

## بهینه‌سازی فرایند استخراج با حلال فلزهای روی، مس و نیکل از محلول حلال‌شویی اسیدی به‌همراه بررسی ترمودینامیکی و مرحله‌های فرایند

سمیه کلبادی‌نژاد<sup>۱</sup> و احد قائمی<sup>۲\*</sup>

۱. پسا دکترا دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. استاد تمام دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

دریافت: آبان ۱۴۰۳ بازنگری: آذر ۱۴۰۳ پذیرش: آذر ۱۴۰۳



<https://doi.org/10.30495/JACR1.1403.1191845>

### چکیده

در این پژوهش، بهینه‌سازی فرایند استخراج با حلال برای استخراج فلزهای روی، مس و نیکل از محلول حلال‌شویی اسیدی کیک صافی سرد، انجام شد. سه مرحله برای استخراج انتخابی فلزها از محلول حلال‌شویی اسیدی در نظر گرفته شد. در مرحله اول فرایند استخراج با حلال، ۹۳/۶۷ درصد روی از محلول حلال‌شویی با pH برابر با ۴ به کمک حلال دپا ۲۰ درصد در نفت سفید، استخراج شد. در مرحله دوم فرایند استخراج، ۱۰۰ درصد مس از محلول رافینیت مرحله اول با pH برابر با ۲/۳ و با حلال ۱۰ درصد مکسترال ۵۶۴۰ چ در نفت سفید، استخراج شد. در مرحله سوم فرایند استخراج، ۸۸/۶۱ درصد نیکل از محلول رافینیت مرحله دوم با pH برابر با ۷ با حلال ۲۰ درصد دپا در نفت سفید، استخراج شد. دور همزن ۲۰۰ دور بر دقیقه و دمای محیط برای همه آزمایش‌های فرایند استخراج با حلال، ثابت در نظر گرفته شد. مقدار فلزها در دو محلول رافینیت و استخراج به کمک جذب اتمی تعیین شد. هر سه مرحله فرایند استخراج به صورت گرماگیر و خودبه‌خودی انجام شد.

**واژه‌های کلیدی:** استخراج با حلال، فلزهای سنگین، دپا، مکسترال ۵۶۴۰، مدلسازی ترمودینامیکی، تعیین مرحله‌های فرایند.

## مقدمه

نیکل، مس و روی از عنصرهای راهبردی برای صنایع هستند [۱]. دستیابی به روشی ارزان و ساده برای استخراج فلزها بسیار با اهمیت است [۲]. ابتدا فلز/ فلزهای منتخب با حلال شویی<sup>۱</sup> جدا [۳] و سپس با استخراج انتخابی، خالص‌سازی فلزها انجام می‌شود [۴]. تهنشینی و برجذب نیز برای خالص‌سازی به کار گرفته می‌شوند [۵]. برخلاف روش استخراج، در جداسازی شیمیایی امکان ایجاد فرآورده‌های جانبی نامناسب وجود دارد [۶]. انتخاب حلال در استخراج، بایستی از دید فنی و اقتصادی مورد توجه قرار گیرد [۷]. برای مثال، در صورت استفاده از سیال آبربحرانی، میکرواستخراج فاز جامد/ مایع، فرایندی هزینه‌بر است [۸].

استخراج شامل توزیع نمک‌ها بین دو فاز مایع غیرقابل اختلاط و در تماس با یکدیگر می‌شود [۹]. مهم‌ترین ویژگی‌های حلال انتخاب‌پذیری و ظرفیت بالای حلال، ضریب توزیع، ضریب غلظت یک جزء در هر دو فاز مایع، گرانروی کم و حلالیت کم فازها [۱۰] است. تفاوت زیاد چگالی و فشار بخار بین جزء هدف و رافینیت نیز باید در نظر گرفته شود [۱۱ و ۱۲]. همچنین، حلال باید غیرسمی، غیرخورنده و غیرقابل اشتعال باشد [۱۳]. برای مطالعه اثر عامل‌ها و هم‌افزایی آن‌ها بر استخراج یون‌های فلزی، روش سطح‌پاسخ به کار گرفته شده است [۱۴ و ۱۵]. اثر هم‌افزایی حلال‌های آلی تری‌بوتیل فسفات و دپا [۱۶]، حلال لیکس ۹۸۴ ان [۱۷]، لیگندهای فنوکسی آمینو برای استخراج مس بررسی شده‌اند [۱۸]. در برخی موارد، استخراج از رسوب فلز در محلول جلوگیری می‌کند [۱۹].

