دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۱، پیاپی ۱
بهار ۱۴۰۳، صفحات ۳۱-۲۱

"مقاله مروری"

حلال‌های یوتکتیک عمیق: حلال‌های سبز نوظهور

بهرام به‌نژادی*

استادیار دانشکده مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: b_behnajady@sut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳)

چکیده

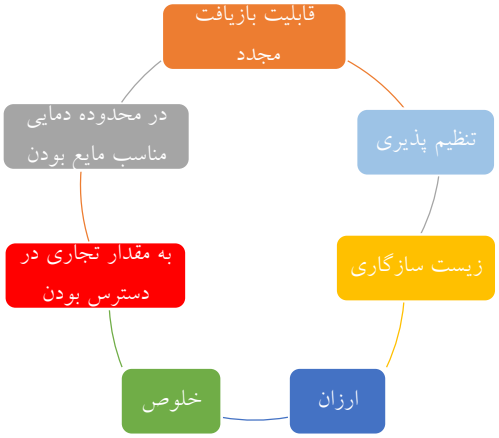
توسعه پایدار و به تبع آن صنعت سبز نیازمند استفاده از حلال‌های جدیدی به جای حلال‌های متداول است. حلال‌های متداول اغلب سمی و فرار هستند و باعث مشکلات زیست محیطی می‌شوند. در چند دهه اخیر حلال‌های یوتکتیک عمیق توسط محققین در سرتاسر دنیا مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، پیشینه ظهور و استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق از طریق اسناد منتشر شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است. حلال‌های یوتکتیک عمیق ترکیبی از دو یا سه جزء ارزان و ایمن هستند که از طریق پیوند هیدروژنی ترکیب می‌شوند. بطوریکه یک محلول یوتکتیک با دمای ذوب پایین‌تر از هر کدام از اجزای ترکیبات تشکیل دهنده بدست می‌آید و حلال بدست آمده عموماً در دماهای کم‌تر از ۱۰۰°C به حالت مایع است. حلال‌های یوتکتیک عمیق رفتار و خواص فیزیکی و شیمیایی مشابهی با محلول‌های یونی از خود نشان می‌دهند. در حالی که حلال‌های یوتکتیک عمیق خیلی ارزان‌تر و زیست‌سازگارتر از محلول‌های یونی هستند. به دلیل مزیت‌های زیاد حلال‌های یوتکتیک عمیق مطالعات بسیار زیادی در زمینه تهیه و سنتز حلال‌ها و همچنین بررسی و شناخت خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها انجام می‌گیرد. علاوه بر این کاربرد حلال‌های یوتکتیک عمیق در زمینه‌های مختلف در حال بررسی بوده و استفاده از این حلال‌ها در زمینه‌هایی نظیر سنتز نانوذرات، الکتروپولیش، پوشش‌دهی الکتریکی، استخراج فلزات به سرعت در حال افزایش است. به طور کلی، حلال‌های یوتکتیک عمیق به دلیل خواص مثبت آن‌ها در مقایسه با حلال‌های معمولی، پتانسیل قابل توجهی برای توسعه پایدار و کاربردهای صنعت سبز از خود نشان می‌دهند. تحقیقات در حال انجام به منظور افزایش درک ما از این حلال‌ها و کشف کاربردهای متنوع آن‌ها در زمینه‌های مختلف ادامه دارد.

واژه‌های کلیدی: حلال، یوتکتیک عمیق، حلال سبز، توسعه پایدار

مقدمه

بسیاری از فرآیندهای صنعتی از قبیل فرآیندهای مورد استفاده در صنایع نساجی، کاغذ، غذایی، فلزات و شیمیایی و همچنین آزمایشگاهی مثل سنتز، تصفیه و آنالیز نیازمند استفاده از حلال مناسب هستند. بنابراین بایستی حلال‌هایی وجود داشته باشند که خواص مطلوب و مورد نظر فرآیند را تامین کرده و از طرف دیگر معایب و اثرات نامطلوب روی محیط اطراف نداشته و یا اثرات نامطلوب حداقلی داشته باشد (۲و۱).

در شکل ۱ ویژگی‌هایی که مایعات بایستی داشته باشند تا به عنوان حلال استفاده شوند، آورده شده است. یک حلال بایستی در محدوده مناسبی از دما مثل دمای محیط به شکل مایع باشد. این مایع بایستی به مقدار تجاری در دسترس باشد و خلوص مناسبی برای فرآیند مورد نظر داشته باشد و یا به آسانی برای استفاده در فرآیند مورد نظر قابل تصفیه باشد. همچنین بایستی نسبت به فرآیند مورد نظر، گران قیمت نبوده و عموماً قابلیت بازیافت مجدد را داشته باشد. علاوه بر این‌ها بایستی زیست سازگار بوده و در زمان ذخیره‌سازی نبایستی مشکلات زیست محیطی داشته باشد. یکی دیگر از جنبه‌های مهم حلال‌ها، قابلیت تنظیم‌پذیری[1] آن‌ها است. بطوریکه انحلال ترکیب مطلوب و یا حتی غیرمطلوب از طریق تغییر شرایطی مثل دما، فشار یا از طریق استفاده از افزودنی امکان‌پذیر باشد (۳).



