اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵

بسم الله الرحمن الرحیم

مروری بر حلال‌های یوتکتیک عمیق و کاربردهای آن دراستخراج

پویا رضوانی [۱]، علی فروهر [۲*]

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

Email:p.rezvani@ag.iut.ac.ir

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

Email:forouhar@iut.ac.ir

کدمقاله: **EFAB015831217**

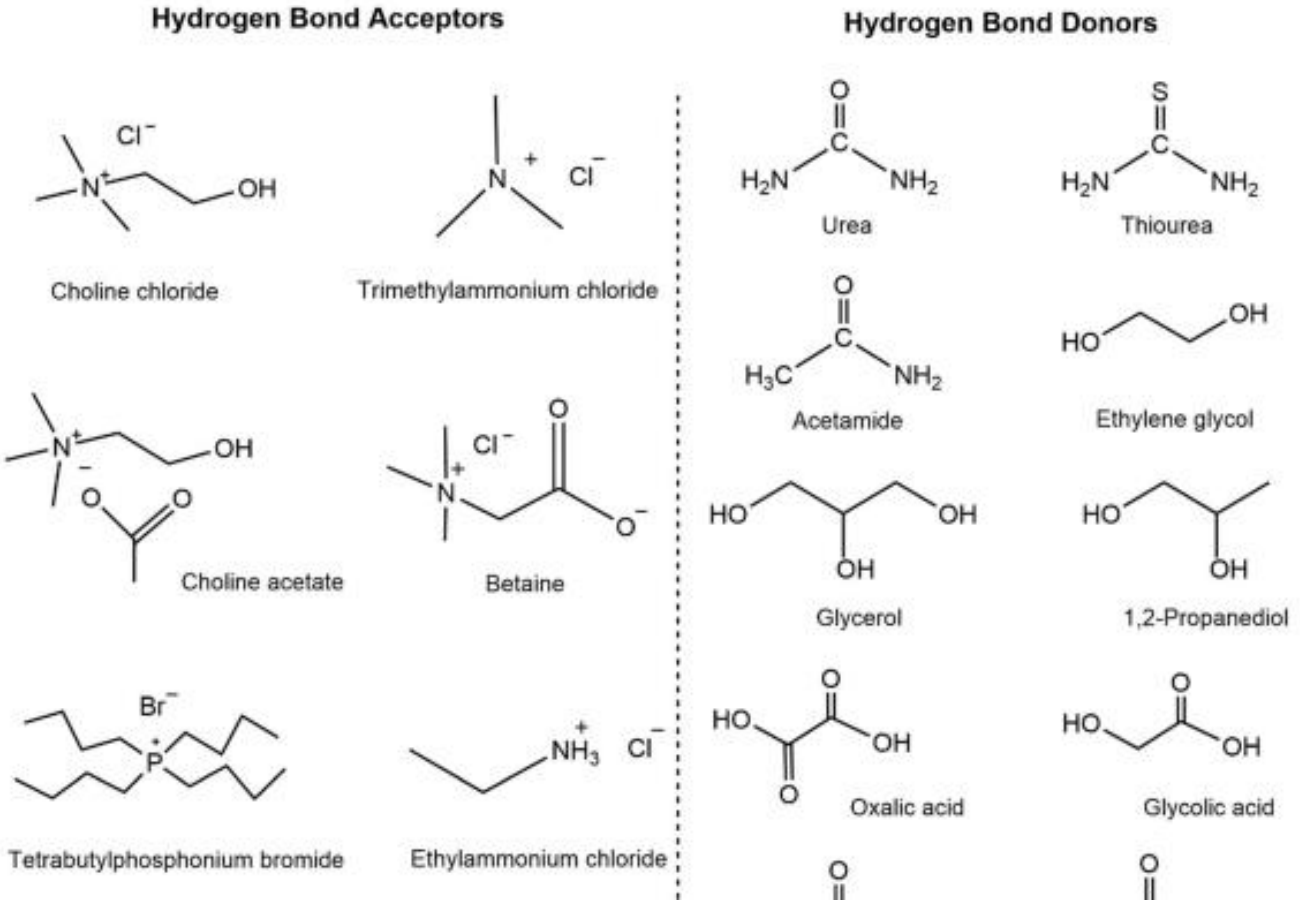
چکیده: امروزه با پیشرفت‌های انجام شده در زمینه شیمی سبز، حلال‌های جدیدی کشف شده‌اند که در عین دارا بودن ویژگی‌های عملکردی مطلوب، دوستدار محیط زیست نیز می‌باشند. حلال‌های یوتکتیک عمیق (Deep Eutectic Solvents, DESs) یکی از مهم‌ترین دسته از این حلال‌ها بوده که در طبقه حلال‌های سبز قرار می‌گیرند.
در این مطالعه مروری، ابتدا طبقه‌بندی حلال‌های یوتکتیک عمیق بر اساس نوع دهنده و پذیرنده پیوند هیدروژنی شامل انواع نوع Iتا IVبررسی شده است. سپس روش‌های ساخت این حلال‌ها و پارامترهای مؤثر بر تشکیل آن‌ها نظیر دما، زمان، نسبت مولی اجزا و میزان رطوبت مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی DESها شامل ویسکوزیته، چگالی و کشش سطحی و نقش آن‌ها در کارایی فرآیندهای مختلف تحلیل شده است. بخش اصلی این مقاله مروری به کاربرد DESها در استخراج ترکیبات زیست فعال و بیوپلیمرها نظیر ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، پلی‌فنل‌ها، سلولز و پکتین اختصاص دارد.