با وجود استخراج روی با دپا [۲۰]، صابونی‌شدن حلال دپا با سدیم هیدروکسید به استخراج کمک می‌کند [۲۱]. همچنین، تعداد مراحل استخراج در حالت صابونی، کمتر است [۲۲]. ۹۷ درصد روی طی دو مرحله با دپا استخراج شد [۲۳]. مخلوط دپا

و سیانکس ۲۷۲ اثر هم‌افزایی برای استخراج روی دارد [۲۴]. عملکرد حلال چمپرکس سی‌پی ۱۵۰ با حلال‌های دپا و سیانکس ۲۷۲ برای جداسازی مس مقایسه شد [۲۵]. استخراج مس از محلول سولفات با حلال‌های لیکس ۹۸۴ ان و آکورگا ام ۵۹۱۰ [۲۶] و حلال مکسترال ۵۶۴۰ [۲۷]، در شرایط متفاوت مطالعه شد. اثر عامل‌های زمان، غلظت حلال، نسبت فازهای آلی به آبی و pH تعادل بر بازده بررسی شد [۲۸]. استخراج کادمیم با عامل سنتزی  $C_{11}H_{18}N_2O$  [۲۹]، حلال سیانکس ۳۰۱ [۳۰] بررسی شد. استخراج نیکل با ورساتیک ۱۰ [۳۱]، حلال دپا [۳۲]، حلال لیکس ۸۴۱ [۳۳]، حلال پی‌۵۰۷ [۳۴] و حلال سیانکس ۲۷۲ [۳۵] بررسی شد.

استخراج انتخابی فلزهای روی، مس و نیکل از محلول واقعی (با حضور یون‌های مزاحم) حلال‌شویی اسیدی یک صافی سرد کارخانه مهسان روی دلیجان به کمک حلال‌هایی با صرفه اقتصادی و در دسترس، نوآوری و هدف اصلی این پژوهش است. تاثیر چهار عامل زمان، نسبت فاز آلی به آبی، نوع و غلظت حلال و pH در هر مرحله استخراج بررسی شد. اما سرعت همزن و دمای محیط ثابت در نظر گرفته شد. عدم تغییر pH، به دلیل کاهش مصرف واکنشگرها و کاهش آلودگی مراحل بعدی، یکی از مزایای استخراج است که در دو مرحله اول و دوم، pH محلول تغییری نداشت. استخراج ۱۰۰ درصدی مس در مرحله دوم نیز از سایر نوآوری‌های این پژوهش است.

## بخش تجربی

برای بازیابی فلزهای روی، مس و نیکل از محلول حلال‌شویی، فرایند استخراج با حلال به کار گرفته شد. محلول مورد نیاز در این مرحله، با حلال‌شویی ۱۳/۵ گرم یک صافی به ابعاد ۱۷۷ میکرون در ۱۵۰ میلی‌لیتر آب و محلول سولفوریک اسید با pH برابر با ۲/۵ در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۱/۵ ساعت تهیه شد. غلظت اولیه یون‌فلزهای مورد نظر در محلول قابل تغییر نبود.