شکل (۱): ویژگی‌های مایعات به عنوان حلال

آب بخاطر مزایای فراوان و اثرات نامطلوب حداقلی، حلالی است که به طور گسترده استفاده می‌شود. به آسانی با خلوص مطلوب در دسترس بوده و ارزان است. همچنین در محدوده دمایی مناسبی به شکل مایع بوده و قابلیت بازگردانی دارد. علاوه بر این برای بیش‌تر حل‌شونده‌ها، حلالیت مناسبی دارد، غیرسمی بوده و سازگار با محیط زیست می‌باشد. حتی می‌توان از آب در دماها و فشارهای بالاتر از نقطه جوش و شرایط بحرانی نیز استفاده کرد (۴ و۳).

با این وجود، برای مواد غیرقطبی، بیش‌تر گازهای دائمی[2]، پلیمرهای صنعتی و مواد جامدی که انرژی ساختاری بالایی دارند و نمی‌توان توسط انرژی آبپوشی و تغییر آنتروپی حین انحلال بر آن غلبه نمود، آب به عنوان یک حلال ضعیف عمل می‌کند. علاوه بر این بعضی مواقع نیاز است که برخی ترکیبات بدون تغییر باقی بمانند، ولی آب نسبت به این ترکیبات موثر بوده و منجر به انحلال آن‌ها می‌شود. بنابراین یافتن حلال‌های جایگزین و مناسب که بتوان در صنعت و

[1] Tunability

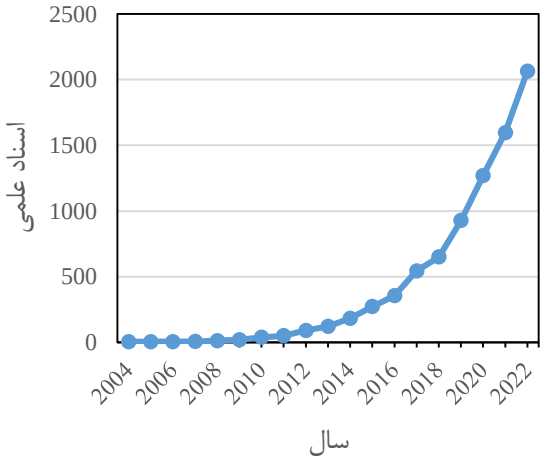
[2] Permanent gases

کارهای آزمایشگاهی به طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد، ضروری می‌باشد (۷-۵ و۳).

اسناد علمی منتشره در زمینه حلال‌های یوتکتیک عمیق[1]

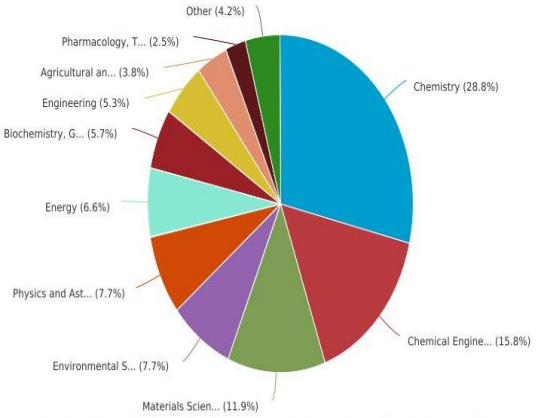
با توجه به ویژگی‌ها و خواص مناسب، حلال‌های یوتکتیک عمیق مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته و مطالعات نسبتاً زیادی در زمینه شناخت و کاربرد این حلال‌ها انجام گرفته است. بنابراین پژوهشگران ابتدا به سنتز حلال‌های یوتکتیک عمیق پرداخته و در ادامه خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها را مورد بررسی وشناخت قرار داده‌اند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مطالعات و پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه حلال‌های یوتکتیک عمیق در سال‌های اخیر به سرعت در حال افزایش می‌باشد. بطوریکه تعداد اسناد علمی منتشره به صورت نمایی افزایش یافته است. از طرف دیگر شکل ۳ تعداد اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق در زمینه‌های مختلف را نشان می‌دهد که زمینه شیمی، زمینه اصلی بوده و با ۲۸/۸ درصد بیش‌ترین تعداد اسناد علمی منتشره را به خود اختصاص داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌تر مطالعات و پژوهش‌های انجام گرفته در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق در راستای سنتز حلال‌های یوتکتیک عمیق و شناسایی خواص و ویژگی‌های این نوع حلال‌ها بوده است. زمینه‌های مهندسی شیمی و علم مواد عمدتاً در جهت کاربرد و نحوه استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق در رتبه‌های بعدی قرارگرفته‌اند.

در شکل ۴ توزیع نوع اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ۸۷/۱ درصد از اسناد منتشره به صورت مقاله می‌باشد که نسبت به انواع دیگر اسناد سهم نسبتاً بزرگی را به خود اختصاص داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حلال‌های یوتکتیک عمیق جزء حلال‌های نوظهور بوده و جای مطالعه و پژوهش بسیاری در این زمینه وجود دارد. نکته قابل توجه دیگر در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق توزیع جهانی انتشارات و کارهای پژوهشی انجام گرفته است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود چین با اختلاف چشمگیری بیش‌ترین تعداد اسناد علمی منتشره را به خود اختصاص داده است. در رتبه‌های بعدی کشورهایی نظیر ایران، هند و ایالات متحده با اختلاف بسیار اندک از یکدیگر قرار دارند.

