



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vegyéssz mérnöki és Biomérnöki Kar

Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

Oláh György Doktori Iskola

Só és sólevek szennyező fémtartalmának eltávolítása

Tézisfüzet

Szerző: **Csorba Benjámín**, Ph.D. hallgató, K+F mérnök

Témavezető: **Dr. Gresits Iván László**, habilitált docens

Konzulens: **Dr. Boros Renáta Zsanett**, Deputy Manager Technology Support

2025



1. Bevezetés és célkitűzés

Az ipari klórgyártás alapja általában NaCl-oldat elektrolízise, társterméként hidrogéngáz és NaOH-oldat keletkezik, melyek fontos vegyipari alapanyagok. Korábban a higanycellás elektrolízis világszerte elterjedt volt, azonban ezt a legtöbb országban, a Minamata-egyezmény alapján kivezették,¹ és többnyire a membráncellás elektrolízissel váltották fel, mely a klórgyártás BAT (Best Available Techniques) technológiája, gazdaságilag és ökológiailag is előnyösebb, mint akár a higanycellás, akár a diafragmás módszer.^{2,3,4} Azonban a membráncellás technológia a korábbinál jóval nagyobb tisztaságú, fémszennyezőket legfeljebb ppb (parts per billion, tömegegységben kifejezve) nagyságrendben tartalmazó sólevet igényel, mivel a cella membránját a fémszennyezők még ppm (mg/kg) alatti koncentrációban is nagymértékben károsítják, ami a költséges elektrolízis-membránok rövidebb élettartamához, a termékek elszennyeződéséhez és a fajlagos villamosenergia-fogyasztás növekedéséhez vezet.³ A fő, eltávolítandó fémszennyezők az Al, Ca, Mg, Sr, Ba, Fe, emellett a SiO₂-tartalom csökkentése is feladat.

Vizsgálataimat valós ipari környezetben, Magyarország vezető klórgyártó vállalatával, a BorsodChem Zrt.-vel kooperációban végeztem, így a tudományos vizsgálatot ipari megvalósítás követi, követheti. A probléma feltérképezésekor kiderült, hogy a Vállalatnál a fő problémát az Al-tartalma okozza, ez felelt meg legkevésbé a BAT referenciaértékeinek. Kutatásom újdonsága tehát, hogy míg más szerzők többnyire kizárólag az alkáliföldfémionok eltávolítására fókuszálnak, addig jelen munkában kiemelt hangsúlyt fektettünk további ionok, különösen az Al³⁺ ionok tömény sóoldatokból való eltávolítására.

A tisztítási eljárások során alapvetően rossz oldhatóságú hidroxid- illetve karbonátsókat képeznek a jelenlévő Fe³⁺, Ca²⁺, és Mg²⁺ ionokból, a csapadék ülepitésével, valamint szűréssel elválasztható. Az ezt követően még az oldatban maradt alkáliföldfém-ionokat jellemzően ioncsere útján távolítják el.³

Fő célom a membráncellás elektrolízishez használt sólé szennyezőinek minél teljesebb eltávolítása, az eltávolítás optimalizálása volt. Ehhez mindenekelőtt olyan analitikai módszereket kellett találnom vagy kifejlesztenem, amelyek lehetővé teszik a szennyezők, és kiemelten az oldotalumínium-tartalom ppb nagyságrendű meghatározását tömény sós közegben, iparilag is jól alkalmazható módon, de mégis nagy érzékenységgel, kis kimutatási és meghatározási határral. Az analitikai módszerfejlesztést követően azonosítani kívántam az elektrolízishez használt sók és telített sólevek (ideértve a BorsodChem Zrt. más üzemeiből visszaforgatott anyagáramokat is) szennyezőit, és meg kellett határoznom, hogy ezek közül mely szennyezők eltávolítása terén van szükség fejlesztésekre, a hatékonyság növelésére.

Ezt követően célom volt optimalizálni a tisztítás első fő lépését, a csapadékképzést, majd a csapadék koagulációját, flokkulációját, szedimentációját kiterve a fő fémszennyezők (alkáliföldfémek, alumínium, vas) és a szilícium-dioxid eltávolítására is. Ehhez kiterjedt kísérleteket kívántam folytatni az egyes technológiai paraméterek (pl. pH, hőmérséklet, flokkulálószer típusa és koncentrációja) és a sólé összetételének a tisztítási hatékonyságra gyakorolt hatására, ezzel javítva az eltávolítás határfokát.