<sup>1</sup>. Leaching

حلال دپا یک ترکیب ارگانوفسفره با فرمول شیمیایی  $(C_8H_{17}O)_2PO_2H$  و یک مایع بی‌رنگ از ترکیب فسفریک اسید و ۲-اتیل هگزانول است. بیشتر استفاده دپا برای استخراج فلزهای روی، کبالت و نیکل است. مکسترال ۵۶۴۰ اچپرکاربردترین حلال و جداکننده مس در واحدهای تولیدی بزرگ کاتد مس به‌روش حلال‌شویی است. سیانکس ۲۷۲ حلال جداکننده کبالت از نیکل است. اثر pH تعادل بر مقدار استخراج فلزهای متفاوت با حلال دپا، مکسترال ۵۶۴۰ اچ و سیانکس ۲۷۲ در شکل ۱ نشان داده شده است.

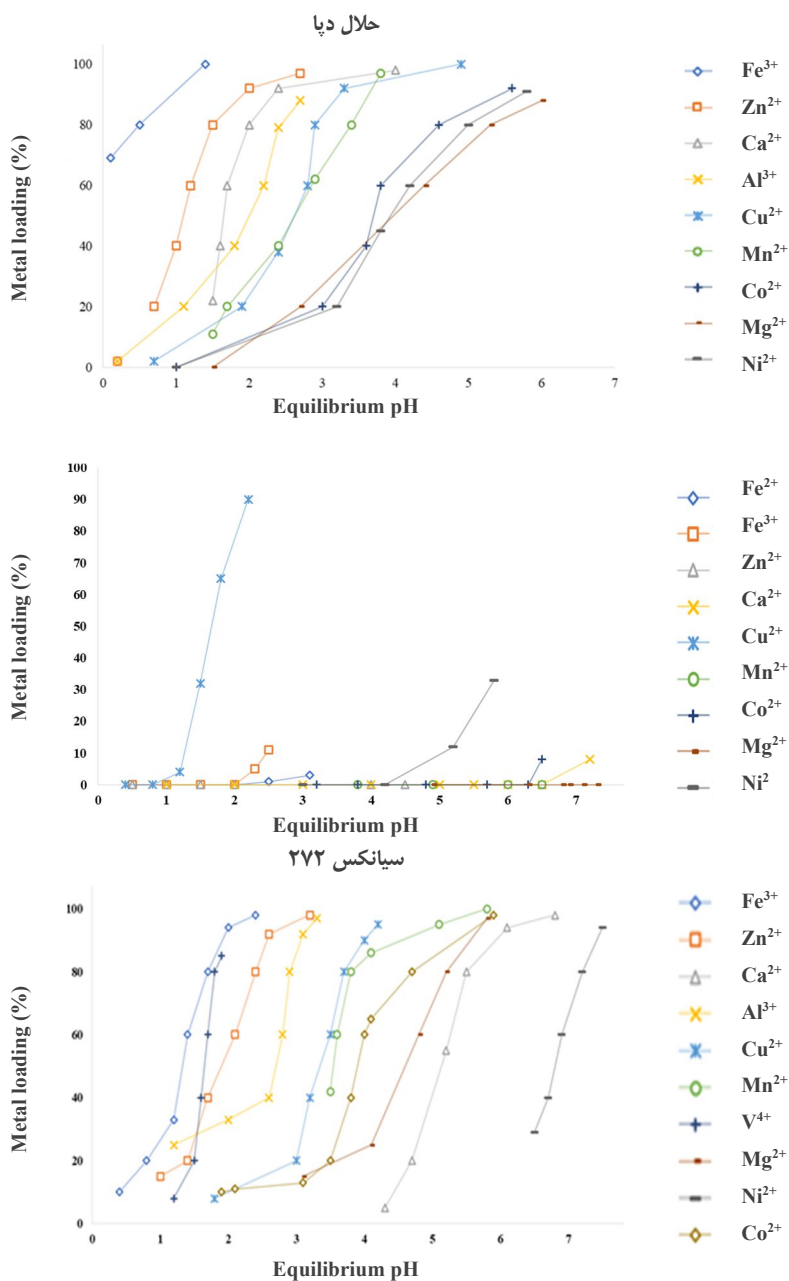
در فرایند استخراج با حلال، انتخاب حلال بخش مرکزی برنامه‌ریزی فرایند است. انتخاب حلال برپایه کشش سطحی و گران‌روی کم، ظرفیت بازیابی، گرمای نهان تبخیر کم، قیمت مناسب و در دسترس بودن انجام شد. بنابراین، از سه حلال دپا، مکسترال ۵۶۴۰ اچ و سیانکس ۲۷۲ از شرکت مکفاشیمی استفاده شد. ویژگی‌های حلال‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

