdeki birçok MXene tabanlı sistemden daha üstün bir performans sergilemiştir (Fan vd. 2022).

İyonik sıvı esaslı iyonik elektroaktif polimerlerin (iyonik sıvı-iEAP) geliştirilmesi, biyolojik ve elektronik sistemlerde ileri düzey fonksiyonellik gerektiren uygulamalara yönelik dikkate değer bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmaktadır. iEAP malzemeleri, aktif katman içerisinde bulunan katyon ve anyonların kontrollü hareketi aracılığıyla hem algılama hem de aktüatör işlevlerini yerine getirebilen akıllı malzeme sınıfını temsil etmektedir. Bu malzemeler, düşük voltajlı uyarımlar altında şekil değiştirebilmekte; ayrıca iyonların yeniden dağılımı sonucu mekanik deformasyona maruz kaldıklarında elektriksel sinyaller üretebilmektedir. Literatürdeki çok sayıda çalışma, bu malzemelerin deformasyon mekanizmalarının aydınlatılmasına ve aktüasyon, algılama ile enerji hasadı gibi işlevsel uygulamalardaki potansiyellerinin değerlendirilmesine odaklanmıştır. Geleneksel su bazlı iEAP sistemleriyle karşılaştırıldığında, uçucu olmayan iyonik sıvı-iEAP'ler daha geniş bir elektrokimyasal pencereye ve daha kararlı bir aktüasyon performansına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde iyonik sıvı-iEAP'ler, özellikle kendini algılama (self-sensing) yeteneğinin geliştirilmesi bağlamında,

biyolojik aktüatörler ve sensör teknolojileri için önemli bir uygulama potansiyeli sunmaktadır. Çeşitli elektriksel uyarım koşulları altında iyonik sıvı-iEAP'lerin tepki hızının ve bükülme geriniminin analiz edilmesi, yüksek iyonik iletkenliğe sahip elektrolitlerin ve yüksek elektronik iletkenliğe sahip elektrotların hızlı ve yüksek genlikli deformasyon elde edilmesi açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, 3D baskı gibi ileri üretim teknolojilerinin kullanılmaya başlanması, iyonik sıvı-iEAP sistemlerinin işlevselliğini artırmaya yönelik yeni ve umut vadeden bir araştırma eğilimi olarak dikkat çekmektedir (Dong vd. 2021; Ma vd. 2024).

Son yıllarda, biyolojik olarak parçalanabilir polimer kompozitlerin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini geliştirmek amacıyla çok çeşitli malzemelerin kullanımına yönelik ilgi artmıştır (Delamarche vd. 2022; Zhao vd. 2024). Bu doğrultuda, iyonik sıvıların dönüştürücü ajan olarak değerlendirilmesi; geniş hacimli katyonlar ve zayıf koordinasyon yeteneğine sahip anyonlardan oluşan özgün kimyasal yapıları nedeniyle önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu tip iyonik bileşenler, organik ve inorganik dolgu maddeleri ile biyobozunur polimer zincirleri arasında çeşitli etkileşim mekanizmaları oluşturabilmektedir. Ortaya çıkan moleküller arası etkileşimler, kompozit sistemlerin yapısal özelliklerini değiştirebilmekte ve özellikle dolgu maddesi ile polimer matrisi arasındaki arayüz bağlanmasını belirgin biçimde güçlendirebilmektedir (Shamsuri vd. 2021). Biyobozunur polimer kompozitlerin üretiminde yararlanılan iyonik sıvılar genellikle imidazolyum ve fosfonyum türevi katyonların çeşitli karşı anyonlarla kombinasyonundan oluşmaktadır. Alkilimidazolyum esaslı iyonik sıvılar, organik dolgu maddeleri ile sentetik biyobozunur polimerlerin {polilaktik asit (PLA), polibütilen süksinat (PBS) ve polikaprolakton (PCL)} birlikte işlendiği kompozitlerde çözücü, plastikleştirici, düzenleyici ve uyumlulaştırıcı olarak geniş biçimde kullanılmaktadır. Buna karşılık, alkilfosfonyum temelli iyonik sıvılar özellikle inorganik dolgu maddeleri içeren sentetik biyobozunur kompozitlerde düzenleyici ve sinerjist ajan olarak tercih edilmektedir. Hem alkilimidazolyum hem de alkilfosfonyum yapısındaki iyonik sıvıların kullanımı, biyobozunur polimer kompozitlerin mekanik, termal ve kimyasal performansının kayda değer ölçüde geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu iyonik sıvılar, dolgu maddeleri ile biyobozunur polimer matrisi arasında çeşitli moleküller arası etkileşimler oluşturarak kompozit yapının bütünlüğünü ve uyumunu artırabilmektedir. Alkilimidazolyum içeren iyonik sıvılar, yüksek uzama kabiliyeti, iyi termal kararlılık ve yüksek uyum sergileyen kompozitlerin elde edilmesine katkıda bulunurken; alkilfosfonyum türleri, yüksek çekme dayanımı, güçlü termal stabilite ve geliştirilmiş etkileşim özellikleri sağlayan biyobozunur kompozitlerin üretilmesine imkân tanımaktadır.