کلید واژه‌ها: DES، استخراج، حلال سبز، پیوند هیدروژنی

مقدمه

- حلال یوتکتیک عمیق برای اولین بار در سال ۲۰۰۱ توسط ابوت و همکارانش گزارش شد
- اولین حلال یوتکتیک عمیق با ترکیب کولین کلراید و اوره با نسبت ۱:۲
- ابداع طیف وسیعی از نمک‌های آمونیوم چهارتایی با اوره در سال ۲۰۰۳
- کلمه "یوتکتیک" از یونانی باستان εὐτηκτος یا eútēktos به معنای راحتی در ذوب است
- نقطه یوتکتیک نشان دهنده ترکیب شیمیایی و دمایی است که در آن مخلوطی از دو جامد در کمترین دمای ذوب، نسبت به هر یک از ترکیبات، کاملاً ذوب می‌شود

مقدمه


Hydrogen Bond Acceptors
Hydrogen Bond Donors
Choline chloride
Trimethylammonium chloride
Urea
Thiourea
Acetamide
Ethylene glycol
Choline acetate
Betaine
Glycerol
1,2-Propanediol
Tetrabutylphosphonium bromide
Ethylammonium chloride
Oxalic acid
Glycolic acid

مقدمه

طبقه بندی حلال‌های یوتکتیک عمیق

مقدمه

طبقه بندی حلال‌های یوتکتیک عمیق

مقدمه

ساخت حلال‌های یوتکتیک عمیق

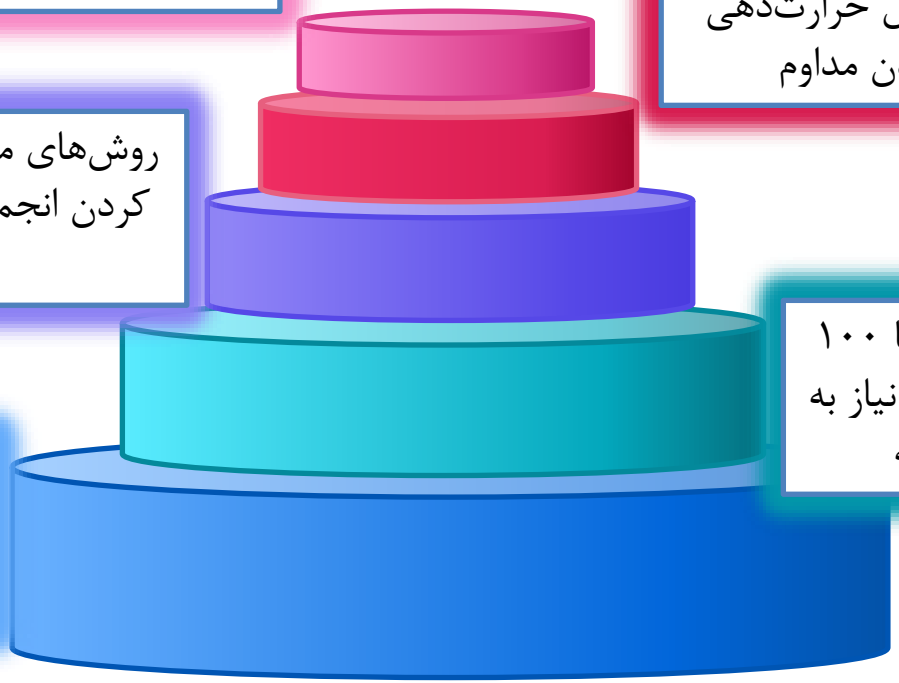
یکی از نشان‌های ساخت حلال، رسیدن به یک مایع هموژن و کاملا شفاف

