

Új megközelítés a vörösiszap hasznosítására

Mádainé Ü. V.¹, Csík-Simon K.², Bokányi L.³

¹ Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet,
valeria.uveges@uni-miskolc.hu

² Procter & Gamble, simon.krisztia1995@gmail.com

³ Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet,
ljudmilla.bokanyi@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A bauxit feldolgozása során melléktermékként keletkező vörösiszap mellett, hogy jelentős mennyiségű vasat és maradék alumíniumot tartalmaz, olyan, úgynevezett kritikus elemeknek is másodnyersanyaga, mint a Ga, La, Sc és a Ti. Ezeknek a kinyerhetőségét többnyire kémiai úton vizsgálják, azonban, a biológiai kioldás, mint új megközelítés is ígéretes célravezető lehet. A kutatásunk célja az almásfüzitői tározóból vett mintából elsősorban a szkandium kénsavas és *Acidithiobacillus ferrooxidans* és *Acidithiobacillus ferridurans* autotrof baktériumos biokioldásának kísérleti vizsgálata. A kénsavas kémiai kioldásnak, még inkább az azt követő oldatkezelésnek a vörösiszapban lévő Si tartalomból felépülő géles szerkezet gátat szab, a legmagasabb elért fémkihozatal Sc vonatkozásában 66% körüli. A baktériumok adaptálása az eredendően lúgos másodnyersanyaghoz elengedhetetlen, azonban az eddigi eredmények szerint így is, 10%- al alacsonyabb Sc kihozatal jellemezte a baktériumos kioldást, a kémiaihoz képest. A bemutatott kutatási eredmények újabb kihívást jelentenek, mind technológia, mind az alapjelenségek megértése tekintetében.

1 Bevezetés

A vörösiszap az alumínium érce, az abból előállítható Al_2O_3 timföld gyártása során keletkező melléktermék. A timföld előállítás a bauxitból több módon lehetséges, azonban minden esetben lúgos körülmények között történik. A legismertebb eljárás a Bayer eljárás, amely a hazai karszt bauxit feldolgozásnál alap eljárás volt. Első lépése a nyersanyag mechanikai előkészítése, mely során előtörést követően a bauxitot az ásványos összetételétől függően, megfelelő szemnagyságúra őrlik. Ezt követően vagy ezzel egyidőben a nátronlúgot hozzákeverik, az így kapott iszap kerül feladásra az autoklávokba, ahol az 1.6 atm nyomáson kémiai feltárással kerül. Az alkalmazott hőmérséklet a bauxit összetételétől függ, a gibbszites bauxitok kisebb hőmérsékletet (~140 °C), a böhmtes és diaszporos bauxitok 250 °C körüli hőmérsékletet igényelnek. A technológiai folyamat a továbbiakban úgy alakul, hogy a feltárást követően leválasztják az iszapot, ekkorra az oldatba került a bauxit alumíniumtartalmának nagy része, ez az aluminátlúg ($Na[Al(OH)_4(H_2O)_2]$). Az aluminátlúgból Al-hidroxid oltókristály hozzáadásával, pontos hővezetés mellett kikeverik az alumínium-hidroxid pelyheket, majd a kristályokat vákuumszűréssel leválasztják a vizes fázistól. Ezt követő lépés a kalcinálás, amikor a kötött és tapadóvizet eltávolítják termikusan. A forgó csökemencéből kihordott timföldet silókban tárolják. Ennek az alumínium-oxidnak a további feldolgozása a Hall-Heroult eljárással történik, amely során olvadákelektrolízissel állítják elő a tiszta fémet.

A vörösiszap tulajdonságai függenek a bauxit típusától, illetve annak feldolgozási módjától is. Magyarországon a karbonátos környezetben böhmtes bauxit alakult ki, melyet az 1920-as évektől bányásztak, mára azonban bauxit bányászat megszűnt. A vörösiszap azonban itt maradt a tározókban, a világ éves vörösiszap termelése pedig eléri a 150 millió tonnát.

A szakirodalomban publikált összetétel adatok alapján a vörösiszap átlagos főbb összetevőit mutatja be az 1. táblázat [1], [2]. A nevezett főbb elemek oxidos formában vannak jelen.