Sonuç olarak, iyonik sıvıların polimerler ve polimer kompozitlerle bir arada kullanımı, gelişmiş ve çok işlevli malzemelerin tasarımında önemli bir fırsat sunmaktadır. Geniş polimer uyumluluğu, moleküler düzeyde etkileşim yeteneği ve yapısal olarak özelleştirilebilir olmaları, iyonik sıvıları bu alanda etkili katkı maddeleri hâline getirmektedir. Bununla birlikte, performansın en iyi düzeye çıkarılabilmesi; uygun katyon-anyon kombinasyonlarının seçilmesi, polimer yapısının doğru belirlenmesi ve hazırlama yöntemlerinin optimize edilmesine bağlıdır. Artan araştırmalar, iyi tasarlanmış iyonik sıvı/polimer sistemlerinin yüksek performanslı, uyarlanabilir ve akıllı malzeme teknolojilerinde geleceğin yenilikçi çözümlerine yön vereceğini açıkça göstermektedir.

Kaynakça

- Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekhara, K. (2017). *Analysis and performance of fiber composites*. John Wiley & Sons.
- Alreshidi, M. A., Yadav, K. K., Gunasekaran, S., Gacem, A., Sambandam, P., Subbiah, G., ... & Annadurai, S. (2025). A review on the evolution of ionic liquids: Sustainable synthesis, applications, and future prospects. *Materials Today Sustainability*, 31, 101160.
- Coimbra, P., Dias, A. M., & de Sousa, H. C. (2025). Encapsulated ionic liquids: A comprehensive review of production methods and potential applications. *Chemical Engineering Journal*, 504, 159039.
- Correia, D. M., Costa, C. M., Lizundia, E., Sabater i Serra, R., Gomez-Tejedor, J. A., Biosca, L. T., ... & Lanceros-Mendez, S. (2019). Influence of cation and anion type on the formation of the electroactive β -phase and thermal and dynamic mechanical properties of poly (vinylidene fluoride)/ionic liquids blends. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(45), 27917-27926.
- Correia, D. M., Fernandes, L. C., Martins, P. M., García-Astrain, C., Costa, C. M., Reguera, J., & Lanceros-Méndez, S. (2020). Ionic liquid–polymer composites: A new platform for multifunctional applications. *Advanced Functional Materials*, 30(24), 1909736.
- Delamarche, E., Mattlet, A., Livi, S., Gérard, J. F., Bayard, R., & Massardier, V. (2022). Impact of Ionic Liquids on the (bio) degradability of Poly (butylene succinate)/Poly (lactic acid) blends. *Frontiers in Materials*, 9, 975438.
- Dong, Y., Yeung, K. W., Tang, C. Y., Law, W. C., Tsui, G. C. P., & Xie, X. (2021). Development of ionic liquid-based electroactive polymer composites using nanotechnology. *Nanotechnology Reviews*, 10(1), 99-116.
- Fan, Q., Zhao, R., Yi, M., Qi, P., Chai, C., Ying, H., & Hao, J. (2022). Ti-3C2-MXene composite films functionalized with polypyrrole and ionic liquid-based microemulsion particles for supercapacitor applications. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131107.
- Fedosze Zornio, C., Livi, S., Duchet-Rumeau, J., & Gerard, J. F. (2019). Ionic liquid-nanostructured poly (methyl methacrylate). *Nanomaterials*, 9(10), 1376.
- Fernandes, L. C., Correia, D. M., Costa, C. M., & Lanceros-Mendez, S. (2025). Recent Advances in Ionic Liquid-Based Hybrid Materials for Electroactive Soft Actuator Applications. *Macromolecular Materials and Engineering*, 310(2), 2400279.
- German, R. M. (2016). *Particulate composites* (pp. 198-200). New York: Springer.

