

İyonik Sıvılar: Çevre Dostu Yeşil Çözücüler

Murat Kaloğlu¹

Özet

Son yıllarda araştırmacılar kimyasal üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılan ve birçoğu toksik olan organik çözücülerin yerine, çevreci ve sürdürülebilirliği yüksek çözücülerin kullanılması ile ilgili çalışmalara odaklanmıştır. Bu bağlamda, iyonik sıvılar geleneksel organik çözücülerin yerine önemli bir alternatif sunmaktadır. İyonik sıvılar, toksik olmayan, güvenli, çevre dostu ve sürdürülebilirliği yüksek çözücülerdir. Kimya alanında sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler arayışında, iyonik sıvıların ortaya çıkışı önemli bir dönüm noktası olmuştur. Çevre dostu yeşil çözücüler olarak bilinen iyonik sıvılar, dikkat çekici özellikler sergileyen ve çeşitli uygulamalarda çok yönlü bir potansiyel sergileyen yeni bir çözücü sınıfı olarak önem kazanmıştır. Bu özelliklerinden dolayı, iyonik sıvılar son yıllarda çevre dostu ve çok yönlü çözücüler olarak büyük bir ilgi görmektedir.

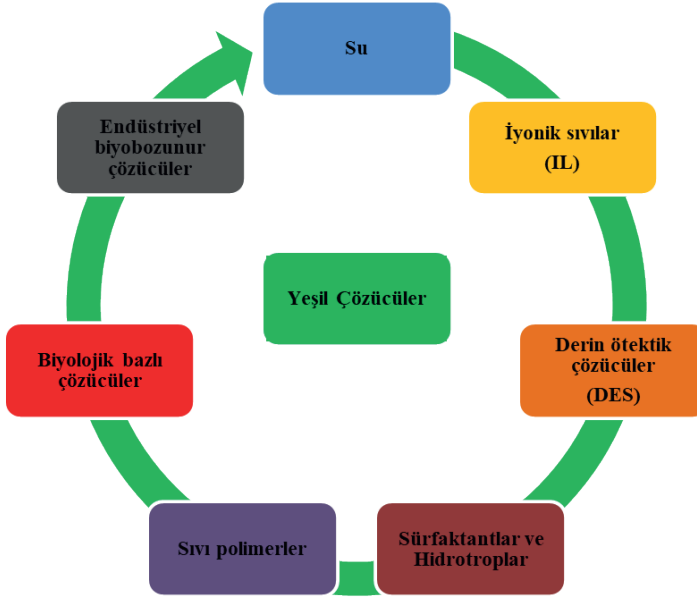
Bu bölümde, iyonik sıvıların dinamik dünyası genel bir bakış açısıyla anlatılmış ve iyonik sıvılar alanında yaşanan son gelişmeler özetlenmiştir.

1. Giriş

“Yeşil Kimya” tehlikeli maddelerin kullanımını ve üretimini en aza indirecek veya ortadan kaldıracak, çevresel açıdan daha kabul edilebilir kimyasal süreçlere ve ürünlere yönelik hareketi tanımlamak için evrensel olarak kabul edilen bir terimdir. Yeşil kimya aynı zamanda “Sürdürülebilir Kimya” olarak da bilinir. Atıkların en aza indirilmesi, toksisitenin azaltılması ve kaynakların korunması gibi temel ilkeleri olan yeşil kimya, kimyasal süreçlerin çevreye karşı daha duyarlı olmasında itici bir güç olmuştur. Yeşil kimyadaki temel zorluklardan biri, verimlilikten ödün vermeden çevresel sürdürülebilirliğin zorunlu gereksinimlerini karşılayan yeşil ve çevreci çözücülerin keşfedilmesi ve geliştirilmesidir [1].

1 Doç. Dr. Murat Kaloğlu, İnönü Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye, E-mail: murat.kaloglu@inonu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-2770-5532

Son zamanlarda, toksik veya uçucu organik çözücülerin yerine daha güvenli ve çevreye karşı daha duyarlı çözücülerin geliştirilmesi ve kullanımına odaklanılmıştır. Uçucu organik çözücülerin yerine alternatif olarak kullanılan bazı önemli yeşil çözücüler Şekil 1'de gösterilmiştir.

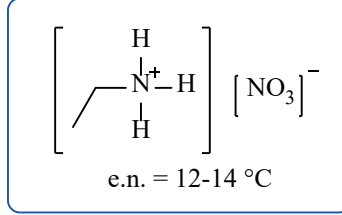


Şekil 1. Bazı önemli yeşil çözücüler.

Kimyasal süreçler için geleneksel organik çözücülerin yerine alternatif olarak kullanılan çevreci çözücüler arasında en önemlisi kuşkusuz sudur. Su toksik olmayan, güvenli, çevre dostu ve ucuz bir çözücüdür. Organik çözücülerin yerine suyun kullanımı çok sayıda avantajı da beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte suyun çözücü olarak kullanımında çözünürlük ve kaynama noktası başta olmak üzere birtakım kısıtlamalar vardır. İyonik sıvılar benzersiz ve çok yönlü özellikleriyle suyun kullanımında gözlenen bazı kısıtlamaların üstesinden gelmek için umut verici adaylar olarak ortaya çıkan en önemli çevreci çözücülerden bir diğeridir. Bununla birlikte derin ötektik çözücüler, sümfaktantlar ve hidrotroplar, sıvı polimerler, biyolojik bazı çözücüler ve endüstriyel biyobozunur çözücüler geleneksel organik çözücülerin yerine alternatif olarak kullanılan diğer önemli çevreci çözücülerdendir [2].

2. Yeşil Çözücüler Olarak İyonik Sıvılar

İyonik sıvı terimi, 100 °C'nin altında ve hatta oda sıcaklığında sıvı halde bulunan tuzlar olarak tanımlanır. İyonik sıvılar organik katyon ve anorganik anyondan oluşur [3]. Literatürde bilinen ilk iyonik sıvı Paul Walden tarafından 1914'te keşfedilen etil amonyum nitrat'dır (Şekil 2) [4].



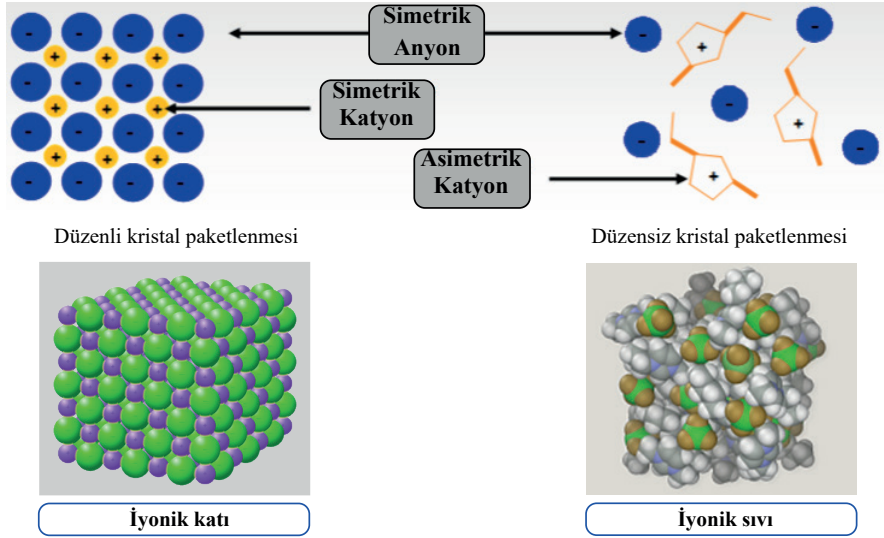
Şekil 2. Etil amonyum nitrat'ın yapısı.