1. Táblázat: Vörösiszapra jellemző fémkoncentrációk

Főbb alkotók	Koncentráció (m%)	Előforduló elemek	Koncentráció (mg/kg)
Fe	4,52-50,6	U	50-60
Al	4,42-16,06	Ga	60-90
Si	2,16-14,86	V	730
Na	0,98-7,79	Zr	1230
Ca	0,39-16,72	Sc	54-120
Ti	0,98-5,34	Cr	497

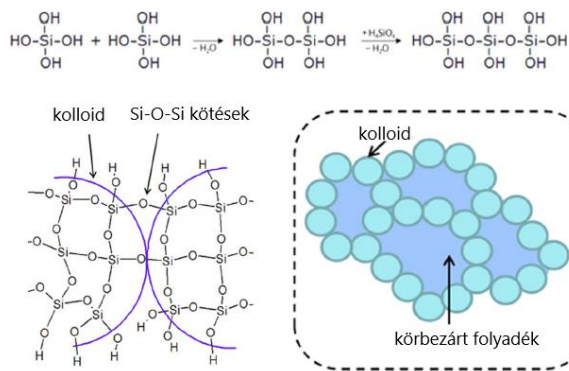
2 Ritkaföldfémek kinyerésére irányuló kutatások

Számos kutatás vizsgálta/vizsgálja az ásványi savak alkalmasságát a vörösiszap ritkaföldfém (RFF), illetve Sc tartalmának kinyerésére. A 2. táblázatban szereplő paraméterek mellett 70-96%-os hatékonysággal sikerült kioldani a szkandiumot, de nemcsak az oldási körülmények, hanem a vörösiszap összetétele is befolyásoló tényező [3].

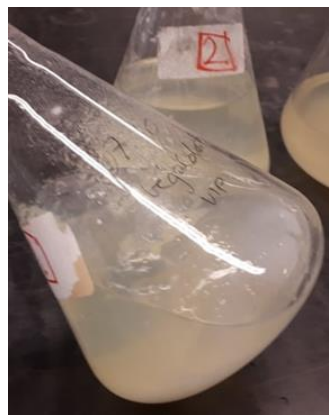
2. Táblázat: Tipikus kísérleti körülmények Sc kioldására

Oldószer	Oldószer konc. (M)	Oldószer/szil. Arány	Tartózkodási idő	Hőmérséklet
Kénsav	0,5-7	1:20 -1:100	1h-24h	23-35C°
Sósav	0,5-6	1:4 - 1:50	1h-24h	23-70C°
Salétromsav	0,5 - 1,5	1:10 - 1:50	1h-24h	23-40C°

Megjegyzendő továbbá, hogy önmagában savas közegben nem valósítható meg a szkandium szelektív kioldása, mivel az alumínium, vas, titán szintén oldatba kerül, ezek szeparálását az oldatkezelés során meg kell oldani. A nagyobb probléma azonban az, hogy a szilícium is nagy mennyiségben oldatba kerül. Kénsavas kioldás során, bár magas szkandium kihozatalokat értek el, szilika-gél képződésével kell számolni, amely nagyon megnehezíti az oldatkezelés lépéseit, ezért a gélesedés visszaszorítása az aktuális kutatások egyik fókuszpontja. A gélképződés folyamatát és a gélről készült fotót mutatja be az 1.a, és 1b. ábra. Alkan, G. et al, 2018-as tanulmánya szerint erre egyik lehetséges megoldás a hidrogén-peroxid és kénsav alkalmazása [4]. Hidrogén peroxid jelenlétében ugyanis a vas és szilícium oxidos formában precipitálódik. A kvarc megjelenése a szilárd maradékban biztosítja, hogy ne legyen számottevő gélképződés az oldatban, emellett, mivel a vas hematitos formában kicsapódik, így kisebb mennyiségben kerül oldatba. További előny, hogy kisebb a romboklás keletkezésének esélye, mint csak kénsavas oldásnál, így azzal együtt kisebb mennyiségben ko-precipitálódik a szkandium, tehát az oldatban magasabb kihozatal érhető el.



1.a) ábra: Gélképződés [4]



1.b) ábra: Gélesedett kénsavas oldat (saját fotó)