Vizsgálni kívántam ezen felül a maradék szennyező ionok ioncsere eltávolítási módját is, megfelelő módot találva az Al³⁺ ionok eltávolítására is, megvizsgálva több különböző gyártótól származó, különböző funkciós csoportú ioncsereelő gyanta Al-megkötő kapacitását, optimalizálva a pH, a hőmérséklet, a gyantaágy geometriája és egyéb üzemelési paraméterek hatását. Eredményeim hozzájárulhatnak az elektrolízis-membránok hosszabb élettartamához. A megkötés mellett az ioncsereelő gyanták regenerálási módját is optimalizálni kívántam annak érdekében, hogy megtaláljam a lehető legnagyobb lehetséges ciklusidőt két regenerálási folyamat közt, valamint az optimális regenerálási módot (regenerálószer fajtája, mennyisége, koncentrációja, térfogatárama stb.).

¹H. Selin, S. E. Keane, S. Wang, N. E. Selin, K. Davis, D. Bally (2018) *Ambio* 47:198-215.

²P. Schmittinger, T. Florkiewicz, L. C. Curlin, B. Lüke, R. Scannell, T. Navin, E. Zelfel, R. Bartsch (2012) Chlorine. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* 8. kiadás, 532-621, Wiley, Weinheim, Németország.

³European Commission (2014) JRC Publications Repository - Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) [Online] <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91156>. [Hozzáférés dátuma: 2025. 01. 15.]

⁴G. Pátzay, A. Tungler, L. T. Mika (2011) A klór-alkáli elektrolízis. *Kémiai Technológia*, 61-64, Typotex, Budapest.

Kísérleti munkánkat szimulációs elemzéssel, érzékenységvizsgálatokkal is ki kívántam egészíteni. Céлом volt a sólékör tisztító egységeinek rendszerszintű szimulációja annak érdekében, hogy a különböző technológiai egységek közti kölcsönhatásokat is detektálhassuk. Emellett az ioncsere lépését részletesen is szimulálni kívántam, hogy a kísérleti munkát megkönnyíthessük, a legígéretesebb kísérleti paraméterek kiválasztásával a fejlesztési munkát lerövidíthessük, és a méretnövelést is egyszerűen tanulmányozhassuk.

2. Irodalmi háttér

Bár már számos módszer ismert a nyomnyi Al-tartalom megfelelő meghatározására, ezek a módszerek általában magas beruházási és üzemeltetési költségeket igényelnek (pl. GF-AAS, ICP-AES).⁵ A spektrofotometriai technikák ígéretes alternatívát jelenthetnek az Al-mérés esetén is. Ezek a módszerek általában olyan szerves komplexképző reagenseket alkalmaznak, melyek szelektíven képesek színes komplexeket képezni a mérendő fémmel. Szakirodalmi kutatásunk alapján e reaktánsok közül érzékenység tekintetében kiemelkedett a kétfogú eriokróm cianin R (ECR) ligandum, melyet több szerző is vizsgált, azonban tömény sós közeg esetén tudomásom szerint még senki sem alkalmazott.⁶

Shokrollahi és munkatársai⁶ egy olyan spektrofotometriai módszert fejlesztettek ki, mely 4 és 400 ppb között képes volt az oldottalumínium-tartalom meghatározására, azonban tanulmányuk szerint több mint 500-szoros $\text{Na}^+/\text{Al}^{3+}$ vagy $\text{Cl}^-/\text{Al}^{3+}$ molarány esetén a módszer nem használható, mivel zavaró interferenciaeffektus lép fel. Jelen szerzők a mérés érzékenységét kationos felületaktív anyag hozzáadásával növelték. A pH-függés vizsgálatoknál fontos volt, hogy a használt pufferek ne lépjenek nem kívánt mellékreakcióba a jelenlévő komponensekkel, miközben savi disszociációs állandójuk is megfelelő, és oldhatóságuk is elegendően nagy. Az ecetsav-nátrium-acetát puffer pH 5 környékén megfelelő volt, azonban e fölötti pH-n más puffereket kellett alkalmazni. Erre a Good és munkatársai által kifejlesztett biológiai pufferek ígéretesnek tűntek.⁷