مرسوم‌ترین روش حرارت‌دهی تحت همزدن مداوم

روش‌های مختلف تهیه مثل خشک کردن انجمادی یاآسیاب کردن در هاون

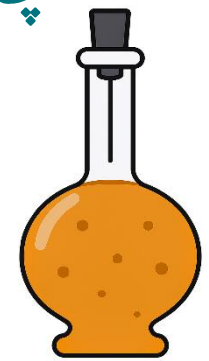
حرارت‌دهی بین ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس بدون نیاز به فیلترکردن ثانویه

ترکیب عامل دهنده و گیرنده هیدروژن با نسبت مولی مشخص



ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

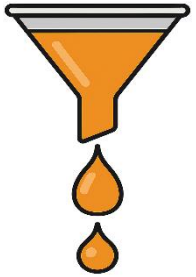
چگالی



- اکثرا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس چگالی بیشتر از آب دارند
- چگالی وابسته به دما
- کاهش چگالی با افزایش دما
- افزایش انرژی حرارتی مولکول‌ها با افزایش دما
- دور شدن مولکول‌ها از هم و اشغال حجم بیشتر
- ضعیف شدن نیروهای بین مولکولی با افزایش دما، کمی تر می‌شوند
- پخش مولکول‌ها و اشغال حجم بیشتر
- کاهش چگالی کلی

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

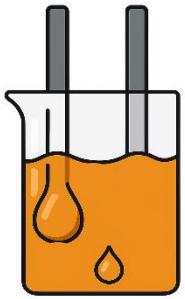
ویسکوزیته



- پارامتری مهم خصوصا در زمان استخراج
- غالبا غیر نیوتونی ولی برخی نیز نیوتونی هستند
- اکثرا در دمای اتاق ویسکوزیته بیشتر از ۱۰۰ میلی پاسکال ثانیه و بسیار چسبناک به دلیل شبکه پیوند هیدروژنی گسترده
- محدوده ویسکوزیته بسیار وسیع برای این حلال‌ها و وابستگی ویسکوزیته این حلال‌ها به نسبت اجزا تشکیل دهنده آن‌ها
- ویسکوزیته بالاترDESهایی متشکل از قندها مثل گلوکز، فروکتوز و غیره
- کاهش ویسکوزیته این حلال‌ها با افزایش دما زیرا با افزایش دما انرژی جنبشی افزایش یافته و برهمکنش مولکولی و ویسکوزیته کاهش می‌یابد