A fent említett problémák kiküszöbölésére jellemző kutatási irány, hogy valamilyen előkezelést alkalmaznak a kioldást megelőzően, például mikrohullámút [5]. A mikrohullám hatására nanopórusok képződnek, és a kioldás hatékonysága nő, így a Ce, La, Nd, Sc esetén rendre 81,8%, 92,6%, 76,2% és 59,7% -os a legjobb elérhető szolubilizálási hatékonyság. További előkezelési lehetőség a szulfatizáló pörkölés, a lényege pedig, hogy az előkezelés hatására, a RFF-ek vízzel oldhatóvá válnak. A szárított vörösiszapot 1:1 arányban kénsavval keverik, majd 12 órás 120°C-os szárítást követően 700°C-on, 3 órás pörkölést követően, a mintát 5:1 arányban vízzel szolubilizálják 25°C-on, 24-48 órán át. Az eljárással Sc 60%-ban, míg a többi RFF >80%-ban oldódott, viszont a Fe-nak és Ti-nak csupán 1%-a, a szilícium pedig egyáltalán nem oldódott, ami előnyös [6]. Szintén termikus előkezelési lehetőség, amikor a vörösiszapot nagy tisztaságú grafit porral és wollasztonittal keverik, majd pelletálást követően 1500-1600°C-on hőkezelik [7]. Ebben a kísérletben a legjobb eredményt szkandiumra a kénsavval érték el, 90°C-on végzett kioldással. A száraz feltárást vizsgálta Alkan, G. és szerzőtársai, amelynek lényege, hogy a vörösiszapot koncentrált kénsavval erőteljesen bekeverve, a kevés víz hozzáadása miatt kialakuló extrém ion-erősség gátolja a gélképződést. További 75°C-on történő 1 órás hőntartást követően ioncserélt vízzel fél óra keverést követően a Sc oldatbavitele a Ti-ra és Si-ra nézve szelektíven sikeres volt [8].

3 Anyagok és módszerek

A kísérletek alapját az almásfüzitői VII. tározóból vett markolt minta képezte. A nedves minta szárítása 105 °C-on tömegállandóságig történt, majd 315 mikronos szemcseméret alá porítottuk. A szemcseméret elemzés HORIBA LA950-V2 típusú lézeres szemcseméret-elemző berendezéssel történt, az elektronmikroszkópos felvételek a Phenom ProX SEM készülékkel készültek. A BET fajlagos felület meghatározása Micromeritics Gemini 2390t készülékkel történt a minták mérés előtt vákuumozva és hőkezelve voltak 105°C-on, az adszorpció nitrogén gázzal történt. A ME Ásványtani és Földtani Intézet által XRF, XRD, és külsős laborban ICP-AES elemzések készültek.

A kémiai kioldási elő-kísérletek körülményei a következők: 5-10-15 g/l szilárd/oldószer arány; 10, 30 és 60 perc tartózkodási idő; 2 M-os kénsav oldat. Az oldás rázógépen, 350 rpm-es rázatás mellett, a fázisszétválasztás 3000 rpm-en centrifugával történt. A kioldási vizsgálatok ambiens hőmérsékleten történtek, tekintettel egy korábbi megállapításunkra, miszerint a hőmérséklet növelésének enyhén negatív hatása van [9].

A második kísérlet sorozatban 15-25-50 g/l szilárd-folyadék arányt alkalmaztunk, 2M-os kénsavval, 60 perc tartózkodási idő mellett, ambiens hőmérsékleten, 450 rpm rázatás mellett. A fázisszétválasztás centrifugálással, majd vákuumszűréssel történt, ezután a folyadék minta mintatartóban tárolva állt elemzésig.

Az oldási kísérleteket követően az oldatok fémtartalmának meghatározása első esetben ICP-AES, illetve a második kísérletsorozatnál MP-AES analitikai vizsgálattal történt. Gélképződés minden esetben előfordult, így a mintában mért fémkoncentrációt befolyásolta a minta leválasztása és az analízis között eltelt idő.

A bioszolubilizálás során kétféle *Acidithiobacillus* baktériumot alkalmazunk. Az egyik az *Acidithiobacillus ferrooxidans*, amely a Fe^{2+} -t oxidálja Fe^{3+} -má, emellett a kénvegyületekből (S^0 , $S_2O_3^{2-}$, H_2S vagy poliszulfidok) kénsavat termel. Az optimális pH tartománya 1,5-2,0. Hasonló jellemzői vannak az *Acidithiobacillus ferridurans*-nak, azonban a Fe^{2+} mellett a S^0 -t, $S_4O_6^{2-}$ -t, illetve hidrogént is képes felhasználni elektronodonorként [10]. Mindkét baktériumot Szlovákiában, bányavízből izolálták.