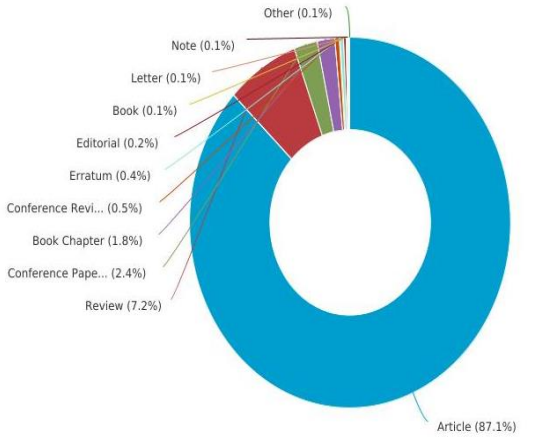


شکل (۲): تعداد اسناد علمی منتشره در زمینه حلال‌های یوتکتیک عمیق براساس سال (۸)

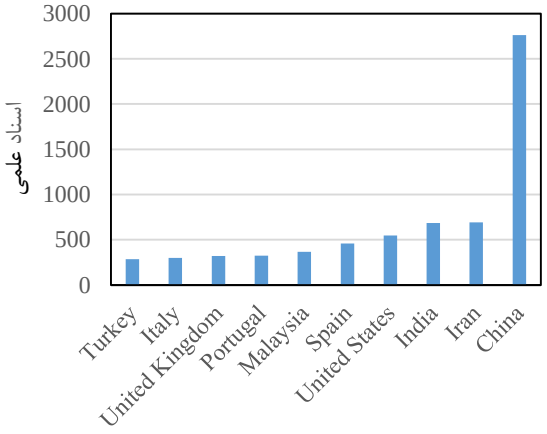
[1] Deep Eutectic Solvents



شکل (۳): توزیع اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق بر اساس زمینه (۸)



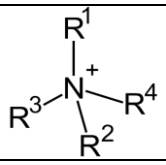
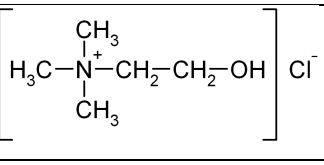
شکل (۴): توزیع اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق بر اساس نوع سند (۸)



شکل(۵): توزیع جهانی اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق (۸)

پیدایش حلال‌های یوتکتیک عمیق

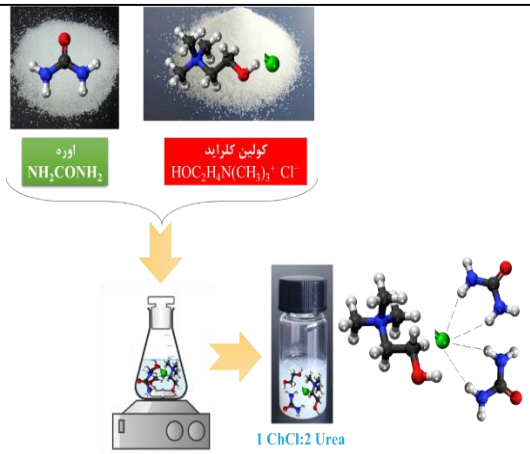
در سال ۲۰۰۱ طی مطالعات ابوت[1] و همکارانش (۹) نمک‌های آمونیوم نوع چهارم (شکل ۶) با کلرید روی ($ZnCl_2$) حرارت داده شده و دمای انجماد مایعات اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، کم‌ترین دمای ذوب که حدود ۲۵-۲۳ درجه سلسیوس بود، مربوط به ترکیب کولین کلراید (شکل ۶) می‌باشد. این مطالعات گسترش پیدا کرده و حلال‌های یوتکتیک متعددی تشکیل شدند (۱۸-۱۰).

الف	ب
	

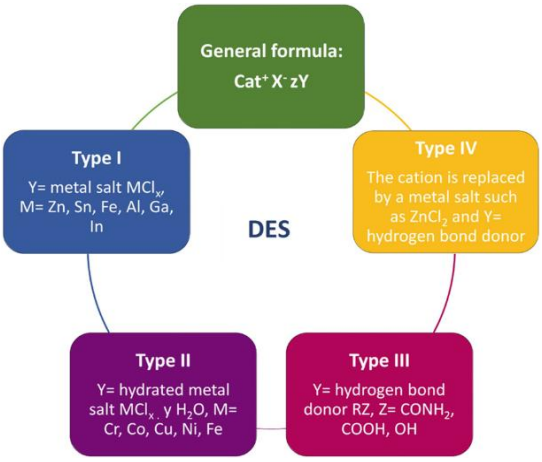
شکل (۶): الف: کاتیون آمونیوم نوع چهارم، ب: کولین کلراید

بنابراین حلال‌های یوتکتیک عمیق حاوی یون‌های بزرگ نامتقارن هستند که انرژی شبکه پایین داشته و در نتیجه دمای ذوب کمی دارند. به طور مثال دمای ذوب کولین کلراید و اوره به ترتیب ۳۰۲ و ۱۳۳ درجه سلسیوس می‌باشد که وقتی با نسبت مول یک به دو مخلوط شوند دمای ذوب آن به ۱۲ درجه سلسیوس می‌رسد. بصورت شماتیک نحوه سنتز حلال یوتکتیک عمیق در شکل ۷ نشان داده شده است (۹).