İyonik sıvılar, alüminyum(III) klorür ile *N*-alkilpiridinyum veya 1,3-dialkilimidazolyum klorür karışımlarından yapılan ikili iyonik sıvıların keşfine kadar fazla ilgi görmemiştir. 1940 yılında Teksas Rice Enstitüsü'nde çalışan Frank Hurley ve Tom Weir, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan yeni iyonik sıvıları keşfetmiştir [5]. Bu gelişmeden sonra iyonik sıvılara olan ilgi artmış ve iyonik sıvılar birçok araştırmacı tarafından yoğun bir şekilde çalışılmaya başlanmıştır.

Genel olarak iyonik sıvılar, iyonlardan birinin veya her ikisinin de büyük olduğu ve katyonun düşük simetri derecesine sahip olduğu bir tuzdan oluşur. Bu faktörler, tuzun kristal formunun kafes enerjisini azaltma ve dolayısıyla erime noktasını düşürme eğilimindedir. İngilizce olarak “*molten salts*” (erimiş tuzlar – sıvı tuzlar) ifadesi 300 °C ile 600 °C aralığında sıvı olarak bulunabilen inorganik tuzlar için kullanılırken, iyonik sıvılar -96 °C'ye kadarki sıcaklıklarda bile sıvı halde bulunabilen tuzlardır [6].

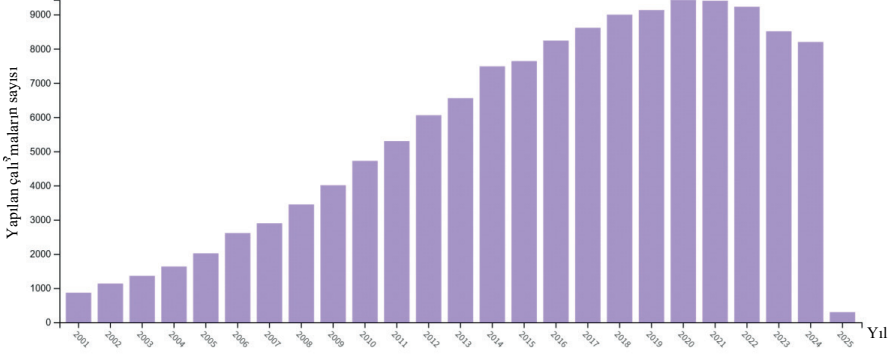
İyonik sıvılar yapısal olarak bir iyonik katı olan sofratuzu (NaCl) gibi bir anyon ve bir katyon çiftinden oluşmaktadır. Ancak, anyon ve katyonlar NaCl'deki gibi atomik iyonlar şeklinde değil, bunun yerine asimetrik yapılu moleküler iyonlar şeklindedir. Bu iyonlar genellikle organik katyonların (1,3-disübstitüye imidazolyum, 1-sübstitüye piridinyum, tetra-alkillenmiş amonyum, tetra-alkillenmiş fosfonyum türevleri, vb.) ve organik veya inorganik anyonların (CF_3COO^- , HSO_4^- , Cl^- , vb.) birleşimidir. Tipik tuzların aksine, iyonik sıvılarda kristallenme olasılığının düşük olması, hacimli ve asimetrik katyonik yapılarına bağlanabilir [7]. Bunun bir sonucu olarak, iyonlar kolayca bir araya gelip kristal paketlenmesi yapamazlar,

dolayısıyla iyonik sıvıların erime noktaları daha düşük sıcaklıklara kayar ve oda sıcaklığında sıvı halde bulunurlar. Şekil 3’de iyonik katıların ve iyonik sıvıların kristal paketlenmesi arasındaki fark gösterilmiştir.



Şekil 3. İyonik katılarda ve iyonik sıvılarda kristal paketlenmesi.

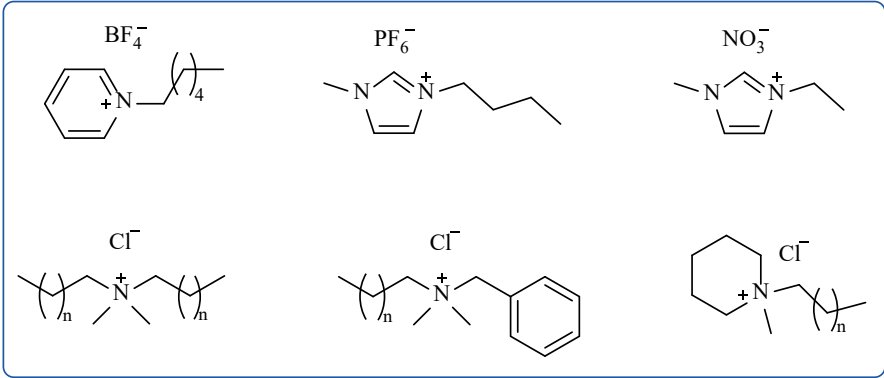
Düşük buhar basıncı, geniş sıvı kalma aralığı ve ayarlanabilir özellikleri, iyonik sıvıların farklı endüstriyel uygulamalar için cazip bir seçim haline getirmektedir. Ayrıca, ihmal edilebilir düzeydeki uçuculukları ve sürdürülebilir olmaları iyonik sıvıların çevresel sebeplerden dolayı geleneksel uçucu organik çözücülere kıyasla avantajlı yapmaktadır [8]. Belirtilen nedenlerle, son zamanlarda iyonik sıvılar alanında yapılan araştırmaların sayısı büyük bir artış göstermiştir. Her geçen gün iyonik sıvılar alanındaki temel ve uygulamalı araştırmalar katlanarak artmakta, kimya, biyoloji ve fizik gibi temel fen bilimleri alanlarındaki geniş potansiyel uygulama yelpazesine iyonik sıvıların önemi ortaya koyulmaktadır. Şekil 4’de iyonik sıvılar alanında son 25 yılda yapılan çalışmaların sayısı gösterilmiştir. (Grafik, Web of Science™ veri tabanında “*iyonik sıvılar*” konu başlığı girilerek 15.01.2025 tarihinde alınan sonuçları göstermektedir).



