

A magyarországi vörösiszap biohidrometallurgiai hasznosításának lehetősége és költség-haszon elemzése

BALOGH Krisztián Zoltán¹ – HEGEDŰS Szilárd²

DOI: [10.29180/978-615-6886-28-6_1](https://doi.org/10.29180/978-615-6886-28-6_1)

Absztrakt

Korunk technológiai fejlődését nagyban meghatározzák a nyersanyagok, és egyre nagyobb az ipar igénye a fémekre és ritkaföldfémekre, ugyanis ezek nélkülözhetetlen tulajdonságokkal rendelkeznek a modern és környezetbarát technológiák fejlesztésében. Cikkünkben megvizsgáljuk, hogy a Magyarországon is nagy mennyiségben tárolt vörösiszapot, miként lehet hasznosítani. A vörösiszap nagy mennyiségű fémes elemet tartalmaz, emellett ritka földfémek is megtalálhatók benne. Kinyerésük azonban jelenleg is kutatások tárgyát képezi. Kutatásunk során a legjobb hatásfokkal rendelkező és költséghatékony megoldást keressük. Biológiai módszereket vizsgálunk a fémek és ritkaföldfémek kinyerésére ezen módszerek fenntarthatóságával együtt. Továbbá megvitatjuk a módszerek jövedelmezőségét a jelenleg rendelkezésre álló források alapján. A kutatás során költség-haszon elemzést készítünk a jelenleg alkalmazott technológiák és a biohidrometallurgiai módszer összehasonlítására. Kiemelten vizsgáltuk kutatásunk során a hidrometallurgiai és biohidrometallurgiai módszereket. A vörösiszap biohidrometallurgiával történő hasznosítása közép- és hosszútávon igencsak jövedelmezővé válhat, ugyanis a ritkaföldfémek csökkenése miatt áremelkedés várható, valamint a hadiipari felhasználás miatt különösen értékesé válhat ez a másodnyersanyag. A cikkünkben vizsgált módszerek gazdasági logikája nem csupán a kinyert fémek értékén alapul, hanem egy sok milliárd forintos környezeti terhet és kockázatot alakít egy profittermelő, stratégiai fontosságú nemzeti erőforrássá alakít át.

Kulcsszavak: Vörösiszap, ritkaföldfémek, biohidrometallurgia, másodlagos nyersanyag

Bevezetés

Már napjainkban is egyre jobban érzékelhető, hogy a fémek és ritkaföldfémek kritikus erőforrássá fognak válni, ha már ugyan nem azok. Megoldást a biohidrometallurgia (BHM) jelenthet, mely során az úgynevezett biológiai kioldás (bioleaching), lehetővé teszi a meddőhányókban és másodlagos bányászati nyersanyagokban akkumulálódott fémek, köztük a kritikusan fontos ritkaföldfémek visszanyerését. A módszer a hagyományos bányászati eljárások hatékony és környezetkímélő kiegészítő technológiájaként jelenthet megoldást, ezzel hozzájárulva a körforgásos gazdaság elveinek érvényesüléséhez.

Jelenleg az ipar nyersanyag felhasználása folyamatosan nő, a nyersanyag árak pedig egyre magasabbak, mert a kitermelés egyre nehezebb a könnyen hozzáférhető készletek csökkenésével. A világpiacon tovább nehezíti a stabil árképzést, hogy a legtöbb fémércet olyan országokban termelik ki, ahol instabil a geopolitikai helyzet vagy államilag központosított a bányászati/kohászati tevékenység. Továbbá Kína a fémérc kitermelésében globális jelentőségű már-már monopolisztikus helyzetben van, így szerepe nem elhanyagolható a bányászati trendek alakulásában. Számos kínai tanulmány született a biohidrometallurgiai technológiákról is. A biohidrometallurgia olyan nyersanyag készleteket szabadítana fel,

¹ BGE PSZK gazdálkodási és menedzsment alumni, Soproni Egyetem ESG és alkalmazott fenntarthatósági szakember mesterszak hallgató, baloghk5@gmail.com

² BGE PSZK egyetemi docens, ORCID: [0000-0002-0286-1715](https://orcid.org/0000-0002-0286-1715), hegedus.szilard@uni-bge.hu

amelyek eddig nem kerültek felhasználásra és gyakran nem is voltak elérhetők más technológiával. (Fleit, 2018)