A bioszolubilizálási kísérletek 250ml térfogatú Erlenmeyer lombikokban, Wise Cube típusú rázógépből, állandó keverés és szabályozott 28°C hőmérséklet mellett, 1g/100ml szilárd/oldószer aránnyal történtek. Oldószerként előzetesen a vörösiszaphoz adaptált, tehát 9K tápoldatban, az átoltások idején fokozatosan növelt vörösiszap hozzáadása mellett hónapokon keresztül kultivált mikroorganizmusokat tartalmazó vas(II)szulfátos tápoldatot szolgált, mely a bioszolubilizálást megelőzően 7 naponta 3x átoltásra került. Így a felszaporított, bekeverésekor feltehetőleg exponenciális növekedési fázis végén lévő, baktériumos oldat kezdeti, az adaptálásból származó fémtartalma elhanyagolható (1000x hígítás miatt). Emellett nem adaptált baktériummal és steril tápoldattal – összehasonlítás érdekében – is végeztünk oldási kísérletet.

4 Eredmények

4.1 Anyagvizsgálat eredményei

A kiindulási vörösiszap minta eredeti nedvességtartalma 39,1%, kémhatása pH=11, sűrűsége 3,14 kg/dm³-re adódott. A szárított és visszaporított mintán végzett lézeres szemcseméret elemzés során kapott eredmények szerint a kiindulási anyag igen finom szemcseméretű, ugyanis a 90%-os szemcseméret 6,2 µm-ra adódott, míg a medián szemcseméret 2,37 µm volt.

A SEM készülékkel adott pontban felvett spektrum szerint számított koncentráció értékek tájékoztató eredményeket adnak, tanúságuk szerint a minta megfelel az irodalomban elérhető vörösiszap összetételnek. Eszerint a kiindulási anyag nagy mennyiségben tartalmaz vasat, alumíniumot, nátriumot és szilíciumot, kisebb mennyiségben pedig kalciumot és titánt is. A RFF elemek pedig nyomokban megtalálhatóak benne. Az oxigén atom koncentrációjának nagysága az elemek oxidos formában való megjelenésével magyarázható. A BET fajlagos felület mérés eredményeképpen a vörösiszap minta fajlagos felülete: 16,76 m²/g -ra tehető.

A vörösiszap kémiai összetétele a fontosabb elemek vonatkozásában az alábbi, 3. táblázatból látható [9], míg a röntgen vizsgálat szerint a fő fázisok a hematit (38%), kankrinit (34,9%), katoit (11,3) és a kalcit (3,5%).

3. Táblázat: vizsgált vörösiszap minta kiemelt fémtartalmai [9].

Fontosabb fémek tömegszázalékos koncentrációja ICP elemzés alapján (m/m%)							
Al	Fe	Na	Si	Ti	Ce	La	Sc
8,41	38,9	5,94	3,87	2,01	0,041	0,037	0,009

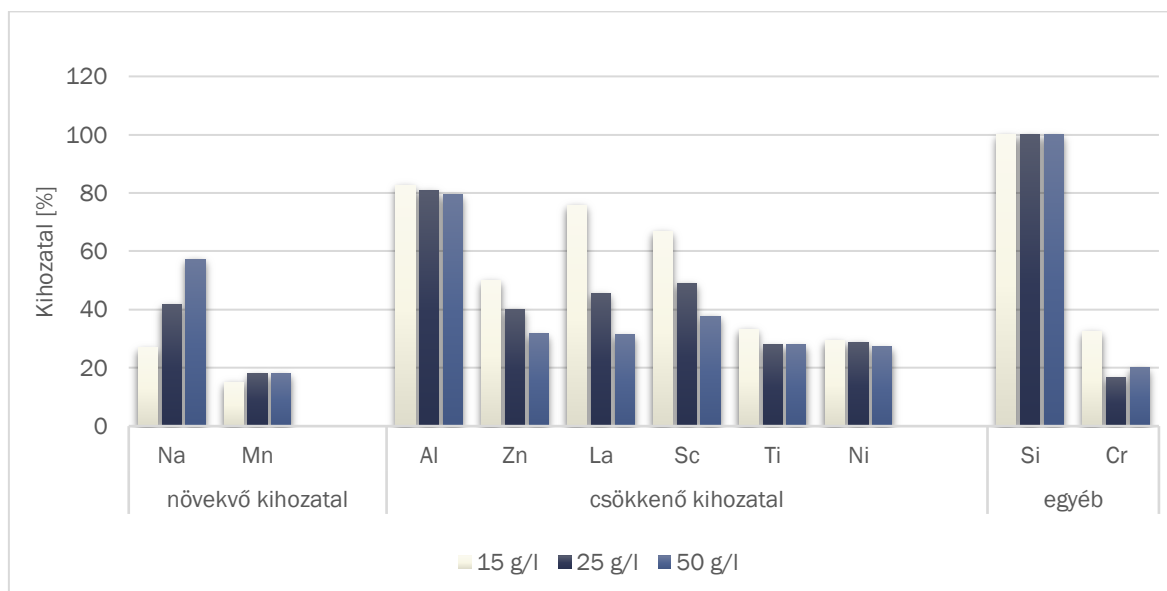
4.2 Kémiai kioldási kísérletek eredménye- első sorozat