Şekil 4. İyonik sıvılar alanında son 25 yılda yapılan çalışmaların sayısı.

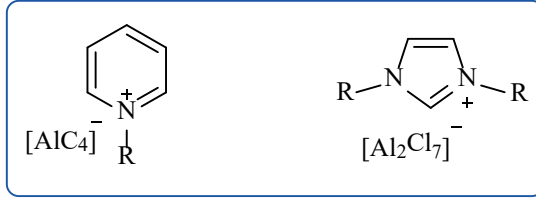
3. İyonik Sıvıların Yapısı

İyonik sıvılar, basit iyonik sıvılar (tek bir anyon ve katyondan oluşan) ve ikili iyonik sıvılar (bir dengeğin söz konusu olduğu tuzlar) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Örneğin; $[\text{EtNH}_3][\text{NO}_3]$ basit bir tuz yapısındadır ve bu tür tuzlar basit erime davranışı gösterirler. Basit bir tuz yapısına sahip iyonik sıvıların örnekleri Şekil 5'de gösterilmiştir [9].



Şekil 5. Oda sıcaklığında sıvı halde bulunan basit iyonik sıvılar.

Alüminyum(III) klorür ve 1,3-dialkilimidazolyum klorür veya 1-alkilpiridinyum klorür karışımları birkaç farklı iyonik tür içerir ve ikili bir iyonik sıvı sistemi oluşturur. Bu yapıya sahip tuzların erime noktası gibi bazı fiziksel özellikleri, yapıdaki mevcut alüminyum(III) klorür ve katyonik organik yapının mol oranlarına bağlıdır. Basit bir tuz yapısına sahip iyonik sıvıların örnekleri Şekil 6'da gösterilmiştir [10].



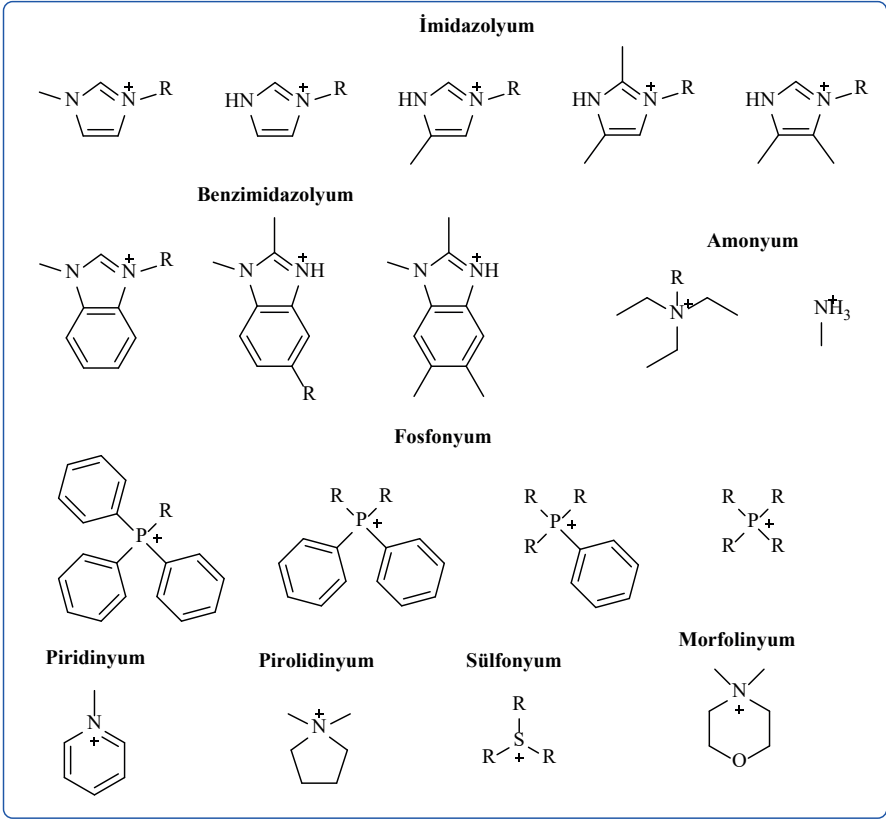
Şekil 6. Oda sıcaklığında sıvı halde bulunan ikili iyonik sıvılar.

İyonik sıvılar “*Tasarımcı Çözücüler*” olarak da tanımlanabilir. Bu tanım iyonik sıvıların özelliklerinin belirli bir sürecin gereksinimlerini sağlayacak şekilde ayarlanabileceği anlamına gelmektedir. Erime noktası, viskozite, yoğunluk ve hidrofobiklik, vb. özellikler iyonların yapısındaki basit değişikliklerle ayarlanabilir. Örneğin, 1-alkil-3-metilimidazolyum tetrafloroboratların ve hekzaflorofosfatların erime noktaları 1-alkil grubunun uzunluğunun bir fonksiyonudur ve on iki karbon atomunun üzerindeki alkil zinciri uzunlukları için sıvı kristal fazlar oluşturur. Yapı ile değişen bir diğer önemli özellik ise bu tür sıvılarda suyun karışabilirliğidir. Örneğin, 1-alkil-3-metilimidazolyum tetrafloroborat tuzlarında, alkil zincir uzunluğunun altıdan az olduğu durumlarda oda sıcaklığında su ile karışabilirler, ancak altı veya üzerinde alkil zincir uzunluğuna sahip tuzlar su ile karışmayıp ayrı bir faz oluştururlar. Bu davranış, iyonik fazın ve organik fazın bağlı çözünürlüklerini ayırtırmayı mümkün olduğunca kolaylaştıracak şekilde ayarlanabildiğinden, çözücü ekstraksiyonları veya ürün ayırtırmaları gerçekleştirilirken önemli bir fayda sağlamaktadır [11].