اثر  $pH$  step تعادل بر مقدار استخراج فلزهای متفاوت با حلال‌ها

جدول ۱ ویژگی‌های حلال‌های دپا، مکسترال ۵۶۴۰ و سیانکس ۲۷۲

| ویژگی‌ها                                 | دپا                     | مکسترال ۵۶۴۰ اچ      | سیانکس ۲۷۲              |
|------------------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| ظاهر حلال                                | مایع زرد کم رنگ- بی‌رنگ | مایع کهربایی شفاف    | مایع زرد کم رنگ- بی‌رنگ |
| وزن مخصوص (گرم بر میلی‌لیتر)             | ۰.۹۷۵۶                  | ۰.۹۶۰۰               | ۰.۹۲۰۰                  |
| گران‌روی (سانتی‌پواز، ۲۵ درجه سلسیوس)    | ۳۹-۴۵                   | $\leq 200$           | ۱۴۲                     |
| نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)                | $>160$                  | $\geq 90$            | $>108$                  |
| نقطه جوش (۱۰ میلی‌متر جیوه، درجه سلسیوس) | ۲۰۹                     | $\geq 250$           | $\geq 300$              |
| حلالیت در آب (گرم بر لیتر)               | $< 0.1$                 | $< 5 \times 10^{-5}$ | $< 16 \times 10^{-3}$   |
| خلوص (درصد وزنی)                         | ۹۸                      | ۹۹                   | ۹۷                      |

بهینه‌سازی فرایند استخراج با حلال فلزهای روی، مس و نیکل ...



شکل ۱ اثر pH تعادل بر مقدار استخراج فلزهای متفاوت با حلال‌های دپا،

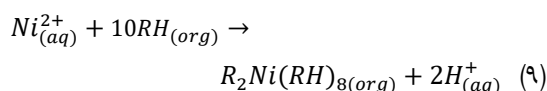
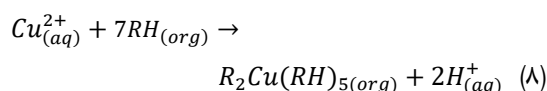
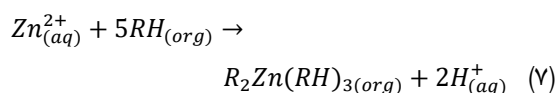
مکسترال ۱۵۶۴۰ و سیانکس ۲۷۲

سولفات با حلال را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

بررسی سینتیکی مراحل استخراج

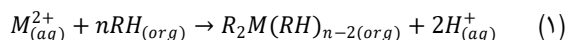
واکنش استخراج یون فلزی دو ظرفیتی، از محلول‌های

در مقابل pH برای مقادیر متفاوت n در هر مرحله استخراج، تجزیه و تحلیل می‌شود. برپایه این معادله، شیب خط باید برابر ۲ باشد. یعنی هر کاتیون فلز کمپلکس شده با n تعداد RH جدا شده با (n-2) مولکول دیگر RH در فاز آلی احاطه و تثبیت می‌شود. بنابراین، برای سه مرحله استخراج، می‌توان نوشت:



بررسی ترمودینامیکی مراحل استخراج

با به کارگیری روابط وانت هوف، وایازش خطی  $\log D_M$  در مقابل  $\frac{1}{1000T}$  رسم و از شیب این نمودار مقدار آنتالپی محاسبه شد. همچنین، انرژی آزاد گیبس و آنتروپی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس محاسبه شدند که در جدول ۲ آورده شده‌اند. اگر علامت انرژی آزاد گیبس منفی باشد، واکنش خودبه‌خودی است. استخراج هر سه مرحله، واکنشی خودبه‌خودی بود. برخی واکنش‌ها با وجود تغییرهای آنتالپی مثبت، خودبه‌خودی انجام می‌شوند. در این نوع واکنش‌ها، آنتروپی نقش مهمی دارد. مقدار آنتروپی مثبت نشان‌دهنده میل انحلال یون فلزها و افزایش حرکت تصادفی یون‌های فلزی در سطح مشترک فاز آلی و آبی است.



که در آن  $M_{(aq)}^{2+}$  یون فلز در محلول به‌دست آمده از حلال شویی،  $RH_{(org)}$  حلال آلی،  $R_2M(RH)_{n-2(org)}$  کمپلکس فلز/حلال و  $H_{(aq)}^+$  اسید در فاز رافینیت است. ثابت تعادل در واکنش بالا به صورت زیر است:

$$K = \frac{[R_2M(RH)_{n-2}]_{org} [H^+]_{org}^2}{[M^{2+}]_{aq} [RH]_{org}^n} \quad (۲)$$

از طرفی ضریب توزیع یون فلزی M، یعنی  $D_M$  برابر است با:

$$D_M = [C_o]/[C_a] \quad (۳)$$

که در آن  $[C_o]$  و  $[C_a]$  به ترتیب غلظت مولی M در فاز آلی و آبی هستند.

برپایه واکنش استخراج یادشده و معادله ۳ می‌توان نوشت (معادله ۴):

$$D_M = \frac{[R_2M(RH)_{n-2}]_{org}}{[M^{2+}]_{aq}} \quad (۴)$$

و معادله ۲ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$K = D_M \frac{[H^+]_{org}^2}{[RH]_{org}^n} \quad (۵)$$

با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله ۵، معادله ۶ به‌دست می‌آید:

$$\log D_M - n \log [RH]_{org} = \log K + 2pH \quad (۶)$$

معادله ۶ با رسم وایازش<sup>۱</sup> خطی  $\log D_M - n \log [RH]_{org}$

<sup>۱</sup>. Regression

جدول ۲ مقادیر عامل‌های ترمودینامیکی استخراج روی با حلال دپا

| مرحله استخراج               | عامل ترمودینامیکی                | مقدار  |
|-----------------------------|----------------------------------|--------|
| مرحله اول<br>(استخراج روی)  | انرژی آزاد گیبس (کیلوژول بر مول) | -۴۰/۲۷ |
|                             | انتالپی (کیلوژول بر مول)         | ۱۱/۶۷  |
|                             | آنتروپی (کیلوژول بر مول. کلون)   | ۰/۱۸   |
| مرحله دوم<br>(استخراج مس)   | انرژی آزاد گیبس (کیلوژول بر مول) | -۱۰/۸۳ |
|                             | انتالپی (کیلوژول بر مول)         | ۴/۳۱   |
|                             | آنتروپی (کیلوژول بر مول. کلون)   | ۰/۰۵   |
| مرحله سوم<br>(استخراج نیکل) | انرژی آزاد گیبس (کیلوژول بر مول) | -۸۹/۲۰ |
|                             | انتالپی (کیلوژول بر مول)         | ۱۴/۴۱  |
|                             | آنتروپی (کیلوژول بر مول. کلون)   | ۰/۳۵   |

فرایند/استریپ

برای بررسی شرایط استریپ حلال در مرحله اول سولفوریک اسید ۱ مولار، در مرحله دوم سولفوریک اسید ۲ مولار و در مرحله سوم سولفوریک اسید ۱ مولار استفاده شد. غلظت یون فلز در فاز آبی با طیف‌سنج جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شد. حلال به‌دست‌آمده از مرحله استریپ به‌عنوان حلال تازه در جداسازی فلز از رافینیت استفاده شد.