2M -os kénsav alkalmazásával, ambiens hőmérsékleten, 5g/l-es vörösiszap tömegkoncentráció mellett a ritkaföldfémek kihozatala: Sc: 38,88 %, La: 22,58 %, Ce: 33,98 %-ot érte el. Ilyen körülmények között a Sr, Zr, Ni, Ti kioldódás elérte a 81,37 %, 44,73 %, 30,83%, 27,03%-ot, az alumíniumé pedig elérte a 82,26% -ot. A vörösiszap tömegkoncentrációjának növelésével kismértékben ugyan, de csökkent a kioldódás mértéke a

legtöbb esetben (Si, Sr, Zn, Sc, Ce, Ti, La), viszont a tartózkodási idő növelésével a fémek kihozatala is nő a Ce, Ti, La, Mn és Fe esetében mindhárom vizsgált tömegkoncentrációnál.

4.3 Második kémiai kioldási kísérlet sorozat eredménye

Az előzetes kísérletek alapján növelt szilárdanyag koncentráció mellett 60 perc tartózkodási idővel a ritkaföldfémeket és a közönséges fémeket tekintve is egyértelműen meghatározható a legalkalmasabb kísérleti körülmény. A legmagasabb elért kihozatal a ritkaföldfémek vonatkozásában Sc: 66,67 %, La: 75,68%, ahogy ez a 2. ábrán látható. Az ábrán közölt kísérleti eredmények 60 perces tartózkodási idővel, 2M-os kénsavval végzett kioldás kihozatali értékek, amennyiben a minta a fázisszétválasztást követően 4 nap után kerül analitikai vizsgálatra. Az elemek aszerint csoportosítva láthatók, hogy azok oldatbeli kihozatalára a szilárd/oldószer arány emelése milyen hatással volt. Megjegyzendő, hogy abban az esetben, amikor az oldást követően 24 órán belül történt az oldat elemanalitikai vizsgálata, csupán 40% körüli Sc értékek adódtak. Ez is mutatja, hogy rendkívül bonyolulttá teszi a gélképződés egyrészt a kísérleti eredmények kiértékelését, másrészt a következő oldatkezelési lépéseket is. A Si minden esetben teljesen oldatba került, így a gélesedés tekintetében csupán a szilárd/oldószer arány szabályozásával nem sikerült eredményt elérni.



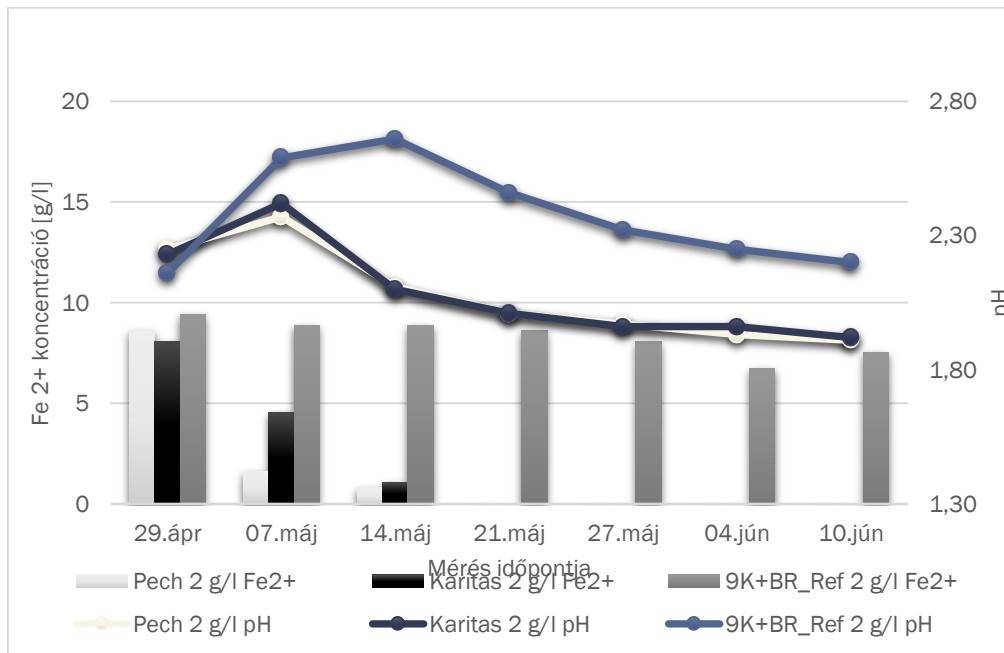
2. ábra.: 2M kénsavval, 60 perc tartózkodási idő mellett végzett kioldási kísérletek eredménye, 4 nap után elvégzett kémiai analízis esetén