Magyarországon is számottevő az olyan meddőhányó és zagyártározó, amelyet a biohidrometallurgiai módszerekkel költséghatékonyan és a legkisebb környezeti terheléssel lehetne hasznosítani. Hazánkban számos olyan kiaknázatlan meddőhányó van, amelyen a BHM technológiával lehetne nyersanyag kitermelést végezni. Ennek ellenére Magyarországon még nem eléggé elterjedt a technológia, és a bányák rekultivációja során nem helyezik előtérbe a meddőhányókban maradt nyersanyagok kinyerését, inkább az emberi tevékenység okozta kárt igyekeznek megszüntetni, és próbálják a terület természetes mivoltát visszaadni. (Kovács, 2018)

A rekultivációs tevékenység az állam számára költségként jelentkezik, melyet a BHM módszerrel lehetne csökkenteni, mivel a bioleaching rendkívül költséghatékony módszer a fémek és ritka földfémek kioldására. Emellett környezetkímélőbb, mint a hagyományos bányászati módszerek és energiahatékonyabb mint a pirometallurgia. A folyamat során kisebb a környezeti zaj és légszennyezés. A hagyományos technológiákhoz képest jelentősen alacsonyabb a CO₂ kibocsátása és az energia igénye, emellett alacsony technológiai szintű infrastruktúrát igényel, ezért kevesebb a meghibásodás lehetősége. (Fleit, 2018)

A vörösiszap mint másodnyersanyag: Hasznosítás és technológiák

Jelen kutatásunkban megvizsgáljuk, hogy az ajkai vörösiszap tároló biohidrometallurgiai módszerekkel történő hasznosítása milyen költségek mellett milyen hasznokat hozna. Az évek során nagy mennyiségű vörösiszap halmozódott fel Ajka környékén, amely nagy arányban tartalmaz hasznos nyersanyagot, köztük ritka földfémeket is.

Az Ajkán 2010. október 4-én történt vörösiszap-katasztrófa során vált igazán fontossá a vörösiszap kezelése, mivel több emberáldozatot követelt a katasztrófa. Emellett igen jelentős anyagi kárt is okozott a környező falvakban: Devecseren és Kolontáron. Továbbá bekerülve a Torna-patakba és a Marcal-folyóba, jelentős ökológiai károkat okozott. Ez is jól mutatja, hogy bár jelenleg veszélyes problémát jelent a vörösiszap a közvélemény számára, ezzel szemben kiváló nyersanyagforrás is válhat belőle.

1. táblázat: A vörösiszap néhány anyagjellemzője

Forrás: Korpics B. (2022) *A vörösiszap összetétele – alumíniumkohászat-vörösiszap.*

| A vörösiszap néhány anyagjellemzője: | |
|---|---|
| Anyag sűrűség | 3,1-3,8 t/ m ³ |
| Hézagterfogat | 1,16 |
| Térfogatsűrűség | 1,87-2,0 t/ m ³ |
| Belső súrlódási szög | 5-10° |
| Egyirányú nyomószilárdság | 40-112 N/cm ² |
| Szivárgásitényező | 10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁸ m/s |

Magyarországon jelenleg Ajka, Almásfüzitő és Mosonmagyaróvár térségében található zagyártározókban van vörösiszap, ezen vörösiszaptározók, bioleaching potenciálja igen jónak mondható, számos fémét és ritkaföldfémét lehetne kinyerni. Figyelembevéve a vörösiszap térfogatsűrűségét, Magyarországon több mint 50 millió tonna vörösiszap van a zagyártározó kazettákban. Ajkán mintegy 35-40 millió tonna vörösiszapot tárolnak. (Kovács, 2018)

A biohidrometallurgia sokkal kedvezőbb költséget von maga után, mint a hagyományos kitermelés, mivel nem kell a felszínre hozni, kitermelni az alapanyagot és nincsenek további finomítási költségek a vörösiszapból történő kioldás esetén. A biohidrometallurgia költségvonzata jóval kedvezőbb, mint a kémiai hidrometallurgiai eljárásoknak. Emellett kiválóan beillik a 3R (Reduce, Reuse, Recycle) filozófiába, mivel az alap bányatevékenység melléktermékét, hulladékát hasznosítják a folyamat során, utána pedig megkezdődhet a vörösiszaptároló kazetták rekultivációja. Így olyan nyersanyagok kitermelése válik lehetővé, amelyek igen keresettek az iparban, így a vörösiszapból értékes nyersanyag termelhető ki.