- Greaves, T. L., & Drummond, C. J. (2015). Protic ionic liquids: evolving structure–property relationships and expanding applications. *Chemical reviews*, 115(20), 11379-11448.
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*, 262, 113640.
- Huang, H. H., Jia, J., Ren, L., Wang, S., Yue, T., Yan, B., & Chu, Y. H. (2023). A zwitterionic solution for smart ionic liquids to evade cytotoxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 453, 131430.
- Kianfar, E., & Mafi, S. (2020). Ionic liquids: properties, application, and synthesis. *Fine Chem Eng*, 2, 22-31.
- Koutsoukos, S., Becker, J., Dobre, A., Fan, Z., Othman, F., Philippi, F., ... & Welton, T. (2022). Synthesis of aprotic ionic liquids. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 49.
- Ma, T., Zhang, Y., Ruan, K., Guo, H., He, M., Shi, X., ... & Gu, J. (2024). Advances in 3D printing for polymer composites: a review. *InfoMat*, 6(6), e12568.
- Mahmood, H., Moniruzzaman, M., Yusup, S., & Welton, T. (2017). Ionic liquids assisted processing of renewable resources for the fabrication of biodegradable composite materials. *Green Chemistry*, 19(9), 2051-2075.
- Manu, T., Nazmi, A. R., Shahri, B., Emerson, N., & Huber, T. (2022). Biocomposites: A review of materials and perception. *Materials Today Communications*, 31, 103308.
- Mishra, K., Devi, N., Siwal, S. S., Zhang, Q., Alsanie, W. F., Scarpa, F., & Thakur, V. K. (2022). Ionic liquid-based polymer nanocomposites for sensors, energy, biomedicine, and environmental applications: roadmap to the future. *Advanced Science*, 9(26), 2202187.
- Mussatto, A., Ahad, I. U., Mousavian, R. T., Delaure, Y., & Brabazon, D. (2021). Advanced production routes for metal matrix composites. *Engineering reports*, 3(5), e12330.
- Niu, B., Luo, S., Lu, C., Yi, W., Liang, J., Guo, S., ... & Xu, B. (2021). Polybenzimidazole and ionic liquid composite membranes for high temperature polymer electrolyte fuel cells. *Solid State Ionics*, 361, 115569.
- Platnieks, O., Sereda, A., Gaidukovs, S., Thakur, V. K., Barkane, A., Gaidukova, G., ... & Fridrihsone, V. (2021). Adding value to poly (butylene succinate) and nanofibrillated cellulose-based sustainable nanocomposites by applying masterbatch process. *Industrial Crops and Products*, 169, 113669.
- Prashanth, S., Subbaya, K. M., Nithin, K., & Sachhidananda, S. (2017). Fiber reinforced composites-a review. *J. Mater. Sci. Eng*, 6(03), 2-6.