## نتیجه‌گیری

## مراجع

- [1] Nusen S, Yottawee N, Cheng CY, Chairuangstri T. Characterisation of zinc plant, cold-purification filter cake and leaching of indium by aqueous sulphuric acid solution. Chiang Mai Journal of Science. 2015;42(3):718-729.
- [2] Mbaya RKK, Ramakokovhu MM, Thubakgale CK. Atmospheric pressure leaching application for the recovery of copper and nickel from low-grade sources. South African Institute of Mining and Metallurgy Base Metals Conference. 2013. p. 255-68.
- [3] Mahmoud MHH. Leaching platinum-group metals in a sulfuric acid / chloride solution. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2003;55(4)37-40. doi: 10.1007/s11837-003-0086-y
- [4] Gislev M, Grohol M. European Commission, Report on Critical Raw Materials and the

در این پژوهش، فرایند استخراج با حلال برای خالص‌سازی و جداسازی فلزهای نیکل، مس، روی و کادمیم از محلول حلال‌شویی اسیدی با حضور یون‌های مزاحم با حلال‌های در دسترس و باصرفه اقتصادی، بررسی شد. سه مرحله فرایند استخراج با حلال با هدف بازیابی انتخابی فلزهای روی از محلول حلال‌شویی، مس از محلول رافینیت مرحله اول و نیکل از محلول رافینیت مرحله دوم انجام شد. عدم تغییر pH و استخراج ۱۰۰ درصدی مس در مرحله دوم، بسیار قابل‌توجه بود. با نتیجه‌های تجربی به‌دست‌آمده و مدل‌سازی صورت پذیرفته، تعداد مرحله‌های مورد نیاز به همراه چگونگی استخراج در هر مرحله، تعیین شد. هر سه مرحله فرایند استخراج، گرماگیر و خودبه‌خودی بودند. برای ادامه این کار پژوهشی و تکمیل داده‌های جمع‌آوری‌شده در فرایندهای ناپیوسته، مطالعه و بررسی اقتصادی فرایند پیوسته استخراج با حلال، مطالعه و طراحی مقیاس نیمه‌صنعتی این فرایند، بررسی استفاده از مایع‌های یونی و ترکیب آن‌ها با حلال‌های موجود، پیشنهاد می‌شود.

## سپاسگزاری

بدین‌وسیله از جناب آقای دکتر تقی‌زاده و همکاران محترم شرکت مهسان روی دل‌بجان که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