2. táblázat: *A vörösiszap összetétele Ajkán a MAL Zrt. közlése szerint a katasztrófa után közzétett adatok alapján*

Forrás: *MAL Zrt. Sajtóközlemény 2010. október 8.*

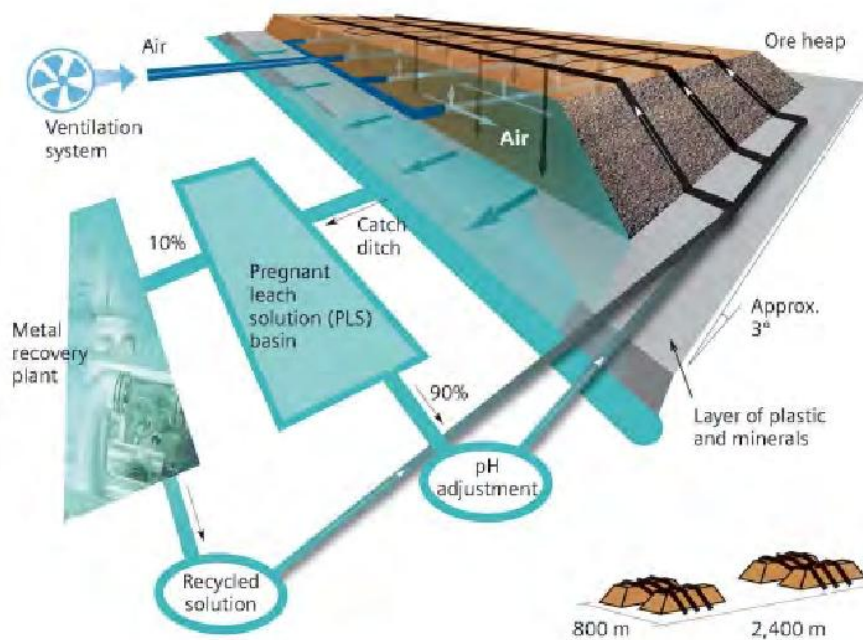
| Összetevő | Százalékos arány | Az arányokat figyelembevéve 35 millió tonnára vetítve (saját számítás) |
|--------------------------|------------------|--|
| Vas (III)-oxid Fe_2O_3 | 40-45% | 14 millió tonna |
| Alumínium-oxid Al_2O_3 | 10-15% | 3,5 millió tonna |
| Szilícium-oxid SiO_2 | 10-15% | 3,5 millió tonna |
| Kalcium-oxid CaO | 6-10% | 2,1 millió tonna |
| Titán-dioxid TiO_2 | 4-5% | 1,4 millió tonna |
| Nátrium-oxid Na_2O | 5-6% | 1,75 millió tonna |

Ilyen mennyiségű vörösiszapból jelentős mennyiségű nyersanyagot lehet kinyerni bioleachinggel. A folyamat költség-haszon aránya pedig igen jónak mondható, a táblázatban nem felsorolt alkotóelemek közül a vörösiszap számos alkotóeleme ritkaföldfém, bár ezek aránya általában 1% alatti. Azonban a ritka földfémek ára jóval magasabb, mint a többi alkotóelemé. D.Wei (2020) és munkatársai a vörösiszap összetételének meghatározásakor 0,0078 térfogatszázalékban határozták meg a vörösiszap szkandium tartalmát, emellett még tartalmaz galliumot, lantánt és titánt. Az oldatsűrűség nagyban befolyásolja a kioldás sebességét és hatékonyságát. Minél hígabb oldatot alkalmazunk, annál nagyobb a kioldás határfoka, ellenben növeli a kioldás idejét és költségeit. A Pannon Egyetem kutatásai alapján elmondható, hogy a vörösiszapból 55,56%-os kihozattal lehetett szkandiumot kioldani a vörösiszapból. (Mádainé et al.,2020) Átlagosan számolva ~24,72 gramm/tonna a kihozatali arány. Ehhez képest kellene megvizsgálni a biológiai kioldás kihozatali és hatékonysági mutatóit. A vörösiszap magas vastartalma miatt másodnyersanyagként lehetne hasznosítani. A vörösiszap vastartalmának kinyerésére már a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Kft. készített tanulmányt. A vasat biológiai módszerekkel lehetne kivonni a vörösiszapból magnetit

szintézissel. Emellett a kutatás során vizsgálták a biológiai módszerekkel történő szkandium kinyerés lehetőségét is.