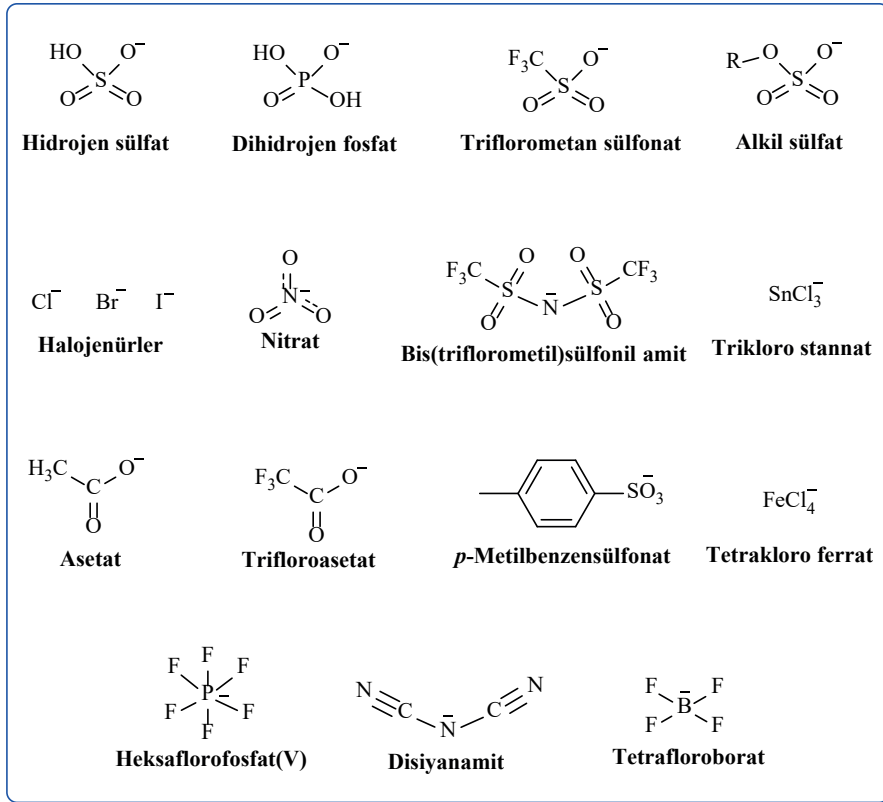
İyonik sıvılarda ayarlanabilir olan uygun katyon ve anyonların çok çeşitli potansiyel kombinasyonları, iyonik sıvıların fiziksel özelliklerinin ayarlanabilmesine olanak tanır. Anyonlar hava ve su stabilitesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynarken, katyonlar erime sıcaklığını ve organik fazdaki çözünürlüğü etkiler. Araştırmacılar, [Tf₂N]⁻, PF₆⁻ veya PF₄⁻ gibi negatif yüklü küçük anyonları ve 1-alkilimidazolyum, 1-alkilpiridinyum, 1-alkilpirolidinyum, alkilfosfonyum veya alkilmorfolinyum gibi pozitif yüklü büyük katyonları seçerek spesifik iyonik sıvılar üretebilirler [12]. Bu özel iyonik sıvılar, belirli kimyasalların çözülmesinde veya belirli malzemelerin çözeltilerden çıkarılmasında oldukça geniş uygulama alanları bulmaktadır.

İyonik sıvılarda yaygın olarak gözlenen bazı organik kökenli katyonlar Şekil 7’de, bazı anyonlar ise Şekil 8’de gösterilmiştir. Yapılarının kolaylıkla fonksiyonelize edilmesi, belirli uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için özel olarak tasarlanmış özelliklerin oluşturulmasını sağlar. Bilinen iyonik sıvı katyonları ve anyonları ile bunların kombinasyonları üzerine yapılan kapsamlı

çalışmaların yanı sıra, hali hazırda devam eden araştırmalar her geçen gün yeni iyonik sıvıların keşfedildiğini rapor etmektedir [13].



Şekil 7. İyonik sıvılarda yaygın olarak gözlenen bazı katyonlar.



Şekil 8. İyonik sıvılarda yaygın olarak gözlenen bazı anyonlar.

4. İyonik Sıvıların Özellikleri

İyonik sıvıların bazı önemli özellikleri şöyle sıralanabilir:

4.1. Düşük Buhar Basıncı ve Düşük Uçuculuk

İyonik sıvıların en dikkat çekici özelliklerinden biri son derece düşük buhar basıncına sahip olmalarıdır. Bu durum iyonik sıvıların düşük uçuculuk özelliğine sahip olmalarını sağlamaktadır. İyonik sıvıların bu özelliği, katyonları ve anyonları bir arada tutan güçlü elektrostatik kuvvetlere sahip iyonik yapılarının bir sonucudur. Bu özellik iyonik sıvıları geleneksel organik çözücülere kıyasla avantajlı hale getirmektedir. Birçok uçucu organik çözücünün aksine, iyonik sıvılar normal çalışma koşullarında kolayca buharlaşmazlar. Bu özellik, yeşil çözücü kimyasının önemli yönlerinden biri olan uçucu organik çözücü emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur [14]. Düşük buhar basıncı, neredeyse ihmal edilebilir düzeyde hava kirliliğine neden olmakta ve endüstriyel ortamlarda daha güvenli bir çalışma

ortamı sağlamaktadır. Bunun aksine, birçok geleneksel organik çözücü atmosfere zararlı organik bileşenler salarak hava kirliliğine neden olmakta ve bu ortamlarda çalışanlar için sağlık riskleri oluşturmaktadır.

4.2. Düşük Erime Noktası

İyonik sıvılar oda sıcaklığında sıvı halde olmalarının yanı sıra, genellikle düşük erime noktalarına da sahiptirler. Bu özellik, iyonik sıvıların geniş bir sıcaklık aralığında sıvı halde kalmasını sağlayarak geniş bir aralıktaki sıcaklık değişimlerine maruz kalan uygulamalarda iyonik sıvılara çok yönlülük sağlamaktadır.

4.3. Yüksek Termal Kararlılık

İyonik sıvılar yüksek termal kararlılık sergilerler. Bu özellik iyonik sıvıların ayrışmaya uğramadan veya kimyasal yapılarında önemli değişiklikler olmadan yüksek sıcaklıklarda kararlı bir şekilde kalmalarını sağlar. Yüksek termal kararlılık, kataliz ve termal enerji depolama gibi yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar için oldukça önemlidir.

4.4. Yüksek İyonik İletkenlik

İyonik sıvılar yüksek iyonik iletkenlikleriyle bilinirler. Bu özellik, iyonik sıvıların süper kapasitörlerde ve gelişmiş bataryalar için enerji depolamada oldukça önemlidir. Yüksek iyonik iletkenlik, enerji depolama cihazlarının verimliliğine ve performansına katkıda bulunmaktadır. İyonik sıvılar, iyonları etkili bir şekilde taşıma yetenekleriyle enerji depolama sistemlerinin performansını artırarak şarj ve deşarj oranlarını, enerji yoğunluğunu ve çevrim ömrünü iyileştirir. Bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişte ve ulaşımın elektrifikasyonunda büyük önem taşıyan daha güvenli ve daha verimli enerji depolama çözümleri sağlamaktadır.

4.5. Geniş Sıvı Kalma Aralığı

İyonik sıvılar geniş sıvı kalma aralığına sahiptir. İyonik sıvıların düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara kadar olan geniş sıvı kalma aralığı, farklı sıcaklık gereksinimleri olan proseslerdeki uygulanabilirliklerini artırır. Bu benzersiz özellik, hem yüksek sıcaklık tepkimelerinde hem de kriyojenik süreçlerde çözücü olarak işlev görmelerini sağlar. İyonik sıvıların aşırı sıcaklıklara uyarlanabilirlikleri, endüstriyel uygulamalardaki çok yönlülüklerine katkıda bulunur. Örneğin, yüksek sıcaklık tepkimelerinde iyonik sıvılar sıvı hallerini koruyarak verimli ısı transferini ve gelişmiş tepkime kontrolünü kolaylaştırır. Aynı zamanda, düşük sıcaklıklarda sıvı

halde bulunmaları, iyonik sıvıları süper kritik sıvı ekstraksiyonu ve düşük sıcaklık kimyası gibi uygulamalar için oldukça avantajlı hale getirmektedir.