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

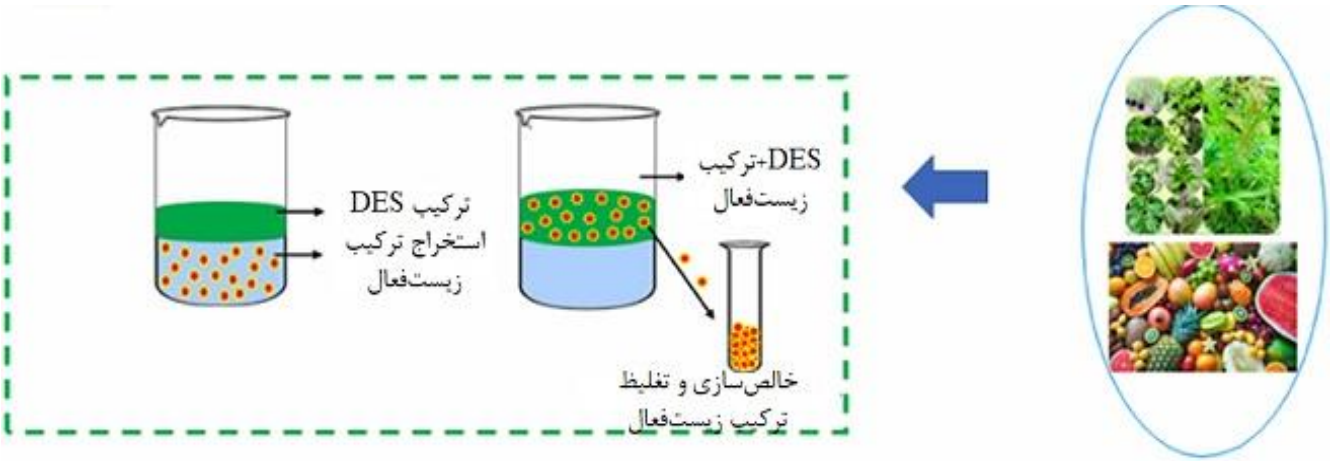
کشش سطحی



- مطالعات محدودتر نسبت به ویژگی‌های قبلی
- مایعات بسیار چسبناک، کشش سطحی بالایی را نشان می‌دهند
- کشش سطحی حلال‌های یوتکتیک عمیق گزارش شده معمولاً بین ۳۵ تا ۷۵ میلی نیوتن بر متر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
- کشش سطحی مناسب بودن حلال یوتکتیک را برای فرآیند انتقال جرم تعیین می‌کند
- عوامل اصلی مؤثر بر کشش سطحی حلال‌های یوتکتیک شامل دما، زنجیره آلکیل، پیوند هیدروژنی بین گروه‌های هیدروژن دهنده و هیدروژن گیرنده و ویسکوزیته است.
- کاهش کشش سطحی با افزایش دما به دلیل افزایش میانگین انرژی جنبشی مولکول‌ها و سهولت حرکت مولکولی

استفاده از DESs در استخراج

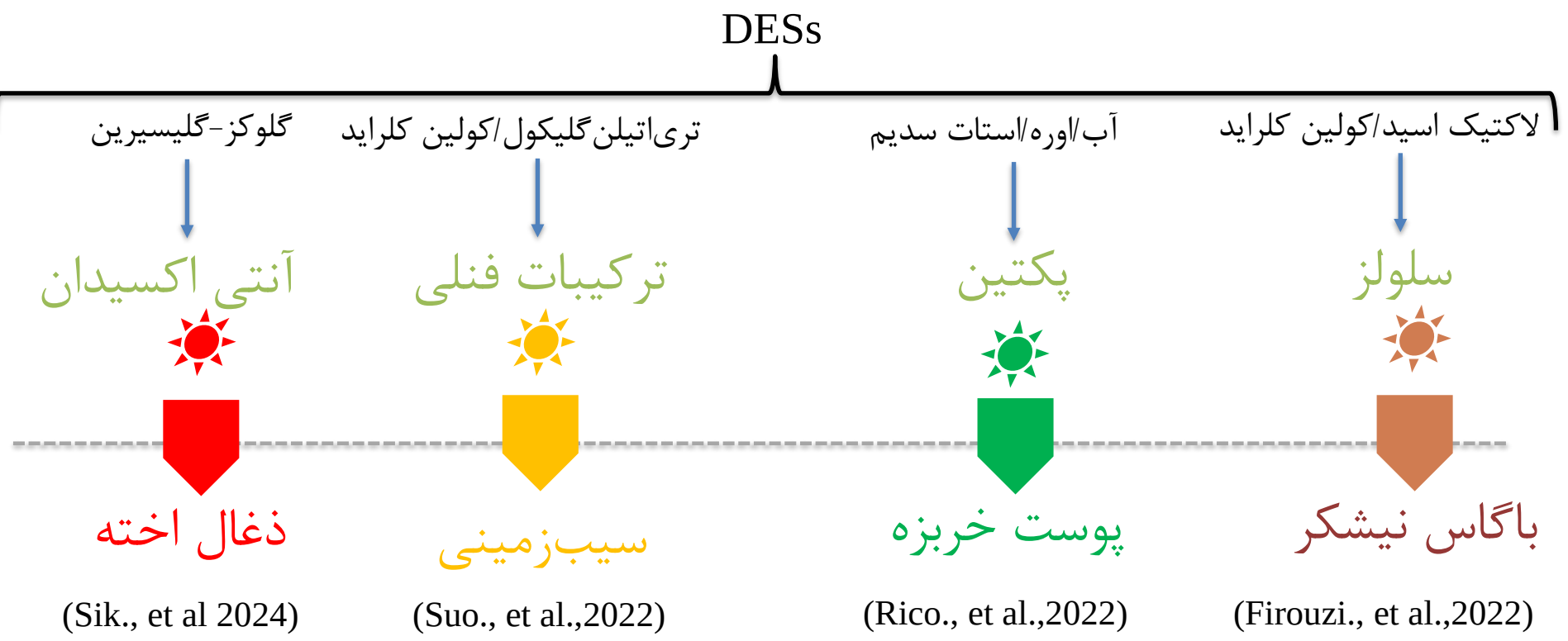
- الزام حفاظت از محیط زیست در زمان استخراج
- تکنیک‌های استخراج نوآورانه با استفاده از حلال‌های سازگار با محیط زیست از جمله DESs
- نقش رو به رشد DESها را در استخراج کارآمد و پایدار ترکیبات زیست فعال و ماکرومولکول‌های متنوع از ماتریس‌های طبیعی
- همسو با اصول اقتصاد چرخشی هدف ارزش‌گذاری ضایعات کشاورزی و صنایع غذایی
- افزایش بازده و کارایی نسبت به حلال‌های سنتی