A sók, sólevek tisztítási lehetőségeit számos szerző tanulmányozta. Ezek jellemzően csapadékképzésen, szűrésen, koaguláción, flokkuláción, ülepitésen, adszorpción, ioncserélésen alapuló módszerek,^{8,9,10,11,12,13,14,15} de előfordulnak ultra-, mikro-, és nanoszűrés,¹² membránműveleteket, vízgőzdesztillációt, extrakciót, sztrippelést, fotokémiai oxidációt, flotálást,^{9,16} elektrokoagulációt, fordított ozmózist, membránesztillációt¹² alkalmazó módszerek is. Azonban, egyes módszerek a méretnövelhetőség szempontjából nem jöhetnek szóba,¹⁶ vagy túlzottan költséges lépéseket is tartalmaznak,¹² míg más eljárások alumíniumtartalmú flokkulálószerkeket, koagulánsokat alkalmaznak^{9,15,16,17} vagy a csapadékképzés elősegítése végett növelik a rendszer alumíniumtartalmát.^{10,18} Emiatt az alumínium megfelelő eltávolítása az elektrolizáló sólevekből új megközelítést, kiterjedt kísérleti fejlesztési munkát igényelt.

Az oldott alumínium kémiájával híg vizes oldatban nagy részletességgel foglalkoztak. Az alumínium pH 4-10 között válik le, általában kolloidális csapadékként. A gyengén savas tartományban a csapadék

⁵M. Frankowski, A. Ziola-Frankowska, I. Kurzyca, K. Novotny, T. Vaculovic, V. Kanicky, M. Siepak, J. Siepak (2011) *Environmental Monitoring and Assessment* 182:71-84.

⁶A. Shokrollahi, M. Ghaedi, M. S. Niband, H. R. Rajabi (2008) *Journal of Hazardous Materials* 151(2-3):642-648.

⁷N. E. Good, G. D. Winget, W. Winter, T. N. Connolly, S. Izawa, R. M. Singh (1966) *Biochemistry* 5(2):467-477.

⁸M. A. Aghdam, F. Zraick, J. Simon, J. Farrell, S. A. Snyder (2016) *Desalination* 385:69-74.

⁹M. A. Marcin, T. R. Sage (2017) Amerikai egyesült államokbeli szabadalom: US 9,719,179 B2, 2017. 08. 01.

¹⁰S. Harrison, J. Burba (2020) Amerikai egyesült államokbeli szabadalom: US 10,829,676 B2, 2020. 11. 10.

¹¹X. Luo, C. Wei, X. Li, Z. Deng, M. Li, G. Fan (2022) *Separation and Purification Technology* 296:121367.

¹²R. Chidambaran, N. S. Bisht, P. Raina (2014) WIPO-szabadalom: WO 2014/088826 A1, 2014. 06. 12.

¹³X. Luo, X. Li, C. Wei, X. Shi, S. Zheng, Z. Deng (2021) *Separation and Purification Technology* 267:118676

¹⁴M. J. Adelman, R. Newman, H. Seshan, M. Z. Afifi, M. Dornfeld, J. R. Quicho (2018) The impact of brine on primary settling of wastewater. *Water Environment Federation* [Online] <https://www.accesswater.org/publications/proceedings/-299530/the-impact-of-brine-on-primary-settling-of-wastewater>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 05. 10.]

¹⁵C. H. Lee, Y. J. Kim, S. H. Moon, S. H. Kwon, K. H. Ahn (2022) *Journal of Environmental Science International* 31(1):1-8.

¹⁶B. Abada, S. Joag, R. Sharma, S. Chellam (2022) *Water Research* 226:119241.

¹⁷S. Kvech, M. Edwards (2002) *Water Research* 36(17):4356-4368.

¹⁸E. T. Nurmesniemi, T. Hu, K. Rajaniemi, U. Lassi (2021) *Desalination and Water Treatment* 217:195-202.

jellemzően stabil szolt képez, nem ülepedik, míg a gyengén lúgos tartományban az ülepedés a jellemző, mivel nem stabilizálják a szolt a szolrészecskék felületére adszorbeálódott ionok.^{19,20} Kvech és Edwards¹⁷ szerint híg vizes közegben a szulfátionok szorpciója nagymértékben destabilizálja a pozitívan töltött alumínium-hidroxid szolokat, elősegítve a kolloidális csapadék aggregációját. Emellett pH 9,5 fölött kísérletileg kimutatták, hogy a magnézium- és az alumínium-, valamint a szilícium- és az alumíniumtartalom kölcsönösen csökkentik egymás oldhatóságát. A szilícium-dioxid kicsapásának hagyományos módszere pedig a szakirodalom szerint a magnéziummal történő együttes kicsapás,²¹ de akár a vas-, alumínium-, és kalciumionok jelenléte is kedvező lehet.²² Ezen eredmények alapjául szolgáltak saját kísérleteink megtervezésének is.