Technológiai áttekintés

A bioleaching olyan korszerű megoldás, amely során a talajban, vagy esetünkben a meddőhányókban zagykazettákban rejlő fémeket a hagyományos módszereknél környezetbarátabb módon lehet kinyerni. A folyamat során a bányászni kívánt területen szükséges az oldatba vitel előkészítése a légmentes lezárása (esetünkben a zagykazettáknak), a kialakított lyukakon a vizet a tápanyagot és a baktérium kultúrát szükséges bejuttatni a bányászni kívánt közegbe. Azt utána levegővel és glükózzal kell táplálni, hogy a baktérium kultúra elvégezhesse a fémek redukcióját. Ezek után egy bioreaktorban az oldatba vitt fémeket kell kiválasztani az oldatból, majd elektrolízissel katódfémé alakítani. A bioleaching technológiai költségei, hulladékokból jóval alacsonyabbak mintha, ezeket közvetlenül az ércekből végeznék, tudniillik az ércek kibányászásától az oldatba vitelig 40%-os költségvonzat aránya van a fent említett technológiák előkészítésének, kioldásának. (Thompson, 2017)



1. ábra: Biohidrometallurgia folyamatábrája

Forrás: Fleit, 2018

Ha a Bayer-féle alumínium előállítási ciklust vizsgáljuk és az itt keletkező hulladékot visszük oldatba és ezt kezdjük biológiai folyamatokkal bányászni, akkor jelentős költségmegtakarítást érhetünk el. Az ércekből a Bayer féle eljárással nagy mennyiségű alumíniumot lehet gazdaságosan kibányászni és az eljárás mellékterméke a vörösiszap, amit már könnyű oldatba vinni, és nem igényel további finomítást. A Bayer-féle eljárás során a bauxitot megtörik, pörkölik, finomra őrölik, majd nátronlúggal kioldják belőle az alumínium vegyületeket, a keletkező oldatot szűrik és szétválasztják a vörösiszaptól, ebből kiválasztják az alumínium hidroxidot és kemencében izzítva timfölddé alakítják, amiből olvadáspont csökkentés után

elektrolízissal alumíniumot redukálnak. Azonban a vörösiszapban így számottevő a kiaknázatlan nyersanyag, amelyet BHM technológiákkal ki lehet nyerni, és így nem hulladék keletkezne az eljárás során, hanem másodlagos nyersanyag. (Gruber, 2010)

In-situ megoldással pedig a vörösiszapot sem kell átmozgatni, kutakat kell fúrni és úgy telepíteni a betápláló és kinyerő rendszert. A folyamat megkezdéséhez a vizet, az oxigént és a megfelelő baktérium kultúrát szükséges folyamatosan biztosítani. A folyamat előkészítésénél szükséges lezárni a tározót, hogy a nyomás, a hőmérséklet és az összetétel ne változzon. Az előkészítés után a folyamatosan áramló oldatot kell bioreaktorokkal „megszűrni”, leválasztani a fémes elemeket, majd elektrolízissal leválasztani a tiszta fémeket, fémes elemeket. (Fleit, 2018)

A másik elterjedt módszer a savas kioldás, amely során erős savakat használva viszik oldatba a fémeket. Ez a módszer eredményesebb, de sokkal veszélyesebb, jóval nagyobb a környezeti terhelése és jóval költségesebb, de technológia kihozatali aránya csak 10%-kal nagyobb a szkandium esetében a biológiai technológiákhoz viszonyítva.

Költségarányok meghatározása

A projekt költségbecslése során nehéz figyelembe venni az összetevők eloszlásának heterogenitását, mert a vörösiszap a tározóban változó megoszlással tartalmazza az összetevőket minden köbméter vörösiszap, továbbá ez függ az oldat sűrűségétől és a mintavétel mélységétől is. A régen beszivattyúzott vörösiszap még folyadékként az alkotók súlya szerint ülepedhetett.

A projekt költségeinek becslését Thompson (2017) és munkatársainak publikációja alapján végeztük. Fontos megjegyezni, hogy a kutatásuk során nem vörösiszappal foglalkoztak és elsődleges céljuk a ritkaföldfémek kinyerése volt, a technológia költségszerkezete mégis szoros egyezést mutat a vörösiszap BHM technológiás feldolgozásával.