4.6. Yanıcı ve Patlayıcı Olmama

Birçok iyonik sıvı, iyonik yapıları ve uçucu bileşen içermemeleri nedeniyle yanıcı ve patlayıcı özelliğe sahip değildir. İyonik sıvıların uçucu olmaması, onları yangın veya patlama riskinin söz konusu olduğu endüstriyel süreçler için daha güvenli bir seçim haline getirmektedir. Bu özellik, maliyeti yüksek güvenlik önlemlerine ve tedbirlerine olan ihtiyacı azaltarak genel operasyonel güvenliğe ve maliyet etkinliğine katkıda bulunur. İyonik sıvıların uçucu olmayan yapısı sadece endüstriyel süreçlerde güvenliği arttırmakla kalmadığı gibi, aynı zamanda emisyonların azaltılmasına da katkı sağlamaktadır.

4.7. Su ile Karışabilirlik veya Hidrofobiklik

İyonik sıvıların suyla karışabilirliği veya hidrofobikliği, seçilen spesifik katyon ve anyonların özelliklerine bağlıdır. Bazı iyonik sıvılar yüksek oranda suyla karışabilir. Bu özellik sudaki çözünürlüğün yüksek olması gereken uygulamaları kolaylaştırırken, bazı iyonik sıvılar hidrofobik özellikte olabilir. İyonik sıvıların bu özelliği ise suyun dışlanması gereken prosesler için oldukça kullanışlıdır.

4.8. Ayarlanabilir Özellikler

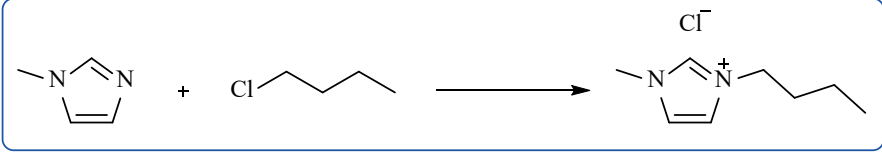
İyonik sıvıların ayarlanabilir çözme kabiliyeti, çok sayıda olası katyon ve anyon kombinasyonunun bir sonucudur. Araştırmacılar, katyon ve anyon bileşenlerini değiştirerek iyonik sıvıların özelliklerini belirli uygulamalara optimize edecek şekilde özelleştirebilirler. Örneğin, iyonik sıvının yapısının değiştirilmesi, iyonik sıvının çözme kabiliyetini, polaritesini ve diğer kritik parametrelerini etkileyebilir. Bu çok yönlülük, farklı uygulamalar için çözücülerin tasarımında oldukça önemlidir. Araştırmacılar viskozite, polarite ve çözme kapasitesi gibi özellikleri belirli bir tepkime veya ayırma işleminin ihtiyaçlarına uyacak şekilde optimize etmek için belirli iyonik sıvı kombinasyonlarını seçebilirler. Bu özelleştirilebilirlik, çeşitli yeşil kimya uygulamalarının gereksinimlerini karşılamak için iyonik sıvılar üzerinde ince ayar yapılmasına olanak tanıyarak iyonik sıvıların çok yönlülüklerini daha da arttırmaktadır [15].

5. İyonik Sıvıların Sentezi

İyonik sıvıların sentezi, istenen özellikleri elde etmek için belirli katyonları ve anyonları birleştirmeyi amaçlayan çeşitli yöntemleri içerir [16]. Aşağıda iyonik sıvıların bazı sentez yöntemleri özetlenmiştir:

5.1. Kuaternizasyon

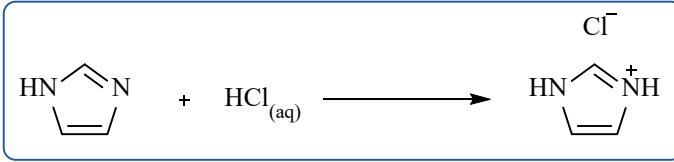
Kuaternizasyon, iyonik sıvı özelliğine sahip bir kuaterner amonyum tuzu oluşturmak için, 1-substitüyeimidazol gibi tersiyer bir azot atomu taşıyan organik bileşimin alifatik yapıdaki alkil halojenür ile tepkimesini içerir (Şekil 9). Elde edilen kuaterner amonyum tuzu daha sonra uygun bir anyon ile değiştirilebilir. Alkilenmiş azot katyonları sentezlenen iyonik sıvıların benzersiz özelliklerine katkıda bulunur.



Şekil 9. Kuaternizasyon yöntemiyle iyonik sıvıların sentezi.

5.2. Nötralizasyon

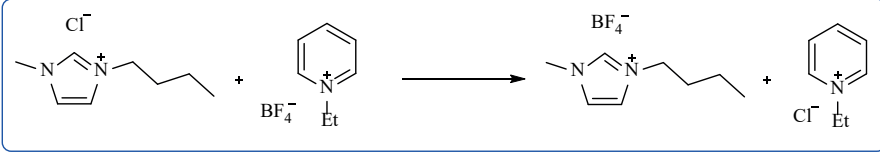
Bu yöntem, iyonik bir sıvı oluşturmak için bazik özelliğe sahip organik kökenli bir maddenin asidik bir muadili ile birleştirilmesini içerir. Örneğin, alkali bir organik madde olan imidazol'ün hidroklorik asit ile nötralizasyonu bir imidazolium klorür iyonik sıvısı verebilir (Şekil 10). Asit ve baz seçimi, sentezlenen iyonik sıvının özelliklerini etkileyerek ortaya çıkan katyon ve anyonu belirlemede etkilidir.



Şekil 10. Nötralizasyon yöntemiyle iyonik sıvıların sentezi.

5.3. Metatez

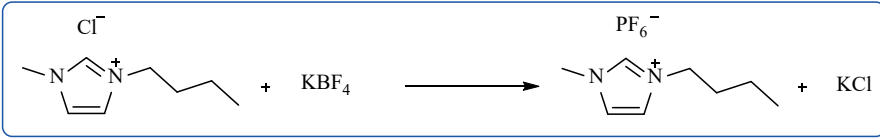
Metatez tepkimeleri, iki tuz arasındaki iyon değişimini içerir ve yeni bir iyonik sıvı oluşumunu sağlar (Şekil 11). Araştırmacılar, istenen katyon ve anyonlara sahip belirli başlangıç tuzlarını seçerek özel iyonik sıvılar oluşturabilirler. Bu yöntem, araştırmacılara benzersiz iyon kombinasyonlarına sahip iyonik sıvılar tasarlama esnekliği sağlar.