- Circular Economy. Milan: European Union; 2018.
- [5] Xing WD, Lee MS. A process for the separation of noble metals from HCL liquor containing gold(III), palladium(II), platinum(IV), rhodium(III), and iridium(IV) by solvent extraction. *Processes*. 2019;7(5):243 **doi: org/10.3390/pr7050243**
- [6] Ghanadzadeh H, Ghanadzadeh A. (Liquid + liquid) equilibria in (water + ethanol + 2-ethyl-1-hexanol) at T = (298.2, 303.2, 308.2, and 313.2) K. *J Chem Thermodyn*. 2003;35(9):1393-401. **doi: org/10.1016/S0021-9614(03)00127-7**
- [7] Rydberg, J, editors. Solvent extraction principles and practice, revised and expanded. Boca Raton: CRC Press; 2004. **doi: org/10.1201/9780203021460**
- [8] Anzum R, Alawamleh HSK, Bokov DO, Jalil AT, Hoi HT, Abdelbasset WK, et al. A review on separation and detection of copper, cadmium, and chromium in food based on cloud point extraction technology. *Food Sci Technol*. 2022;42:e80721. **doi: 10.1590/fst.80721**
- [9] Krishnamurthy N, Gupta CK. Extractive metallurgy of rare earths, 2<sup>nd</sup> Edition. UK: CRC Press; 2016. **doi: org/10.1201/b19055**
- [10] Poole CF. Chapter 2 - Solvent selection for liquid-phase extraction. In: Poole CF, editor. *Handbooks in Separation Science, Liquid-Phase Extraction*. Amsterdam: Elsevier; 2020. p. 45-89. **doi: org/10.1016/B978-0-12-816911-7.00002-5**
- [11] Chavarrio JE, Gutiérrez MF, Orjuela Á. A quantitative multi-criteria solvent selection method for extraction processes: Case study—downstream purification of sucrose-based surfactants. *J Surfactants Deterg*. 2020;23(3):513–26. **doi:10.1002/jsde.12397**
- [12] Arroyo-Avirama AF, Gajardo-Parra NF, Espinoza-Carmona V, Garrido JM, Held C, Canales RI. Solvent selection for the extraction of 2-Phenylethanol from aqueous phases: Density and viscosity studies. *J Chem Eng Data*. 2022;67(8):1893–904. **doi:10.1021/acs.jced.1c00975**
- [13] Hegazy MM, Badawi AA, El-Nabarawi MA, Eldegwy MA, Louis D. One factor at a time and factorial experimental design for formulation of L-carnitine microcapsules to improve its manufacturability. *Heliyon*. 2024;10(1):e23637. **doi: org/10.1016/j.heliyon.2023.e23637**
- [14] Konagano EMH, da Costa HSC, de Souza JNS, Herman CANP. One-factor-at-a-time optimisation of the aqueous extraction of the peroxidase from fresh Amazonian cacao beans. *Int Food Res J*. 2020;27(4):694–701.
- [15] Rajewski J, Dobrzyńska-Inger A. Application of response surface methodology (RSM) for the optimization of chromium(III) synergistic extraction by supported liquid membrane. *Membranes (Basel)*. 2021;11(854):1-17 **doi: org/10.3390/membranes11110854**
- [16] Afzali Z, Irannajad M, Azadmehr A. Copper extraction from aqueous solution by organic solvents of TBP and D2EHPA in buffer solution. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2015;47(1):109–117. **doi: 10.22060/ceej.2015.476**
- [17] Devi NB, Nayak B. Liquid-liquid extraction and separation of copper(II) and nickel(II) using LIX®984N. *J South African Inst Min Metall*. 2014;114(11):937-43.
- [18] Nyamato GS, Wambugu K, Kiratu J, Ojwach SO. Liquid-liquid extraction of copper(II), zinc(II), cadmium(II), and lead(II) from aqueous solution and sewage effluent using phenoxy-amino ligands. *Water Sci Technol*. 2022;85(10):2993-3001. **doi: org/10.2166/wst.2022.164**
- [19] Balesini-Aghdam AA, Yoozbashizadeh H,