4.4 Baktériumok adaptálása a vörösiszaphoz

A különböző, magas fémtartalmú ipari hulladékok biológussal történő kezelésének sok esetben az szab gátat, hogy egyes jelenlévő fémek általában véve inhibitorok az *A. ferrooxidans* baktériumok metabolizmusára, ezáltal negatívan befolyásolják a fémek kinyerését [11]. Éppen ezért kulcskérdés az, hogy sikerül-e minimalizálni ezt a baktériumi populáció növekedését gátló hatást. Erre alkalmas módszer lehet a baktériumok adaptálása a szóban forgó másodnyersanyaghoz, amely folyamat nyomon követését pH változás követéssel és Fe^{2+} titrálassal végezzük, mely információt szolgáltat a mikroorganizmusok tevékenységéről.

Az adaptálás 0,5g/l-es kezdeti koncentrációval indult, majd a monitorozott paraméterek tükrében a következő áttöltéskor a vörösiszap koncentrációt emeltük. A 3. ábrán a 2g/l-es vörösiszap koncentrációjú tápoldat esetében megfigyelhető, hogy az anyag lúgossága okán bekövetkező kezdeti pH növekedést követően a baktériumok jelenlétében a 7-14. nap között megindul a rendszer pH-jának csökkenése. Más típusú, pl. elektronikai hulladék esetén a pH csökkenés kezdete időben korábbra, a 3-4. napra tehető, korábbi

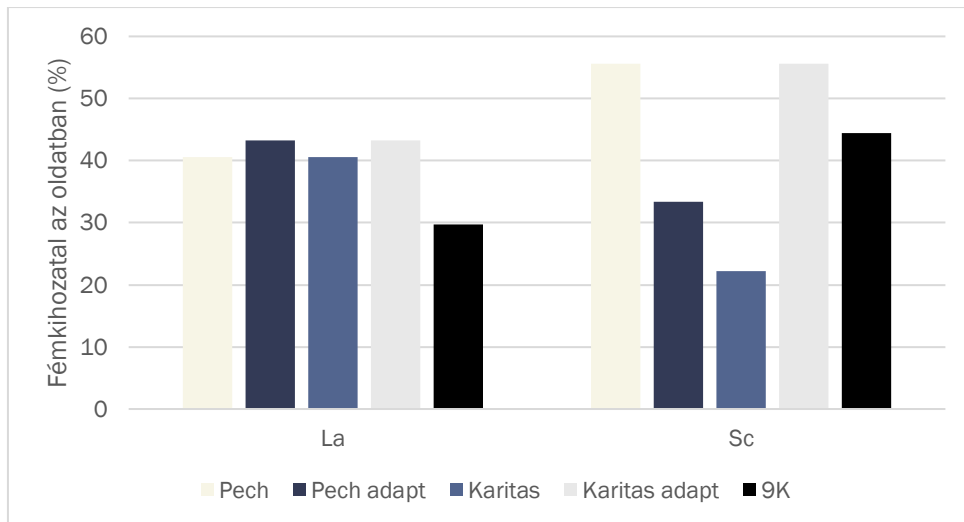
kutatásaink szerint [12]. A baktériumok tevékenységét azonban egyértelműen mutatja az oldat Fe^{2+} koncentrációjának csökkenése is. Látható, hogy a két baktérium törzs között eltérés tapasztalható. Az *A. ferrooxidans* gyorsabban fogyasztja a Fe^{2+} -t, az *A. Ferridurans*-nál. Látható, hogy amennyiben a steril 9K tápoldattal érintkezett a vörösiszap, a pH abban az esetben is csökkenni kezd 25-30 °C-os hőmérsékleten a levegővel történő érintkezés miatt, ám ez a csökkenés később indul meg, és a vizsgált 6 hetes idő intervallumban is a kezdeti 9K pH értékénél magasabb marad. A baktériumok tevékenységének hiányát igazolja az is, hogy a steril oldatban nem látható a Fe^{2+} koncentrációban számottevő változás, míg a baktériumos oldatokból a Fe^{2+} már a 4. hétre elfogy.