Şekil 11. Metatez yöntemiyle iyonik sıvıların sentezi.

5.4. İyon Değişimi

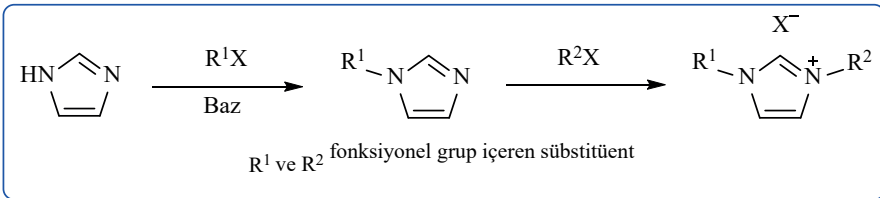
İyon değişimi, basit bir tuzdaki iyonların iyonik sıvının iyonlarıyla yer değiştirdiği ve farklı bir iyonik sıvı oluşumuyla sonuçlanan bir süreçtir (Şekil 12). Örneğin, inorganik kökenli halojenür tuzları, belirli katyon ve anyonlara sahip iyonik sıvılar oluşturmak için iyon değişimine tabii tutulabilir. Bu yöntem, öncül tuzların seçimine bağlı olarak iyonik sıvıların özelleştirilmesini sağlar.



Şekil 12. İyon değişimi yöntemiyle iyonik sıvıların sentezi.

5.5. Fonksiyonizasyon

Fonksiyonizasyon yöntemleri, iskelet yapıya belirli işlevsel gruplar ekleyerek (R^1 veya R^2) mevcut iyonik sıvıların özelliklerini değiştirmeye odaklanır (Şekil 13). Araştırmacılar, kimyasal tepkimeler yoluyla iyonik sıvıların özelliklerini belirli gereksinimleri karşılayacak şekilde uyarlayabilirler. Bu yaklaşım, iyonik sıvıların sentezine sıfırdan başlamaksızın iyonik sıvı özelliklerinin fonksiyonize edilmesine olanak tanıyarak verimliliği ve esnekliği artırır.



Şekil 13. Fonksiyonizasyon yoluyla iyonik sıvıların sentezi.

Yukarıda bahsedilen tüm yöntemler araştırmacılara çeşitli katyon ve anyon kombinasyonlarına sahip iyonik sıvıları tasarlamak için birtakım yöntemler bütünü sağlamaktadır. Her yöntem kendi içerisinde sentez kolaylığı, maliyet etkinliği ve ortaya çıkan iyonik sıvının yapısını kontrol etme yeteneği gibi birtakım avantajlar sunmaktadır.

6. İyonik Sıvıların Uygulama Alanları

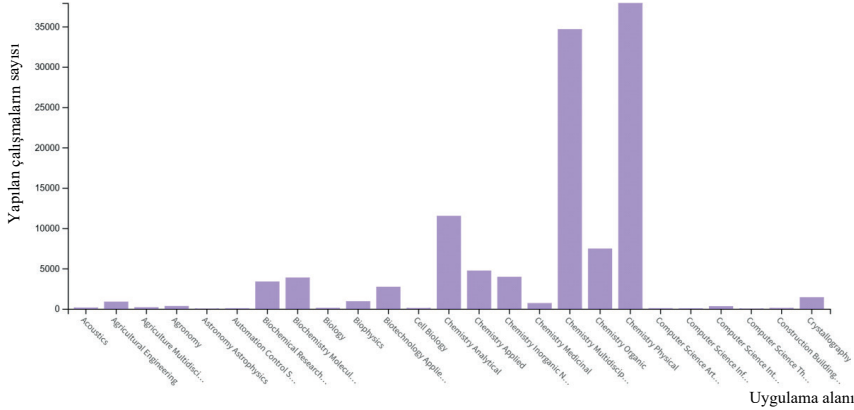
İyonik sıvılar benzersiz özellikleri nedeniyle çeşitli alanlarda geniş bir uygulama alanlarına sahiptir. İyonik sıvılar genel olarak yeşil çözücüler olarak bilinmelerine rağmen, günümüzde kataliz, elektrokimya, spektroskopi ve malzeme bilimi gibi çeşitli alanlarda uygulamalara da sahiptirler. Örneğin; enerji depolama uygulamaları, iyonik sıvıların yeni nesil pillerin geliştirilmesinde nasıl etkili olduğunu, yanıcı ve uçucu olmayan yapılarının güvenlik ve performansı nasıl arttırdığını ortaya koymaktadır. İyonik sıvılar, malzeme biliminde benzersiz özelliklere sahip gelişmiş malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 14'de iyonik sıvıların bazı önemli uygulama alanları gösterilmiştir [17].



Şekil 14. İyonik sıvıların bazı uygulama alanları.

İyonik sıvıların benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri onları yeşil kimya ve katalizden, enerji depolama ve elektrokimyaya kadar çeşitli alanlarda uygulamaları olan çok yönlü bileşikler haline getirmektedir. Araştırmacılar, çeşitli bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda yenilikçi çözümler için bu özellikleri keşfetmeye ve kullanmaya devam etmektedir [18].

Şekil 15’de iyonik sıvılar alanında şimdiye kadar yapılan çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımı gösterilmiştir. Grafik, Web of Science™ veri tabanına “*iyonik sıvılar*” konu başlığı girilerek 15.01.2025 tarihinde alınan sonuçları göstermektedir.



Şekil 15. İyonik sıvılar alanında yapılan çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımı.

Aşağıda iyonik sıvıların bazı uygulama alanları özetlenmiştir.

6.1. Kimyada Yeşil Çözücüler

İyonik sıvılar, geleneksel uçucu organik çözücülere alternatif olarak gösterilen çevre dostu yeşil çözücüler olarak kabul edilmektedir. İyonik sıvılar çeşitli kimyasal işlemlerde daha yeşil ve daha sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır [19].

6.2. Kataliz ve Organik Sentez

İyonik sıvılar, kataliz ve organik sentez tepkimeleri için verimli çözücüler olarak hizmet etmektedir. İyonik sıvılar, hem homojen hem de heterojen katalizde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Katalizde genellikle çözücü veya yardımcı çözücü olarak kullanılırlar ve çeşitli kimyasal dönüşümlerin seçiciliğini ve verimliliğini arttırmaları [20]. Katalizdeki kullanımları petrokimyasal süreçlerden, farmasötik sentezlere kadar çok çeşitli alanları kapsamaktadır. Örneğin; petrokimya endüstrisinde iyonik sıvılar biyokütlenin seçici bir şekilde değerli kimyasallara dönüştürülmesini kolaylaştırarak sürdürülebilir ve yenilenebilir hammaddelerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. İyonik sıvıların benzersiz çözme özellikleri, çok çeşitli

reaktifleri çözebilmelerini ve onları aktive etmelerini sağlayarak, sürdürülebilir katalizde bu reaktifleri değerli araçlar haline getirmektedir. Ayrıca, yeniden kullanılabilirlikleri ve geri dönüştürülebilirlikleri atık oluşumunu minimize ederek katalitik süreçlerde maliyet etkinliğini artırmaktadır [21].