[1] Abbott



شکل (۷): نحوه تشکیل حلال یوتکتیک عمیق از کولین کلراید و اوره



شکل (۸): انواع حلال‌های یوتکتیک عمیق (۹)

انواع حلال‌های یوتکتیک عمیق

در شکل ۸ فرمول کلی حلال‌های یوتکتیک عمیق آورده شده است که در آن Cat^+ کاتیون آمونیوم، فسفونیوم یا سولفونیوم بوده و X باز لوئیس می‌باشد که عمدتاً آنیون هالید هست. گونه‌های آنیونی کمپلکس بین X^- و یک اسید لوئیس یا برونستد Y (z نشان دهنده تعداد مولکول‌های Y است که با آنیون واکنش می‌دهد) تشکیل می‌شوند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود دسته‌بندی حلال‌های یوتکتیک عمیق براساس عامل کمپلکس انجام گرفته که به ۴ نوع کلی تقسیم شده اند. از بین این ترکیبات، یوتکتیک‌های نوع ۳ که از ترکیب نمک آمونیوم نوع چهارم و دهنده پیوند هیدروژنی به دست می‌آیند بیش‌تر مورد توجه بوده و استفاده می‌شوند. چون که این ترکیبات قابلیت انحلال گونه‌های وسیعی از کلریدها و اکسیدهای فلزات واسطه را دارند. در این ترکیبات کولین کلراید به دلیل ارزانی، زیست تخریب‌پذیری و سمیت کم‌تر، به طور گسترده به عنوان نمک آلی (نمک آمونیوم نوع چهارم) در نقش گیرنده پیوند هیدروژنی استفاده می‌شود (۱۸و۳،۱۵).

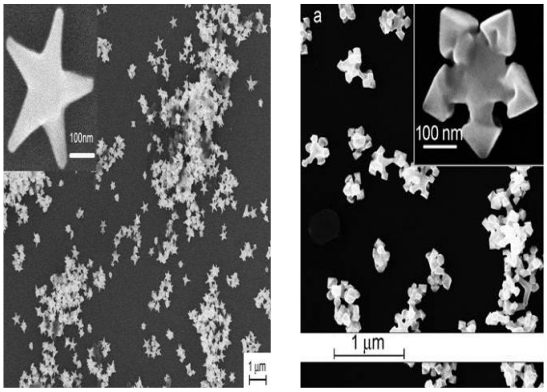
خواص حلال‌های یوتکتیک عمیق

حلال‌های یوتکتیک عمیق قابلیت تغییر ساختار و نسبت ترکیبات را دارند که جهت دستیابی به خواص مورد نظر مطلوب است. عدم اشتعال از مهم‌ترین ویژگی‌های این ترکیبات بوده و برعکس حلال‌های متداول که عمدتاً ترکیبات آلی فرار هستند، حلال‌های یوتکتیک عمیق فشار بخار و سمیت بسیار کمی دارند. این خواص منجر به ایجاد پتانسیل بالایی برای ترکیبات جهت استفاده در بسیاری از فرآیندها، همچون فرآیند کاتالیز، جدایش و الکتروشیمی ایجاد می‌کنند. همچنین به دلیل ارزان بودن و قابلیت بازیافت، این حلال‌ها جزء حلال‌های سبز ایده‌آل بوده و دوستدار محیط زیست می‌باشند (۱۸و۳،۱۴،۱۶).

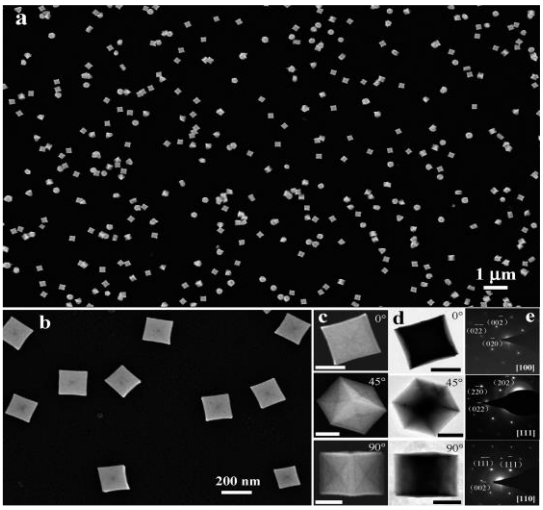
کاربردهای حلال‌های یوتکتیک عمیق

حلال‌های یوتکتیک عمیق به دلیل خواص و ویژگی‌های مناسبی که دارند در بسیاری از زمینه‌ها به کار برده شده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است. بعد از سنتز حلال‌های یوتکتیک عمیق یکی از زمینه‌های پژوهشی مهم بررسی انحلال عناصر مختلف در این حلال‌ها می‌باشد. در ادامه سعی شد در