3. táblázat: A Thompson féle kutatás költségei alapján meghatározott költségarányok

Forrás: Thompson et al. 2017

| Költség megnevezése | Költség aránya az összköltséghez képest |
|----------------------------|--|
| Tápanyagok | 44,3% |
| Villamos energia | 10% |
| Közüzemi díjak | 5,99% |
| Munkaerő | 7,11% |
| Karbantartás | 3,77% |
| Általános költségek | 20,2% |
| Közvetett kiadások | 5,88% |
| Állandó tőke | 2,66% |

A legnagyobb kiadás a glükóz pótlása volt a projekthez kapcsolódóan, ugyanis a tápanyag költségek 98%-át tette ki a glükóz pótlása, amely kulcsfontosságú tápanyaga az redukáló baktériumoknak. (Thompson, 2017)

A költségek mellett fontos a várható profitot is megbecsülni, hogy rentábilis-e a projekt. A Bay Zoltán Nonprofit Kft., által készített tanulmány kitér arra, hogy a vörösiszapból, magnetitet és szkandiumot lehet könnyen kioldani biológiai módszerekkel. (Bay Zoltán Kutató Intézet, 2018)

A szkandium ára kilogrammonként 3000-20000 USD között alakul, hiszen a szkandium egy kritikus nyersanyag, amelyet a technológiai fejlődéssel egyre nagyobb mennyiségben használ fel az ipar. Habár fontos megjegyezni, hogy a szkandium előfordulása a vörösiszapban kisebb mint 1%, de a magas világpiaci ára miatt már ilyen mennyiségben is gazdaságos a kioldása. (CRM Alliance, 2022)

A Thomson és mtsai. (2017) által készített tanulmány rámutat arra, hogy ritka földfémeket, bioleaching technológiával és salétromsavas kioldással lehet profitábilisan kitermelni, azonban a salétromsav rendkívül nagy környezeti terhelést jelent és a munkafolyamatok is nagyobb veszélyt hordoznak magukkal. A Thompson és mtsai. (2017) által készített tanulmány szerint a ritkaföldfémek biológiai kioldásával kapcsolatosan megállapítható, hogy az 50%-os oldatsűrűség mellett volt nyereséges a projekt.

Világviszonylatban az alumínium termelés melléktermékéből hatalmas potenciállal rendelkező másodlagos nyersanyagként lehetne a vörösiszapra tekinteni. Ezzel az ökológiai lábnyomát is csökkenthetné az alumíniumipar.

A projekt várható megtérülése, a biomining technológiákkal kinyert fémek és ritka földfémek magas ára gyors megtérülést prognosztizál, ugyanakkor a biomining fizikai korlátjai miatt az időegység alatt „átszűrhető” vörösiszap mennyisége véges, ami jelentősen befolyásolhatja a megtérülés idejét. A Thompson és mtsai. (2017) által készített tanulmány már egy év alatt megtérülést mutatott és jövedelmezővé vált a projekt, habár ők más összetételű alapanyagot bányásztak. Ezenfelül az oldat koncentrációja is nagyban befolyásolja a megtérülés idejét. Ding Wei (2020) és munkatársai kutatásuk során pedig a savas kioldás módszerét használták a bioleachinggel szemben, ezért teljesen pontosan az sem vehető alapul a számítások során.

Nem csak az új ipari technológiák során lehetne hasznosítani a vörösiszapot, hanem a már ismert megoldásokat is tovább lehetne fejleszteni. Például a titándioxid rendkívül keresett pigment, amit a festékipar és a textilipar is felhasznál. (Miskolci Egyetem, 2011)

Magyarországon több kutatás is indult a vörösiszap hasznosítására: az Envirotis Holding az almásfüzitői vörösiszap tárolót vizsgálta a hasznosíthatósága szempontjából. A kutatást 2015-ben prezentálták, amiben arra jutottak, hogy a savas kioldás túl nagy savigényű, ami az anyagköltséget is jelentősen növelte. (Kovács, 2018) Azonban fontos a technológia mennyiségbéli korlátait ismerni. A biomining során további előnyt jelenthet, hogy nem keletkezik veszélyes hulladék, amit kezelni kellene. Csak könnyen kezelhető zagy keletkezne, amit a tárolókba vissza lehetne szivattyúzni, majd ülepítés után rekultiválni lehetne őket véglegesen, zöld felületek kialakításával a zagy tározókon.

A szakirodalom kutatás alapján elmondható, hogy az 1990-es években leginkább Kanadában foglalkoztak a témával, azonban a 2010-es évektől a világ sok pontján, köztük Magyarországon kezdtek kutatásba a biohidrometallurgia terén. A vörösiszap biohidrometallurgiai hasznosításának gazdasági életképességére vonatkozóan egy komplex elemzést készítettünk, amely a közvetlen és közvetett költségeket veti össze a rövid- és hosszútávú hasznokkal.