6.3. Ekstraksiyon ve Ayırma Prosesleri

İyonik sıvılar, ilaç, petrokimya ve çevre endüstrilerinde hayati önem taşıyan ayırma ve ekstraksiyon işlemlerinde oldukça etkilidir. Belirli bileşikler seçici olarak çözme yetenekleri, düşük uçuculukları ile birleştiğinde sıvı-sıvı ekstraksiyonu ve gaz ayırma gibi uygulamalar için oldukça kullanışlı yöntemler sunmaktadır. Ayrıca iyonik sıvılar, cevherlerden metallerin çıkarılmasında, kimyasalların saflaştırılmasında ve karmaşık karışımların ayrılmasında kullanılarak seçicilik ve verimlilik açısından avantajlar sunarlar. İyonik sıvılar, farmasötik kimya alanında doğal kaynaklardan aktif farmasötik bileşenlerin ekstraksiyonunda kullanılmakta ve yeni ilaç formülasyonlarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, petrokimya endüstrisinde, iyonik sıvılar yakıtlardan sülfür ve nitrojen bileşiklerinin giderilmesinde, çevresel düzenlemelerin ele alınmasında ve yakıt kalitesinin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Çevresel uygulamalarda, iyonik sıvılar karbon yakalama işlemlerinde verimliliklerini göstererek sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarına katkıda bulunmaktadır. Seçici ayırma süreçlerindeki rolleri, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanması açısından hayati önem taşımaktadır.

6.4. Elektrokimyasal Uygulamalar

İyonik sıvılar, enerji depolama alanına önemli katkılar sunmaktadır. Süper kapasitörlerde ve lityum-iyon ve lityum-sülfür piller dahil olmak üzere gelişmiş pillerde elektrolit olarak kullanılmaktadırlar. Yüksek iyonik iletkenlikleri, alev almazlıkları ve geniş elektrokimyasal kararlılıkları iyonik sıvıları bu uygulamalar için oldukça ideal bir araç kılmaktadır. İyonik sıvı bazı elektrolitler, enerji depolama sistemlerinin güvenliğini, enerji yoğunluğunu ve çevrim ömrünü iyileştirerek yenilenebilir enerji ve elektrikli ulaşımdaki kritik zorlukları ele almaktadır. Ayrıca, uçucu olmayan yapıları ve geniş elektrokimyasal özellikleri, araçların elektrifikasyonunda ve yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunda kritik bir faktör olan enerji depolama çözümlerinin uzun ömürlülüğüne ve güvenliğine katkıda bulunurlar.

6.5. Gaz Emme ve Depolama

İyonik sıvılar, başta karbondioksit olmak üzere atmosfere zararlı gazları absorbe etme ve depolama yetenekleri açısından da araştırılmaktadır. Bu özellikleri, iyonik sıvıları karbon yakalama ve depolama uygulamaları için umut verici malzemeler haline getirmekte ve bu uygulamalar sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarına katkıda bulunmaktadır.

6.6. Biyokataliz ve Biyoteknoloji

İyonik sıvılar, biyomoleküllerle uyumlulukları nedeniyle biyokataliz ve biyoteknolojide kullanılmaktadır. İyonik sıvılar enzim stabilitesini ve aktivitesini artırabilirler, bu da onları enzimatik tepkimelerde, protein katlama çalışmalarında ve diğer biyoteknolojik uygulamalarda değerli kılmaktadır [22].

6.7. Yağlayıcılar ve Yağlayıcı Katkı Maddeleri

İyonik sıvılar, düşük uçuculukları ve yüksek termal kararlılıkları nedeniyle yağlayıcılar ve yağlayıcı katkı maddeleri olarak kullanılmaktadır. Eşsiz özellikleri, makine bileşenlerinin yağlama performansını ve uzun ömürlülüğünü artırmaktadır.

6.8. Malzeme Bilimi Uygulamaları

Gelişmiş malzemelerin tasarımı ve sentezinde iyonik sıvıların benzersiz özelliklerinden faydalanılmıştır. İyonik sıvı tabanlı süreçler, iyonik sıvı tabanlı polimerler ve fonksiyonel nanomalzemeler de dahil olmak üzere benzersiz özelliklere sahip ileri malzemeler oluşturmak için iyonik sıvılar kullanılmaktadır. İyonik sıvılar nanopartiküllerin ve nanoyapıların sentezinde ve stabilizasyonunda da kullanılmaktadır. İyonik sıvılar nanoparçacık büyümesi ve organizasyonu için kontrollü bir ortam sağlayarak nanomalzeme ve nanoteknoloji uygulamalarına katkı sağlamaktadır. Bu malzemeler sensörler, kaplamalar ve çeşitli endüstriler için ileri malzemeler geliştirilmesi alanlarında uygulamalara sahiptir. İyonik sıvı bazlı süreçler yoluyla malzemelerin yapısını ve özelliklerini fonksiyonelize etme yeteneği, malzeme bilimi ve mühendisliği için yeni yollar açmaktadır. Örneğin, iyonik sıvı bazlı prosesler, esnek elektronikte kullanılan iletken polimerlerin üretiminde etkili olup giyilebilir teknolojide ilerlemeler sağlamaktadır. Ayrıca, iyonik sıvılar kataliz ve sensör teknolojilerinde uygulamaları olan metal nanopartiküller ve nanokompozitler gibi fonksiyonel nanomalzemelerin sentezinde de kullanılmaktadırlar.

6.9. İlaç Salınımı Uygulamaları

İyonik sıvıların ilaç salınım sistemlerindeki potansiyelleri henüz araştırılmaktadır. İyonik sıvıların çeşitli bileşikleri çözme ve ayarlanabilir olma yeteneklerinin belirli ilaç salınım uygulamaları için uyarlanmış iyonik sıvıların tasarımına izin vererek, ilacın çözünürlüğünü ve biyoyararlılığını arttırabileceği düşünülmektedir.

7. Sonuç

İyonik sıvılar, son yıllarda hem akademik hem de endüstriyel alanda devrim yaratan bileşiklerdir. Bu bileşikler, atıkların azaltılması, ürün kalitesinin arttırılması ve kimyasal süreçlerin güvenli hale getirilmesi bakımından büyük avantajlar sunmaktadır. Yapılan çalışmalar, iyonik sıvıların geleneksel uçucu organik çözücülerin yerine çevre dostu alternatifler olduklarını ortaya koymaktadır. İyonik sıvıların kullanım alanları yeşil kimyanın ötesine geçerek enerji depolama, farmasötikler ve çevresel iyileştirme gibi çeşitli alanlara kadar yayılmıştır. Gerçek dünyadaki vaka çalışmaları, iyonik sıvıların acil küresel zorlukları ele alma ve daha sürdürülebilir ve verimli bir endüstriyel ortama katkıda bulunma potansiyelini göstermektedir. İyonik sıvılar yeşil ve sürdürülebilir kimya için yeni yollar açmaktadır. İyonik sıvıların dönüştürücü potansiyeli, bilim insanlarının ve endüstrinin süregelen adanmışlığı ile birleştiğinde, kimya endüstrisi için daha parlak ve çevreye duyarlı prosesler açısından bir gelecek vaat etmektedir.