زمینه سنتز و تولید مواد و ترکیبات مختلف با خواص و ویژگی‌های خاص از این حلال‌ها استفاده شود که نتایج بسیار جالبی نیز بدست آمده است. یکی از کاربردهای جالب و جذاب حلال‌های یوتکتیک عمیق در سنتز نانوذرات فلزی است که شکل کنترل شده‌ای دارند. این نانوذرات با شکل مشخص تاثیر شگرفی بر علم الکتروکاتالیز دارند. لیاو[1] و همکارانش (۱۹) در حلال‌های یوتکتیک عمیق حتی بدون استفاده از جوانه‌زا یا سورفکتانت نانوذرات طلا را جهت استفاده به عنوان کاتالیست پایه طلا سنتز کردند. نانوذرات ستاره شکل طلا که در شکل ۹ مشاهده می‌شوند، از طریق احیاء $HAuCl_4$ توسط L–اسید اسکوربیک در دمای اتاق از حلال صورت گرفته است. نانوذرات با اشکال و ساختار مختلف تنها با تغییر آب محتوای حلال یوتکتیک عمیق امکان‌پذیر بوده است. خواص الکتروکاتالیستی[2] اشکال مختلف نانوذرات طلا با استفاده از احیای الکتریکی[3] آب اکسیژنه بررسی شده است. نتایج نشان داده نانوذرات ستاره شکل نسبت به دیگر شکل‌ها خواص کاتالیستی خیلی بالاتری دارد. حتی سنتز نانوذرات پلاتین با شکل کنترل شده و انرژی سطح بالا از طریق حلال یوتکتیک عمیق انجام گرفته است. بطوریکه به راحتی و بدون نیاز به جوانه‌زا، سورفکتانت یا دیگر مواد شیمیایی رشد نانوذرات پلاتین (شکل ۱۰) کنترل شدند (۲۰).



شکل (۹): تصاویر SEM نانوذرات طلا با اشکال مختلف (۱۹)



شکل (۱۰): تصاویر SEM و TEM نانوذرات پلاتین (۲۰)

از دیگر کاربردهای حلال‌های یوتکتیک عمیق به الکتروپولیش توسط این حلال‌ها اشاره کرد که سه مزیت اساسی نسبت به محلول‌های آبی دارد (۲۲و۲۱):

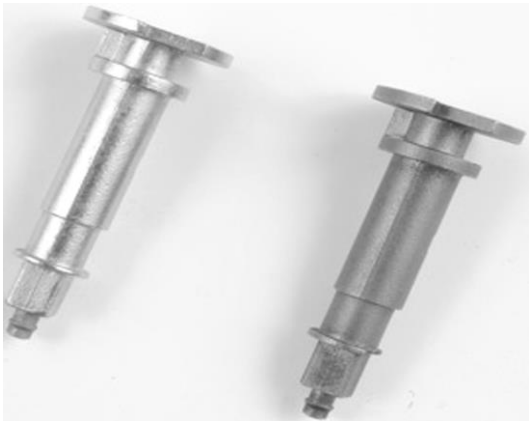
۱) تصاعد گاز در فصل مشترک محلول و آند ناچیز است (احتمال واکنش جانبی خیلی کم است).

۲) راندمان جریان بیش‌تری دارد.

۳) حلال‌های مورد استفاده کم خطر و غیرخورنده هستند.

[1] Liao
[2] Electrocatalytic
[3] Electroreduction

در شکل ۱۱ فولاد زنگ‌نزن قبل و بعد الکتروپولیش نشان داده شده است. علاوه بر فولاد زنگ نزن، الکتروپولیش آلومینیوم، تیتانیم، آلیاژهای کبالت، نیکل و سوپر آلیاژها نیز مورد بررسی قرار گرفته است (۲۶-۲۳).



شکل (۱۱): فولاد زنگ‌نزن سمت راست قبل و سمت چپ بعد از الکتروپولیش (۱۸)

محلول‌های ایده‌آل مورد استفاده در پوشش‌دهی الکتریکی بایستی ارزان، اشتعال ناپذیر، حلالیت بالا نسبت به نمک‌های فلزات، رسانایی بالا، نرخ انتقال جرم بالا و همچنین پایداری الکتروشیمیایی بالایی داشته باشند. اما مهم‌ترین محدودیت سیستم‌های پایه آبی پایداری الکتروشیمیایی و تصاعد گاز به دلیل محدود بودن پنجره پتانسیل است. این محدودیت منجر به تصاعد گاز و در نتیجه تردشوندگی هیدروژنی و پسیوشدن زیر لایه، الکترود و پوشش می‌شود. حلال‌های یوتکتیک عمیق حلالیت بالایی برای نمک‌های فلزات همچنین اکسیدها و هیدروکسیدهای آن‌ها دارند. این یکی از مهم‌ترین مزیت‌های حلال‌های یوتکتیک عمیق نسبت به حلال‌های آلی و آبی است.