Költséghason elemzés

A projekt teljes költségét CAPEX és OPEX megbontásban vizsgáltuk. A beruházási és működési költségek megoszlása szerint a teljes költségek 50-60%-a beruházási költség, ugyanis a zagyttározó kazetták lezárása és a bioreaktorokhoz tartozó infrastruktúra magas kezdeti költségekkel jár, azonban az összköltség így is versenyképes a hagyományos módszerekhez viszonyítva. A bioleaching további előnye, hogy a magas kezdeti költségek mellett, jelentős hasznot eredményez, az alumínium gyártás melléktermékeként keletkező veszélyes vörösiszap felhasználásával, emellett megkönnyíti a rekultiváció költséges folyamatát, ezzel csökkentve az alternatív költségeket.

Beruházási költségek (CAPEX)

Helyszín előkészítése: Az in-situ (helyben történő) kinyeréshez szükséges a zagyttározó kazetták lezárása a kontrollált környezet (hőmérséklet, nyomás) biztosítása érdekében. Emellett ki kell építeni az injektáló és kinyerő kutak rendszerét.

Technológiai infrastruktúra kiépítése: A bioreaktorok kialakítása, a szivattyúk, a levegőztető rendszerek, valamint az oldatból a fémeket kinyerő és elektrolízissel leválasztó berendezések kiépítése jelentős kezdeti költségvonzattal jár.

Kutatás és fejlesztés: A legfontosabb rejtett költség a laboratóriumi és fél-üzemi kísérletek finanszírozása. Minden zagyttározó összetétele egyedi, ezért optimalizálni kell a baktériumtörzseket, a tápoldat összetételét és a folyamat paramétereit (pH, hőmérséklet) a maximális kinyerési hatékonyság érdekében. Ez a szakasz idő- és költségigényes, de a későbbi jövedelmezőség kulcsa.

Működési költségek (OPEX)

Tápanyagok: Ahogy a Thompson és mtsai. (2017) által készített kutatás is rámutat, ez a legjelentősebb költségtényező, amely az összköltség akár 40-50%-át is kiteheti. A baktériumkultúrák fenntartásához szükséges szénforrás (jellemzően glükóz) folyamatos pótlása drága.

- Energia: A szivattyúk, a levegőztetés és az elektrolízis folyamatos villamosenergia-igénye a második legnagyobb tétel (kb. 10-15%).
- Munkaerő: Magasan képzett mérnökök és mikrobiológusok szükségesek a folyamat felügyeletéhez és irányításához.
- Karbantartás és egyéb díjak: A berendezések karbantartása, a közüzemi díjak és a környezetvédelmi monitoring (pl. vízminőség-ellenőrzés) szintén állandó kiadást jelentenek.

Hasznok és bevételek

1. Közvetlen bevételek (értékesítés): A legfőbb bevételi forrás a kinyert és tisztított nyersanyagok eladása.
 - Kritikus nyersanyagok (ritkaföldfémek): A projekt gazdasági motorja a szkandium és más ritkaföldfémek (cérium, lantán, ittrium) értékesítése. A szkandium rendkívül magas világpiacon árá (amely tisztaságától függően akár 3000-20000 USD/kg) miatt már alacsony, 1% alatti koncentrációban is jövedelmezővé teheti a kitermelést.

- Alapfémek: A vörösiszap hatalmas (40-45%-os) vastartalmának kinyerése magnetit formájában további jelentős bevételt biztosíthat az acélipar számára. A titán-dioxid pigmentként szintén értékesíthető.
2. Közvetett pénzügyi és stratégiai hasznok: Ezek a nehezebben számszerűsíthető, de legalább annyira fontos előnyök.
- Megtakarított rekultivációs költségek: A vörösiszap-tározók tájsebként és környezeti kockázatként vannak jelen. A hagyományos rekultiváció (pl. lefedés termőfölddel) hatalmas költséget jelent az állam számára. A biohidrometallurgiai hasznosítás ezt a költséges kötelezettséget egy profittermelő tevékenységgé alakítja át. A folyamat végén visszamaradó, megtisztított zagy már sokkal könnyebben és olcsóbban rekultiválható.
 - Nyersanyag-függetlenség: A kritikus nyersanyagok hazai forrásból történő előállításának csökkenti az ország kitétséget a volatilis világpiaci áraknak és a geopolitikai kockázatoknak. Ez nemzetstratégiai előnyt jelent.
 - Körforgásos gazdaság: A projekt tökéletes példája a körforgásos gazdaságnak, ahol egy veszélyes hulladékból értékes termék lesz. Ez javítja az ország és a résztvevő vállalatok "zöld" megítélését, és hozzájárulhat európai uniós vagy állami zöld fejlesztési forrásokhoz.
 - Technológiai export: Egy sikeresen működő hazai technológia komplett terméként és know-how-ként értékesíthető a világ számos más országába, ugyanis globálisan mintegy évi 150 millió tonna vörösiszap keletkezik. (Saveliev et al., 2024)