- Moghaddam J. Direct hydrometallurgical separation of Zn(II) from brine leaching solution of zinc filter cake by simple solvent extraction process. *Physicochem Probl Miner Process*. 2019;55(3):667-78. doi: **10.5277/ppmp18179**
- [20] Soltani F, Darabi H, Aram R, Ghadiri M. Leaching and solvent extraction purification of zinc from Mehdiabad complex oxide ore. *Sci Rep*. 2021;11(1):1-11. doi: **org/10.1038/s41598-021-81141-7**
- [21] Li Y, Hu J, Fu M, Tang J, Dong L, Liu S. Investigation of intermolecular interactions of mixed extractants of quaternary phosphonium or ammonium chlorides and bis(2,4,4-ethylhexyl)phosphoric acid for metal separation. *RSC Adv*. 2016;6(62):56772-9. doi: **org/10.1039/C6RA07813C**
- [22] Tahmasebizadeh P, Javanshir S. Solvent extraction of zinc from a bioleaching solution by modification of D2EHPA: Optimization and thermodynamic studies. *J Min Environ*. 2021;12(1):253-69. doi: **10.22044/jme.2021.10324.1979**
- [23] Jafari H, Abdollahi H, Gharabaghi M, Balesini AA. Solvent extraction and stripping of zinc from synthetic chloride solution in presence of manganese and cadmium as impurities. *J Min Environ*. 2019;10(4):1083-93. doi: **org/10.22044/jme.2019.8708.1755**
- [24] Asadi T, Azizi A, Lee J chun, Jahani M. Solvent extraction of zinc from sulphate leaching solution of a sulphide-oxide sample using D2EHPA and Cyanex 272. *J Dispers Sci Technol*. 2018;39(9):1328-34. doi: **10.1080/01932691.2017.1402338**
- [25] Feizollahi S, Azizi A. Solvent extraction of copper from an industrial sulfate liquor using Chemorex CP-150. *J Min Environ*. 2018;9(4):905-16. doi: **org/10.22044/jme.2018.7161.1568**
- [26] Ruiz MC, Risso J, Seguel J, Padilla R. Solvent extraction of copper from sulfate-chloride solutions using mixed and modified hydroxyoxime extractants. *Miner Eng*. 2020;146:106109. doi: **org/10.1016/j.mineng.2019.106109**
- [27] Hosseinzadeh M, Petersen J, Azizi A. Solvent extraction studies of copper from a heap leach liquor using mextral 5640H. minerals. 2022;12(10):1-14. doi: **org/10.3390/min12101322**
- [28] Lee LY, Morad N, Ismail N, Rafatullah M. Synergistic Extraction of Cd, Cu and Ni with D2EHPA/TBP: Screening of Factors by Fractional Factorial Design. *Int J Chem Eng Appl*. 2019;10(4):114-20. doi: **10.18178/ijcea.2019.10.4.752**
- [29] Berkalou K, Nounah A, Khamar M, Cherkaoui E, Boussen R. Removal of cadmium from phosphoric acid by the liquid-liquid extraction process using synthetic agent C11H18N2O. *Int J Adv Res Eng Technol*. 2020;11(6):28-35. doi: **org/10.17605/OSF.IO/R2Q3H**
- [30] Qian Z, Qiao J, Jiang D, Lin J, Chen A, Ma Y, et al. Removal of cadmium from cobalt sulfate by solvent extraction using cyanex 301. *Jom*. 2018;70(8):1459-63. doi: **org/10.1007/s11837-018-2946-5**
- [31] Abo Atia T, Deferm C, Machiels L, Khoshkhoo M, Riaño S, Binnemans K. Solvent extraction process for refining cobalt and nickel from a “bulk hydroxide precipitate” obtained by bioleaching of sulfidic mine tailings. *Ind Eng Chem Res*. 2023;62(43):17947-58. doi: **/10.1021/acs.iecr.3c02612**
- [32] Arslan F, Büşra Güven Z, Yenial Arslan Ü, Benli B, Arslan C. Solvent extraction of nickel from iron and cobalt containing sulfate solutions. *Mater Sci Eng Int J*.

- 2023;7(1):1-6. doi: 10.15406/mseij.2023.07.00195
- [33] Yuchang Xiao BASc by. Solvent Extraction of Nickel from Complexation Leachate Solution. 2023;(February). doi: org/10.14288/1.0424306
- [34] Rao M, Zhang T, Li G, Zhou Q, Luo J, Zhang X, et al. Solvent extraction of Ni and Co from the phosphoric acid leaching solution of laterite ore by P204 and P507. Metals (Basel). 2020;10(4):4–5. doi: org/10.3390/met10040545
- [35] Rodrigues IR, Deferm C, Binnemans K, Riaño S. Separation of cobalt and nickel via solvent extraction with Cyanex-272: Batch experiments and comparison of mixer-settlers and an agitated column as contactors for continuous counter-current extraction. Sep Purif Technol. 2022;296(121326):1-10. doi: org/10.1016/j.seppur.2022.121326