- Shafiu, S., Ünal, B., & Baykal, A. (2013). The ionic liquid based synthesis of polyaniline–MnFe₂O₄–CTAB nanocomposite: electrical properties. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 23(6), 1335-1340.
- Shamsuri, A. A., Abdan, K., Yusoff, M. Z. M., & Jamil, S. N. A. M. (2024). Impact of ionic liquids on the thermal properties of polymer composites. *e-Polymers*, 24(1), 20240020.
- Shamsuri, A. A., Md. Jamil, S. N. A., & Abdan, K. (2021). A brief review on the influence of ionic liquids on the mechanical, thermal, and chemical properties of biodegradable polymer composites. *Polymers*, 13(16), 2597.
- Shamsuri, A. A., Md. Jamil, S. N. A., Yusoff, M. Z. M., & Abdan, K. (2023a). Methods and mechanical properties of polymer hybrid composites and hybrid polymer composites: Influence of ionic liquid addition. *Applied Mechanics*, 5(1), 1-19.
- Shamsuri, A. A., Yusoff, M. Z. M., Abdan, K., & Jamil, S. N. A. M. (2023b). Flammability properties of polymers and polymer composites combined with ionic liquids. *e-Polymers*, 23(1), 20230060.
- Stacy, E. W., Gainaru, C. P., Gobet, M., Wojnarowska, Z., Bocharova, V., Greenbaum, S. G., & Sokolov, A. P. (2018). Fundamental limitations of ionic conductivity in polymerized ionic liquids. *Macromolecules*, 51(21), 8637-8645.
- Sun, J., Ye, D., Zou, J., Chen, X., Wang, Y., Yuan, J., ... & Bai, J. (2023). A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites. *Journal of Materials Science & Technology*, 138, 1-16.
- Uppal, N., Pappu, A., Gowri, V. K. S., & Thakur, V. K. (2022). Cellulosic fibres-based epoxy composites: From bioresources to a circular economy. *Industrial Crops and Products*, 182, 114895.
- Usman, M., Wirzal, M. D. H., Hizam, S. M., Afridi, J., Zaidi, S. T. H., & Marriam, F. (2025). A comprehensive review of ionic liquids based electrolytes for efficient hydrogen production. *Journal of Molecular Liquids*, 417, 126537.
- Vigneshwaran, S., Sundarakannan, R., John, K. M., Johnson, R. D. J., Prasath, K. A., Ajith, S., ... & Uthayakumar, M. (2020). Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124109.
- Wei, L., Wang, L., Cui, Z., Liu, Y., & Du, A. (2023). Multifunctional applications of ionic liquids in polymer materials: a brief review. *Molecules*, 28(9), 3836.
- Welton, T. (2018). Ionic liquids: a brief history. *Biophysical reviews*, 10(3), 691-706.
- Yuan, Y., Wang, X., Liu, X., Qian, J., Zuo, P., & Zhuang, Q. (2022). Non-covalently modified graphene@ poly (ionic liquid) nanocomposite with hi-

gh-temperature resistance and enhanced dielectric properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 154, 106800.

- Zhao, T., Kou, W., Zhang, Y., Wu, W., Li, W., & Wang, J. (2023). Laminar composite solid electrolyte with succinonitrile-penetrating metal-organic framework (MOF) for stable anode interface in solid-state lithium metal battery. *Journal of Power Sources*, 554, 232349.
- Zhao, Y., Guo, L., Fang, B., & Liu, B. (2024). Recent Advances in the Research of Biobased Polymers and the Catalytic Application of Ionic Liquids in Their Synthesis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(46), 19955-19971.
- Zhou, T., Gui, C., Sun, L., Hu, Y., Lyu, H., Wang, Z., ... & Yu, G. (2023). Energy applications of ionic liquids: recent developments and future prospects. *Chemical Reviews*, 123(21), 12170-12253.