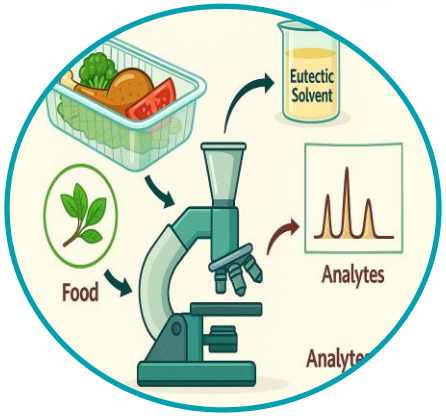


استفاده از DESs در استخراج

- توانایی DESهای مختلف در استخراج مواد مختلف از جمله ترکیبات فنلی، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، لیپیدها، طعم‌دهنده‌ها، سلولز، لیگنین و غیره
- ویژگی‌هایی از جمله ویسکوزیته، رسانایی یونی، نسبت ماده منبع به DES، دما و مدت زمان به عنوان پارامترهای کلیدی مؤثر بر استخراج هستند
- امکان استخراج سازگار با محیط زیست، انتخابی و راحت محصولات واکنش با حلال‌های یوتکتیک عمیق

نمونه‌هایی از استخراج انجام شده با حلال‌های یوتکتیک عمیق





استفاده از DESs در استخراج

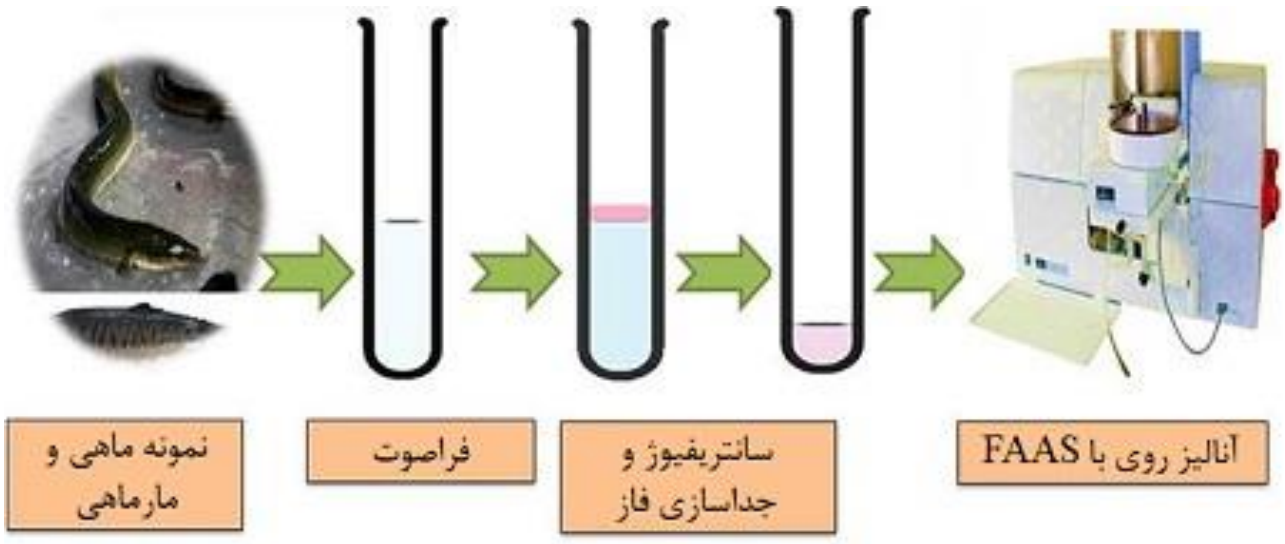
آنالیز مواد غذایی

- استخراج فلزات سنگین و سموم در بافت محصولات غذایی و کشاورزی
- تجزیه و تحلیل آفت‌کش‌ها
- تعیین آنالیت‌های نامطوب
- به طور مثال، DESهای آبدوست مختلف متشکل از کولین کلرید، اسیدهای کربوکسیلیک، اوره و پلی‌ال‌ها برای استخراج مواردی مثل باریم، آهن، کلسیم، روی، منگنز، منیزیم، قلع، سرب و غیره از نمونه‌هایی مثل برگ کاهو
- خواص ویژه آن‌ها می‌تواند گزینش‌پذیری جداسازی را بهبود بخشد و زمان جداسازی را کوتاه کند.
- از نظر تأثیر زیست‌محیطی، مزایای DES بر پایه زیست‌تخریب‌پذیری، قابلیت بازیافت و پایداری است.
- همچنین به دلیل عدم فراریت آنها، DESهای آبدوست و آبگریز می‌توانند در HPLCو طیف‌سنجی UV-Visبرای آنالیز سریع پیاده‌سازی شوند

استفاده از DESs در استخراج

آنالیز مواد غذایی

- استخراج عنصر روی و اندازه‌گیری میزان آن در ماهی
- حلال یوتکتیک عمیق مورد استفاده آن‌ها متشکل از کولین کلراید و فنل با نسبت مولی ۱:۲ بوده و از ۸-هیدروکسی کینولین به عنوان عامل شلاته کننده یون روی استفاده کردند
- راندمان بالا میزان روی را در حد ppb



(Haq., et al. 2021)

بحث و نتیجه گیری

- دوستدار محیط زیست(حلال سبز)
- سمیت کمتر از حلال‌های آلی
- فرآیندهای صنعتی ایمن‌تر و پایدارتر
- طیف گسترده‌ای از کاربردها در صنایع غذایی