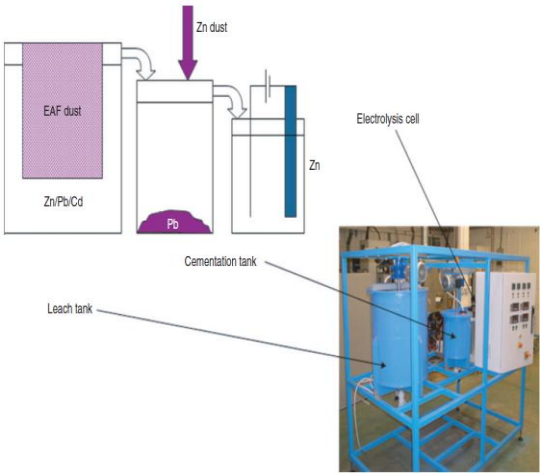
در محلول‌های آبی عموماً پسیوشدن در اثر تشکیل و رسوب اکسیدها یا هیدروکسیدهای غیرمحلول روی سطح الکترود، مانع از پوشش فلز مورد نظر می‌شود. بنابراین وقتی لایه ضخیم از فلز نیاز باشد، این محدودیت مشکل‌ساز خواهد بود. ایجاد لایه‌های ضخیم‌تر فلز، بدون نیاز به عوامل کمپلکس کننده، توسط حلال‌های یوتکتیک عمیق به دلیل عدم پسیوشدن پوشش (حلالیت بالای هیدروکسید و اکسید فلزات) امکان‌پذیر است.

پوپسکو[1] و همکارانش (۲۷) پوشش‌دهی الکتریکی مس از حلال یوتکتیک عمیق حاوی کلرید مس (II) را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از ترکیبات مختلف کولین کلراید با دهنده پیوند هیدروژنی مثل اوره، مالونیک اسید، اگزالیک اسید و اتیلن گلیکول استفاده گردید. بهترین پوشش همگن و چسبنده از حلال‌های کولین کلراید-اگزالیک اسید و کولین کلراید - اتیلن گلیکول به دست آمد. علاوه بر این پوشش‌دهی الکتریکی نیکل از نیکل کلراید دوآبه حل شده در کولین کلراید - اتیلن گلیکول و کولین کلراید - اوره مورد بررسی قرار گرفت (۲۸). نتایج نشان داد که سینتیک و ترمودینامیک فرآیند کاملاً متفاوت از فرآیند محلول‌های آبی است و منجر به مورفولوژی‌های متفاوت نسبت به محلول‌های آبی می‌شود.

همانطور که اشاره شد، حلال‌های یوتکتیک عمیق حلالیت بالایی برای نمک‌های فلزات دارند. این ویژگی باعث گسترش استفاده از این حلال‌ها در استخراج فلزات شده است. در حین فرآیند تولید آهن

[1] Popescu

در کوره‌های قوس الکتریکی[1]، بدلیل استفاده از قراضه‌های فولادی گرد و غباری[2] تولید شده که حاوی روی، آهن و فلزات سمی بصورت اکسید مانند کادمیوم و سرب است. این گرد و غبار بدلیل حضور مقادیر بالای روی، منبع مناسبی برای تولید این فلز بوده و از طرف دیگر به دلیل حضور فلزات سمی، ذخیره‌سازی و نگهداری از آن‌ها نیز مشکل است. بنابراین محققین زیادی سعی در تولید روی از این منبع ثانویه کردند (۳۲-۲۹). اخیراً از حلال‌های یوتکتیک عمیق جهت لیچینگ گرد و غبار فولادسازی استفاده شده است. در این بررسی‌ها از کولین کلراید به‌عنوان گیرنده پیوند هیدروژنی و همچنین اوره و اتیلن گلیکول به‌عنوان اهداکننده پیوند هیدروژنی استفاده شده است. ترکیب کولین کلراید-اوره علاوه بر حلالیت نسبتاً بالا برای روی خاصیت انحلال انتخابی نسبت به آهن را نیز دارا می‌باشد. بنابراین این حلال به صورت انتخابی و با حداقل انحلال آهن، توانسته روی را با بازده نسبتاً مناسب حل کند. با این وجود حلال یوتکتیک عمیق کولین کلراید - اوره ویسکوزیته بالایی دارد و کار کردن با آن سخت است. جهت رفع این مشکل و همچنین بهبود بازده انحلال روی از ترکیب ۳ تایی کولین کلراید -اوره -اتیلن گلیکول استفاده شده که منجر به بهبود نتایج شده است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، این فرآیند در مقیاس نیمه صنعتی انجام گرفته و از طریق الکتروویننگ[3] محلول حاصل از انحلال روی فلزی تولید شده است.



شکل (۱۲): تصویر فرآیند نیمه صنعتی استفاده شده جهت تولید روی از گرد و غبار توسط حلال یوتکتیک عمیق (۳۳)

نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت‌های موجود در مورد حلال‌های متداول و مشکلات زیست محیطی آن‌ها، تهیه و استفاده از حلال‌های جدیدی مثل حلال‌های یوتکتیک عمیق ضروری به نظر می‌آید. در چند دهه اخیرحلال‌های یوتکتیک عمیق بخصوص در زمینه‌های الکتروشیمی، شیمی مواد و اخیراً در عملیات مواد بیومس بسیار مورد توجه بودند. مطالعات در زمینه سنتز این حلال‌ها از طریق مخلوط کردن ترکیبات مختلف که یکی در نقش دهنده پیوند هیدروژنی و دیگری به عنوان گیرنده پیوند هیدروژنی بوده، منجر به شناخت ۴ نوع حلال یوتکتیک عمیق شده است. در همه این حلال‌ها، هر دو ترکیب دهنده و گیرنده پیوند هیدروژنی دمای ذوب بسیار بالایی دارند. اما مخلوط مناسبی که از آن‌ها منجر به تشکیل یک فاز مایع می‌شود با دمای انجماد بسیار پایین (اغلب کم‌تر از دمای محیط) که حلال یوتکتیک عمیق نامیده می‌شود.