Jövedelmezőségi mérleg és konklúzió

A biohidrometallurgiai vörösiszap-hasznosítás közép- és hosszútávon jövedelmező befektetésnek ígérkezik, ennek ellenére fontos a BHM technológia időbeli és hatékonysági korlátait figyelembe venni.

A megtérülést leginkább befolyásoló tényezők:

- A nyersanyag-koncentráció: Minél magasabb a vörösiszap szkandium- és egyéb fémtartalma.
- A kitermelés hatékonysága: Az alkalmazott baktérium kultúrák milyen gyorsan és milyen arányban képesek kioldani a fémeket.
- A világpiaci árak: A kinyert fémek árfolyamának alakulása.
- A működési költségek optimalizálása: különösen az olcsóbb tápanyagok felkutatása.

A BHM technológiákkal történő vörösiszap hasznosítás jövedelmezősége, nagyban függ a kioldott fémes elemek mennyiségétől, hiszen a ritkaföldfémek és fémek együttes kioldása teszi lehetővé, hogy a vörösiszapot gazdaságosan hasznosítsák. Emellett talán a legpiacképesebb megoldás az lenne, ha a vörösiszaptározók mellé, mástípusú bányameddőket és zagy tározókat is másodlagos nyersanyagforrásként, piaci alapon koncesszióba adnának. Thompson (2017) és társai kutatását figyelembe véve a koncessziós jogok kialakításánál magas és alacsonyabb jövedelmezőképességű meddőket kellene egy koncessziós csomagban kezelni. Például a recski bánya meddőhányói még jelentős mennyiségben tartalmaznak aranyat, amelyet hatékonyan ki lehet termelni biohidrometallurgia technológiával. (Fleit, 2018) A koncessziós jog magával vonná a rekultiváció kötelezettségét is, hogy a tájsebeket és ökológiai veszélyeket megszüntessék a cégek. Ezzel környezetbarát és profitorientált módon piaci alapon lehetne megszüntetni a bányászat kellemetlen velejáróját, nem kellene annyi állami forrást erre áldozni. Továbbá ezeknek a cégeknek kellene a monitoring tevékenységet végezni, melyet állami kompenzációval lehetne megfinanszírozni, hogy megérje a koncessziót megpályázni. Az állam

költségei így is jelentősen csökkennének, így egy kölcsönösen kedvező helyzet mellett a környezet is nyertese lenne ennek az üzleti folyamatnak. Összességében a projekt gazdasági logikája nem csupán a kinyert fémek értékén alapul, hanem azon a paradigmaváltáson, hogy egy sok milliárd forintos környezeti terhet és kockázatot egy profittermelő, stratégiai fontosságú nemzeti erőforrássá alakít át.

Irodalomjegyzék

Bay Zoltán Kutatóintézet. (2018). Ritkaföldfémek kinyerése és másodlagos nyersanyagok előállítása a vörösiszap komplex hasznosítása keretében. [online] Elérhető: <https://www.bayzoltan.hu/hu/2018/03/12/ritkafoldfemek-kinyerese-es-masodlagos-nyersanyagok-elollitasa-a-vorosizsap-komplex-hasznositasa-kereteben/> Letöltve: [2022. jún. 22.].

CRM Alliance. (2022). Scandium. [online] Elérhető: <https://www.crmalliance.eu/scandium> [Letöltve: 2022.jún. 12.].

Everts, S., (2022). [online] Elérhető: <https://cen.acs.org/articles/88/i43/Recycling-Red-Mud.html> Letöltve: [2022. jún. 22.].

Fleit E., (2018), Fémek visszanyerése hulladékokból biohidrometallurgiai módszerekkel. [TOX2018 MTT Tudományos konferencia] Elérhető: https://www.hungariantoxicologists.hu/wp-content/uploads/2019/01/C1-6_Fleit_E_tox2018.pdf Letöltve: [2025.09.12].