- استخراج ترکیبات زیست‌فعال و بیوپلیمرها از منابع گیاهی از جمله پلی‌فنل‌ها، فلاونوئیدها، رنگدانه‌ها، اسیدهای چرب ضروری، بیوپلیمرها و سایر ترکیبات زیست‌فعال
- محیط‌های مناسب برای تعیین مقدار فلزات سنگین، باقیمانده آفت‌کش‌ها و سایر آلاینده‌ها در نمونه‌های غذایی
- جایگزین مناسبی برای حلال‌های آلی مرسوم

گزیده‌ای از منابع

1. Castro-Muñoz, R., et al., *Deep eutectic solvents for the food industry: extraction, processing, analysis, and packaging applications–a review.* CRFSN, 2024. **64**(30): p. 10970-10986.
2. El Achkar, T., H. Greige-Gerges, and S. Fourmentin, *Basics and properties of deep eutectic solvents: a review.* Environ. Chem. Lett., 2021. **19**: p. 3397-3408.
3. Firouzi, M., et al., *Green solvent-based extraction of cellulose from hemp bast fibers: From treatment efficacy to characterizations and optimization.* Int. J. Biol. Macromol., 2025. **288** :p. 138689.
4. Melikoglu, M., *Deep eutectic solvents in food science: Pioneering analytical applications and future prospects.* Microchem. J, 2025. **216**: p. 114799.
5. Rico, X., B. Gullón, and R. Yáñez, *A comparative assessment on the recovery of pectin and phenolic fractions from aqueous and DES extracts obtained from melon peels.* Food. Bioprocess. Technol, 2022. **46**(10): p. 1-39.
6. Sik, B., et al ,.*Using natural deep eutectic solvents for the extraction of antioxidant compounds from cornelian cherry (Cornus mas L.) fruits.* Green Anal. Chem, 2024. **11**: p. 100154.
7. Suo, H.Z., et al., *Deep eutectic solvent-based ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds from different potato genotypes: comparison of free and bound phenolic profiles and antioxidant activity.* Food.Chem, 2022. **388**: p. 133058.

با تشکر از
توجه شما