[1] Electric Arc Furnace
[2] Dust
[3] Electrowinning

یوتکتیک‌های نوع ۳ بدلیل داشتن قابلیت انحلال ترکیبات کلریدی و اکسیدی، بیش‌تر مورد توجه بوده و بخاطر ارزانی، زیست تخریب‌پذیری و سمیت کم‌تر بیش‌تر از کولین کلراید به عنوان گیرنده پیوند هیدروژنی استفاده می‌شوند. بررسی اسناد علمی منتشره در این زمینه بیانگر نوظهور بودن حلال‌های یوتکتیک عمیق می‌باشد. بطوریکه بیش‌تر مطالعات در زمینه شیمی و در جهت سنتز و شناسایی حلال‌های یوتکتیک عمیق است. چرا که پیشرفت و آینده کاربرد و استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق وابسته به شناسایی اصولی و پایه‌ای خواص فیزیکی و شیمیایی این حلال‌ها هست. بطوریکه با شناخت ترمودینامیکی این سیستم‌ها و فهم رفتار فازی ترکیبات و همچنین اثرات متقابل آن‌ها، می‌توان خواص و ویژگی‌های حلال‌های یوتکتیک عمیق را پیش‌بینی کرده و در کاربردهای مشخص از آن‌ها بهره برد. همین شناخت‌ها منجر به استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق در زمینه‌های استخراج فلزات، الکتروشیمی و شیمی مواد شده است.

تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافعی برای اعلام ندارد.

منابع

[1] Kumar, J.A., Krithiga, T., Manigandan, S., Sathish, S., Renita, A.A., Prakash, P., Prasad, B.S.N., Kumar, T.R.P., Rajasimman, M., Hosseini-Bandegharaei, A., Prabu, D., Crispin, S., 2021, A focus to green synthesis of metal/metal based oxide nanoparticles: Various mechanisms and applications towards ecological approach, Journal of Cleaner Production, 324, 129198.

[2] Ryu, U., Jee, S., Rao, P.C., Shin, J., Ko, C., Yoon, M., Park, K.S., Choi, K.M., 2021, Recent advances in process engineering and upcoming applications of metal–organic frameworks, Coordination Chemistry Reviews, 426, 213544.

[3] Reichardt, C., 2007, Solvents and solvent effects: An introduction. Organic Process Research & Development, 11, 105.

[4] Messerle, B.A., Wider, G., Otting, G., Weber, C., Wuthrich, K., 1989, Solvent suppression using a spin lock in 2D and 3D NMR spectroscopy with H_2O solutions, Journal of Magnetic Resonance, 85, 608.

[5] Del Valle, E.M.M., 2004, Cyclodextrins and their uses: a review, Process Biochemistry, 39, 1033.

[6] Yu, D., Xue, Z., Mu, T., 2022, Deep eutectic solvents as a green toolbox for synthesis, Cell Reports Physical Science. 3, 100809.

[7] Reichardt, C., Welton, T., 2011, Solvents and solvent effects in organic chemistry, Fourth Edition, John Wiley & Sons, pp. 1-7.

[8] Scopus Database. (Available online: https:// www.scopus.com).

[9] Abbott, A.P., Capper, G., Davies, D.L., Munro, H.L., Rasheed, R.K., Tambyrajah, V., 2001, Preparation of novel, moisture-stable, Lewis-acidic ionic liquids containing quaternary ammonium salts with functional side chains, Chemical Communications, 19, 2010.

[10] Perna, F.M., Vitale, P., Capriati, V., 2020, Deep eutectic solvents and their applications as green solvents, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 21, 27.

[11] Tang, B., Row, K.H., 2013, Recent developments in deep eutectic solvents in chemical sciences, Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly, 144, 1427.

[12] Dai, Y., van Spronsen, J., Witkamp, G-J., Verpoorte, R., Choi, Y.H., 2013, Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology, Analytica Chimica Acta, 766, 61.

[13] Tomé, L.I.N., Baião, V., da Silva, W., Brett, C.M.A., 2018, Deep eutectic solvents for the production and application of new materials, Applied Materials Today, 10, 30.

[14] Liu, Y., Friesen, J.B., McAlpine, J.B., Lankin, D.C., Chen, S.-N., Pauli, G.F., 2018, Natural deep eutectic solvents: properties, applications, and perspectives, Journal of Natural Products, 81, 679.