GINOP-2.2.1-15-2017-00106 projektzáró tájékoztató anyagai (2023) Székesfehérvár, Letölthető: <https://www.martinmetals.eu/kutatas-fejlesztes>

Gruber, Gy. (2010). Gruber Györgyné - Szabványos könnyűfémek és ötvözeteik jellemzői, alkalmazása | doksi.net. [online] Elérhető: <https://doksi.net/hu/get.php?lid=22793> Letöltve: [2022. jún. 22.].

Kiss I., (2018) Kritikus nyersanyag tartalmú ipari hulladékok biotechnológiai kezelése Hulladékkezelés újragondolva -Másodlagos nyersanyagok, mint stratégiai alapanyagok. [online] Elérhető: <https://imsys.hu/wp-content/uploads/sites/10/2018/06/Kritikus-nyersanyag-tartalm%C3%BA-ipari-hullad%C3%A9kok-biotechnol%C3%B3giai-kezel%C3%A9se-Dr.-Kiss-Istv%C3%A1n-el%C5%91ad%C3%A1sa.pdf> Letöltve: [2022. jún. 22.].

Korpics, B., (2022). A vörösiszap összetétele - Alumíniumkohászat-vörösiszap. [online] Elérhető: <https://sites.google.com/site/aluminiumesvorosizsap/a-voeroesiszap-oesszetetele> Letöltve: [2022. jún. 22.].

Kovács, B. (2018) A vörösiszap másodnyersanyagként történő hasznosításának lehetőségei Környezetmérnöki Szakmai Nap. [online] Elérhető: http://kti.rkk.uni-obuda.hu/files/csatolmany/dr.kovacs_balazs-vorosizsap_hasznositas.pdf Letöltve: [2022. jún. 22.].

Mácsai, C., (2014). Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar ritkaföldfémek bauxitból való kinyerésére vonatkozó technológiák összehasonlítása Mácsai Cecília litoszféra fluidum kutató laboratórium. [online] Elérhető: <https://edit.elte.hu/xmlui/bitstream/handle/10831/37811/MacsaiCecilia.pdf> Letöltve: [2025.09.12].

Mádainé Ü, V., Csík-Simon K., & Bokányi L. (2020). Új megközelítés a vörösiszap hasznosítására. In Fókuszban a hazai felszín alatti természeti erőforrások nyersanyagok, energia és technológiák nexusa (o. 104-112). ISBN 978-963-358-277-0. Letöltve: [2025.09.12].

Miskolci Egyetem (2011). Vörösiszap hasznosításának lehetőségei- possibilities of utilization of red mud. [online] 36(1), pp.35–48. Elérhető: <http://midra.uni-miskolc.hu/document/12567/4643.pdf>.

Pasechnik, L.A., Skachkov, V.M., Chufarov, A.Yu., Suntsov, A.Yu. and Yatsenko, S.P. (2021). High purity scandium extraction from red mud by novel simple technology. Hydrometallurgy, 202, p.105597. doi:10.1016/j.hydromet.2021.105597.

Poulin, R. and Lawrence, R.W. (1996). Economic and environmental niches of biohydrometallurgy. Minerals Engineering, 9(8), pp.799–810. doi:10.1016/0892-6875(96)00073-8.

Qi, Y. (2021). The neutralization and recycling of red mud – a review. Journal of Physics: Conference Series, 1759, p.012004. doi:10.1088/1742-6596/1759/1/012004.

Saveliev, S. G., Yarosh, T. P., Kondratenko, M. M., Babaievska, O. V., & Baboshko, D. Y. (2024). Current state and prospects of red mud utilisation: A review. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 1415(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012021> Letöltve: [2025.09.12].

Thompson, V.S., Gupta, M., Jin, H., Vahidi, E., Yim, M., Jindra, M.A., Nguyen, V., Fujita, Y., Sutherland, J.W., Jiao, Y. and Reed, D.W. (2017). Techno-economic and Life Cycle Analysis for Bioleaching Rare-Earth Elements from Waste Materials. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(2), pp.1602–1609. doi:10.1021/acssuschemeng.7b02771.

Vachon, Pascale., Tyagi, R.D., Auclair, J.Christian. and Wilkinson, K.J. (1994). Chemical and biological leaching of aluminum from red mud. Environmental Science & Technology, 28(1), pp.26–30. doi:10.1021/es00050a005.

Wei, D., Jun-Hui, X., Yang, P., Si-Yue, S., Tao, C., Kai, Z. and Zhen, W. (2020). Extraction of Scandium and Iron from Red Mud. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 43(1), pp.61–68. doi:10.1080/08827508.2020.1833195. Letöltve: 2025.09.12.