3. ábra: Fe^{2+} (oszlopdigrammon) és Ph (görbéken) változása az adaptálás során

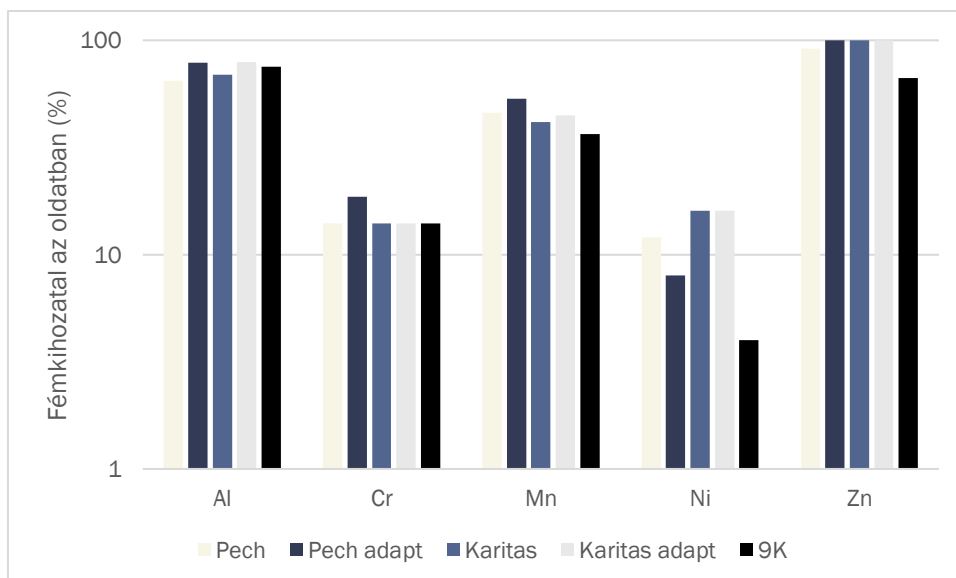
4.5 Baktériumos kioldási kísérletek eredménye

A bioszolubilizálási kísérletek során elért eredmények hasonlóak a kénsavas kioldási kísérlet eredményeihez. A 4. ábrán látható, hogy a szkandium kioldás legmagasabb értéke 55,5%-ot ért el, érdekes azonban, hogy ezt adaptálás nélküli Pech (*A. ferrooxidans*) és adaptált Karitas (*A. ferridurans*) baktériummal érték el. Tehát a két baktérium eltérő módon képes tolerálni az alkalmazott körülményeket. Míg lantán esetén egyértelműen látszik a kísérleti eredményekből, hogy a steril tápoldat, mint oldószer gyengébbnek bizonyult a biooldószernél, ez a szkandium esetében már nem jelenthető ki. Korábban, más hulladékok esetén is tapasztaltuk, hogy a mikroorganizmust tartalmazó oldószer gyengébben teljesít a sterilnél, egyelőre ezt analitikai problémának tudjuk beazonosítani, az oldatok ugyanis nagyon szegények a kérdéses fémek vonatkozásában (Sc: 0,2-0,5mg/l).



4. ábra: La és Sc kihozatal értékei az oldatban

Amennyiben az egyéb fémek vonatkozásában nézzük a fémkihozatali értékek alakulását az 5. ábrán, úgy tűnik, hogy az adaptálásnak az alumínium és a mangán kioldásában volt jelentősége, mert például alumíniumra adaptálás nélkül 55mg/l körüli, míg adaptált esetben 660 mg/l körüli értéket kaptunk. Ez 64 – 79%-os kihozatalt jelent. Meg kell jegyezni azonban, hogy a steril tápoldattal is hasonló eredményt értünk el. Cink vonatkozásában esetenként 100% feletti kihozatal értékeket számoltunk az oldatkonzentrációk és a kiindulási szilárd mintából mért fémtartalom alapján. Ez esetben vagy mintavételi vagy analitikai probléma állhat a háttérben. Mindenesetre az oldatkonzentrációk összevetése alapján cink vonatkozásában látszik leginkább a steril tápoldat és a baktériumos kioldás hatékonyságában a legnagyobb különbség, miszerint steril 9K tápoldattal 66mg/l-es, míg Karitas baktériummal 266mg/l-es oldatkonzentrációk adódtak.