[15] Paiva, A., Craveiro, R., Aroso, I., Martins, M., Reis, R.L., Duarte, A.R.C., 2014, Natural

deep eutectic solvents – Solvents for the 21st century, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2, 1063.
[16] El Achkar, T., Greige-Gerges, H., Fourmentin, S., 2021, Basics and properties of deep eutectic solvents: a review, Environmental chemistry letters, 19, 3397.
[17] Hansen, B.B., Spittle, S., Chen, B., Poe, D., Zhang, Y., Klein, J.M., Horton, A., Adhikari, L., Zelovich, T., Doherty, B.W., 2020, Deep eutectic solvents: A review of fundamentals and applications, Chemical Reviews, 121, 1232.
[18] Smith, E.L., Abbott, A.P., Ryder, K.S., 2014, Deep eutectic solvents (DESs) and their applications, Chemical Reviews, 114, 11060.
[19] Liao, H.G., Jiang, Y.X., Zhou, Z.Y., Chen, S.P., Sun, S.G., 2008, Shape-controlled synthesis of gold nanoparticles in deep eutectic solvents for studies of structure-functionality relationships in electrocatalysis, Angewandte Chemie International Edition, 47, 9100.
[20] Wei, L., Fan, Y.-J., Tian, N., Zhou, Z.-Y., Zhao, X.-Q., Mao, B.-W., Sun, S.-G., 2012, Electrochemically shape-controlled synthesis in deep eutectic solvents: A new route to prepare Pt nanocrystals enclosed by high-index facets with high catalytic activity, The Journal of Physical Chemistry C, 116, 2040.
[21] Mohan, S., Kanagaraj, D., Sindhuja, R., Vijayalakshmi, S., Renganathan, N.G., 2001, Electropolishing of stainless steel-a review, Transactions of the IMF, 79, 140.
[22] Abbott, A.P., Capper, G., McKenzie, K.J., Ryder, K.S., 2006, Voltammetric and impedance studies of the electropolishing of type 316 stainless steel in a choline chloride based ionic liquid, Electrochimica Acta, 51, 4420.
[23] Karim, W.O., Abbott, A.P., Cihangir, S., Ryder, K.S., 2018, Electropolishing of nickel and cobalt in deep eutectic solvents, Transactions of the IMF, 96, 200.
[24] Abbott, A.P., Dsouza, N., Withey, P., Ryder, K.S., 2012, Electrolytic processing of superalloy aerospace castings using choline chloride-based ionic liquids, Transactions of the IMF, 90, 9.
[25] Abbott, A.P., Capper, G., McKenzie, K.J., Glidle, A., Ryder, K.S., 2006, Electropolishing of stainless steels in a choline chloride based ionic liquid: an electrochemical study with surface characterisation using SEM and atomic force microscopy, Physical Chemistry Chemical Physics, 8, 4214.
[26] Smith, E.L., 2013, Deep eutectic solvents (DESs) and the metal finishing industry: where are they now?, Transactions of the IMF, 91, 241.
[27] Popescu, A.-M.J., Constantin, V., Olteanu, M., Demidenko, O., Yanushkevich, K., 2011, Obtaining and structural characterization of the electrodeposited metallic copper from ionic liquids, Revista de Chimie, 62, 626.
[28] Abbott, A.P., El Ttaib, K., Ryder, K.S., Smith, E.L., 2008, Electrodeposition of nickel using eutectic based ionic liquids, Transactions of the IMF, 86, 234.
[29] Dutra, A.J.B., Paiva, P.R.P., Tavares, L.M., 2006, Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust, Minerals Engineering, 19, 478.
[30] Oustadakis, P., Tsakiridis, P.E., Katsiapi, A., Agatzini-Leonardou, S., 2010, Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): Part I: Characterization and leaching by diluted sulphuric acid, Journal of Hazardous Materials, 179, 1.
[31] Youcai, Z., Stanforth, R., 2000, Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium, Journal of Hazardous Materials, 80, 223.
[32] Li, H., Wang, Y., Cang, D., 2010, Zinc leaching from electric arc furnace dust in alkaline medium, Journal of Central South University of Technology, 17, 967.
[33] Abbott, A.P., Collins, J., Dalrymple, I., Harris, R.C., Mistry, R., Qiu, F., Scheirer, J., Wise, W.R., 2009, Processing of electric arc furnace dust using deep eutectic solvents, Australian Journal of Chemistry, 62, 341.

Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, Spring 2024, Vol. 1, Issue 1, Serial No. 1, pages 21-31.

"Review article"

Deep eutectic solvents: Emerging green solvents

Bahram Behnajady*

Materials Engineering Faculty, Advanced Material Research Centre, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
*Corresponding author: b_behnajady@sut.ac.ir
(Received: 6 August 2023, Accepted: 25 September 2023)

Abstract
Sustainable development and the growth of green industries require the adoption of new solvents to replace traditional ones. Conventional solvents are known to be toxic and volatile and pose significant environmental challenges. In recent years, scientists around the world have extensively investigated deep eutectic solvents. This article aims to provide an overview of the history and use of deep eutectic solvents based on published literature in this field. Deep eutectic solvents consist of two or three inexpensive and safe components that are combined to form a eutectic solution with a lower melting temperature than each individual component. Consequently, these solvents typically remain liquid at temperatures below 100°C. Deep eutectic solvents exhibit similar behavior and physicochemical properties to ionic solutions but are more cost-effective and biocompatible. Due to their numerous advantages, extensive studies have been conducted on their preparation, synthesis, as well as their physical and chemical properties. Furthermore, deep eutectic solvents are being investigated for various applications, and their use in fields, such as nanoparticle synthesis, electropolishing, electrodeposition, and metal extraction, is rapidly increasing. Overall, the adoption of deep eutectic solvents offers significant potential for sustainable development and green industry applications due to their favorable properties compared to conventional solvents. Ongoing research continues to expand our understanding of these solvents and explore their diverse applications in various fields.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Solvent, Deep eutectic, Green solvent, Sustainable development