İyonik sıvıların bahsedilen avantajlarına rağmen bir takım kısıtlamaları da bulunmaktadır. Yüksek üretim maliyetleri, toksisite ile ilgili endişeler ve biyolojik olarak parçalanabilirlikle ilgili sorunlar, iyonik sıvıların daha geniş bir çapta benimsenmelerinin önünde engel teşkil etmektedir [23]. Bu sınırlamaların yenilikçi sentez yaklaşımları, daha güvenli iyonik sıvı tasarımları ve biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerin geliştirilmesi gibi yenilikçi çözümler ile giderilebileceği kesindir. Bazı endüstriyel uygulamalar için daha iyi alternatiflerin gerekli olduğu tartışılmazdır. Bu nedenle sınırlamalar olmaksızın çok çeşitli olası uygulamalarla neredeyse sınırsız çeşitlilikte yeni iyonik sıvılar keşfedilmeye devam edilmelidir.

Bu bölümde, iyonik sıvıların çok yönlü ve dönüştürücü rolü üzerine odaklanılmıştır. İyonik sıvıların yeşil çözücü kimyasındaki ve çeşitli uygulamalardaki dikkate değer rolü araştırılmış, avantajları, kısıtlamaları ve gelecekteki beklentileri tartışılmıştır. İyonik sıvılar sadece yeşil çözücüler olarak düşünülmemelidir. İyonik sıvılar kimya endüstrisinin karşı karşıya olduğu en acil sorunlardan bazılarının çözümü durumundadır. Bu nedenle, devam eden araştırmalar ve yenilikçi yaklaşımlar iyonik sıvıların kapsamını

geliştirmeye büyük bir hızla devam etmektedir. Yakın bir gelecekte, iyonik sıvıların yeşil ve sürdürülebilir kimya ilkeleriyle uyumlu yeni çözümler sunacağından hiçbir şüphe yoktur.

Kaynaklar

- [1] N. Topraksever. “Green Chemical Solvents”. In: Research on Mathematics and Science: A. Akpınar, A. (Ed.), *Özgür Publications*, (2023).
- [2] E. Kianfar, S. Mafi. “Ionic Liquids: Properties, Application, and Synthesis”. *Fine Chemical Engineering*, 2020, 2(1), 21–29.
- [3] Ö. Özeroğlu. *İyonik Sıvıda Amin ve Ester Oluşumu*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Malatya, (2009).
- [4] P. Walden. “Molecular weights and electrical conductivity of several fused salts”. *Bull. Acad. Imper. Sci.* (St. Petersburg), 1914, 1800.
- [5] Q. Zhang, J.M. Shreeve. “Energetic ionic liquids as explosives and propellant fuels: a new journey of ionic liquid chemistry”. *Chem. Rev.*, 2014, 114, 10527–10574.
- [6] K.R. Seddon. “Proceedings of 5th International Conference on Molten Salt Chemistry and Technology”. In *Molten Salt Forum*: H. Wendt (Ed.), 1998, 5(6), 53–62.
- [7] J. Fliieger, M. Fliieger. “Ionic Liquids Toxicity–Benefits and Threats. *Int. J. Mol. Sci.*, 2020, 21(17), 6267.
- [8] S.S. Promila, P. Devi. “Ionic Liquids: Green Solvents of Sustainable Chemistry”. *Int. J. Chem. Stud.*, 2017, 5(6), 1497–1503.
- [9] M.J. Earle, K.R. Seddon. “Ionic liquids. Green Solvents for the Future”. *Pure Appl. Chem.*, 2000, 72(7), 1391–1398.
- [10] S. Kanawade, S. Kesarwani, D.B. Tripathy, A. Gupta, S.K. Singh, P. Chhabra. “Introduction, Types, Properties, and Applications of Switchable Solvents: A Review”. *ChemistrySelect*, 2024, 9, e202401389.
- [11] O. Soleimani. “Properties and Applications of Ionic Liquids”. *J. Chem. Rev.*, 2020, 2(3), 169–181.
- [12] C. Feldmann, M. Ruck. “Ionic Liquids–Designer Solvents for the Synthesis of New Compounds and Functional Materials”. *Z. Anorg. Allg. Chem.*, 2017, 643(1), 2.
- [13] G. Kaur, H. Kumar, M. Singla. “Diverse Applications of Ionic Liquids: A Comprehensive Review.”, *J. Mol. Liq.*, 2022, 351, 118556.
- [14] I. Jhanji. “The Role of Ionic Liquids in Green Solvent Chemistry: Properties and Applications”. *International Research Journal of Engineering & Applied Sciences*, 2023, 11(4), 57–67.
- [15] D.D. Patel, J.-M. Lee. “Applications of Ionic Liquids”. *Chem. Rec.*, 2012, 12, 329–355.
- [16] V. Sowbhagyam. “Ionic Liquids as Green Solvents: A Comprehensive Review”. *Int. Res. J. Adv. Eng. Hub.*, 2024, 2(2), 220–224.

- [17] A.J. Greer, J. Jacquemin, C. Hardacre. “Industrial Applications of Ionic Liquids”. *Molecules*, **2020**, *25*, 5207-5237.
- [18] G.V. Kaliyannan, S.V. Palanisamy, E.B. Priyanka, S. Thangavel, S. Sivaraj, R. Rathanasamy. “Investigation on Sol-Gel Based Coatings Application in Energy Sector–A Review”. *Mater. Today: Proc.*, **2021**, *45(2)*, 1138–1143.
- [19] S.K. Singh, A.W. Savoy. “Ionic Liquids Synthesis and Applications: An Overview”. *J. Mol. Liq.*, **2020**, *297*, 112038.
- [20] H. Kolancılar, “Klasik Çözücülere Bir Alternatif; İyonik Sıvılar”. *Trakya Univ. J. Sci.*, **2010**, *11(2)*, 90–100.
- [21] H. Zhao, S.V. Malhotra. “Applications of Ionic Liquids in Organic Synthesis”. *Aldrichim. Acta*, **2002**, *35(3)*, 75–83.
- [22] I.M. Marrucho, L.C. Branco, L.P.N. Rebelo. “Ionic Liquids in Pharmaceutical Applications”. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, **2014**, *5*, 527–46.
- [23] A.A. Shamsuri. “Ionic Liquids: Preparations and Limitations”. *Makara J. Sci.*, **2010**, *14(2)*, 101–106.