5. ábra: Egyéb fémek kihozatal értékei az oldatban

5 Összefoglalás

A kísérleti eredményeink alapján megállapítható, hogy 2M-os kénsavas kioldásnál a szilícium szolubilizálására és ezáltal a szilikagél képződésére vonatkozóan nincs számottevő hatása sem a szilárd/oldószer aránynak, sem a tartózkodási időnek a vizsgált intervallumban. Kémiai kioldás során az elért legmagasabb szkandium kihozatal 66,67% volt. Ezzel összemérhető, de alacsonyabb kihozatalú értékű A. ferridurans (Karitas) és A. ferrooxidans (Pech) baktériumokkal, 55,56%-ot. Az előzetes adaptálás hatása a lantán esetén eredményesnek bizonyult, de leginkább a közönséges fémeknél, kifejezetten az alumínium és mangán esetén volt számottevő.

A baktériumos kioldással tehát hasonló, de szerényebb eredmények érhetőek el, a gélesedés azonban minden esetben fellép. Az mindenesetre előremutató, hogy a kénsavnál kevésbé erélyes oldószerrel is kioldható a vörösiszap értékes fémtartalma. A bemutatott kutatási eredmények újabb kihívást jelentenek, mind technológia, mind az alapjelenségek megértése tekintetében.

6 Köszönetnyilvánítás

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetem „Társadalmi hasznosság növelő fejlesztések a hazai felszín alatti természeti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása területén” című, az Innovációs és Technológia Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatási okirat (Támogatási Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján zajló projektje részeként valósult meg.

7 Irodalomjegyzék

- [1] Power, G, Grafe, M., Klauber, C: Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practises, Hydrometallurgy 108 (2011) 33-45
- [2] Zhang, Y, Qi, Y, Li, Y.: Aluminium mineral processing and metallurgy: Iron-rich bauxite and Bayer Red Muds, chapter: Aluminium alloys and composites (2017)
- [3] Akcil, A., Akhmediyeva, N., Abdulvaliyev, R., Meshram, A. &P.: Over-view on Extraction and Separation of Rare Earth Elements from Red Mud: Focus on Scandium, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, (2018) 39:3, 145-151 DOI 10.1080/08827508.2017.1288116
- [4] Alkan, G., Yagmurlu, B., Cakmakoglu, S., Hertel, T., Kaya, S., Gronen, L., Stopis, S., Friedrich, B: Novel approach for enhanced scandium and titanium leaching efficiency from bauxite residue with suppressed silica gel formation, Scientific report, (2018) 8:5676
- [5] Reid, S., Tam, J., Yang, M., Azimi, G.: Technospheric Mining of Rare Earth Elements from Bauxite Residue (Red Mud) :(Process Optimization, Kinetic Investigation, and Microwave pretreatment), Scientific Reports, (2017), 7:15252 DOI:10.1038/s41598-017-15457-8
- [6] Borra, C. R., Mermans, J., Blanpain B., Pontikes, Y., Binnemans, K., Germen, T.V.: Selective recovery of rare earths from bauxite residue by combination of sulphation, roasting and leaching, 2016, Minerals Engineering 92, (2016) p. 151-159
- [7] Borra C.R., Mermans J., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K. : Smelting of bauxite residue (red mud) in view of iron and selective Rare Earths recovery, Journal of Sustainable Metallurgy, 2(1) (2016) p.: 28-37

- [8] Alkan, G., B. Yagmurlu, Gronen, L., Dittrich, C., Ma, Y., Stopic, S., Friedrich, B.: Selective silica-gel free scandium extraction from Iron-depleted red mud slags by dry digestion *Hydrometallurgy*, (185), 2019, p:266-272
- [9] Mádai-Üveges, V., Dócs, D., Mucsi, G., Bokányi, L.: Examination of reaction techniques to achieve complex utilization of red mud, *Műszaki Földtudományi közlemények*, (2020), 89:1, pp.404-410
- [10] Hedrich, S., Johnson, D.B. „*Acidithiobacillus ferridurans* sp. nov, an acidophilic iron-, sulphur-, and hydrogen metabolizing chemolithotrophic gamma-proteobacterium.” *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, (2013): 4018-4025.
- [11] Cabrera, G., Gómez, J.M., Cantero, D.: Influence of heavy metals on growth and ferrous sulphate oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in pure and mixed cultures, *Process Biochemistry*, Vol40, Iss.8, (2005) pp. 2683-2687, doi: 10.1016/j.procbio.2004.12.005
- [12] Mádainé Üveges V. – Bokányi L.: Fémek kinyerése elektronikai hulladékokból bioszolubilizációval, *Bányászati és Kohászati Lapok*, Kohászat 153. évfolyam, 4. szám, (2020), 35-41