Az alumínium ioncserés eltávolításnak lehetőségeit tárgyaló irodalmi források száma korlátozott. Ugyanakkor Virolainen és munkatársai²³ aminometilfoszfonsav funkciós csoportú ioncserélő gyantát (Lewatit TP260) alkalmaztak az Al-, Fe-, Mn-, és Cu-tartalom eltávolítására Li-ion akkumulátorok kilyűgozásából származó oldatból. A vas és az alumínium gyantaszemcsékről történő eluálására 0,4 M koncentrációjú kálium-oxalát oldatot, míg a mangán és a réz leoldására 2 M koncentrációjú kénsavoldatot alkalmaztak. Emellett a regenerálás tekintetében kénsav, salétromsav, sósav, sósav-nátrium-klorid vegyes oldat, nátrium-citrát és nátrium-etilén-diamin-tetraacetát használatát is vizsgálták, de ezek határfoka jelentősen elmaradt a kálium-oxalátétól. Az eljárás az alumíniumionok esetén iminodiacetát, szulfonsav és karbonsav funkciós csoportú ioncserélő gyanták alkalmazásával összevetve igen hatékony volt, 60 °C hőmérsékleten az optimális pH-t 3-nak találták. Ugyanakkor a belépő Al-koncentráció 1,3 g/l volt, mely 3 nagyságrenddel nagyobb az általunk vizsgált sólé kezdeti koncentrációjánál, és 4-5 nagyságrenddel nagyobb az elérendő határértéknél, így egyenes következtetést a saját esetünkre vonatkozóan nehezen lehet levonni. Ezek alapján kísérleti munkánkhoz többek közt az aminometilfoszfonsav funkciós csoportú ioncserélő gyantákat választottam.

A sólékör, vagy egyéb víztisztítási folyamatok rendszerszintű folyamatszimulációja megfelelő folyamatszimulációs szoftverek (pl. Aspen Plus, ChemCAD, UniSim Design) segítségével valósítható meg, bár egyes egységek szimulációja egyéb úton, pl. saját programkóddal is lehetséges.^{24,25} A sólékör rendszerszintű szimulációjához jó alapot adott Fengmin és munkatársai²⁴ hasonló, Aspen Plus programmal kivitelezett tanulmánya. Ma és munkatársai²⁵ pedig saját programkódjuk segítségével Ni²⁺ ionok eltávolítását vizsgálták szennyvízből iminodiacetát funkciós csoportú, vegyes állapotú (részben H⁺, részben Na⁺ forma) gyanta használatával. A program a gyantaszemcsék belsejében történő folyamatokat a homogén felületi diffúzió modellje (Homogeneous Surface Diffusion Model, HSDM) segítségével írja le. Ezen módszer ígéretesnek tűnt a sólé tisztításra használt ioncserés művelet részletes modellezésére is.

3. Kísérleti, számítási módszerek

A sólevek nyomnyi mennyiségű alumíniumtartalmának meghatározására szolgáló analitikai módszerfejlesztés során az ígéretesnek talált ECR-ligandummal történő komplexképzésen alapuló spektrofotometriás eljárást vizsgáltam. Ehhez ECR-mérőoldatot, valamint az érzékenység további növelésére cetil-trimetil-ammónium-bromid (CTAB) oldatot alkalmaztam, ismert Al-tartalmú sólevekkel különböző körülmények között kalibrációt végezve. A fejlesztés során vizsgáltam többek közt a só tartalom, a pH, a hőmérséklet, a hullámhossz, a beméréstől eltelt idő hatását a mért abszorbanciajelre, a

¹⁹A. J. Rubin, L. Hayden (1973) *Studies on the hydrolysis and precipitation of Aluminum(III)*, Ohio State University, Columbus, Ohio, Amerikai Egyesült Államok.

²⁰J. D. Hem, C. E. Roberson (1967) *Form and stability of aluminum hydroxide complexes in dilute solution*, United States Government Printing Office, Washington, Amerikai Egyesült Államok.

²¹P. Meyers (1999) *IWC* 99(64):1-10.

²²D. M. Thomas (1992) Silica recovery and control in Hawaiian geothermal fluids. Final report. *U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information* [Online] <https://www.osti.gov/servlets/purl/10179299>. [Hozzáférés dátuma: 2025. 04. 15.]

²³S. Virolainen, T. Wesselborg, A. Kaukinen, T. Sainio (2021) *Hydrometallurgy* 202:105602.

²⁴D. Fengmin, D. M. Warsinger, T. I. Urmí, G. P. Thiel, A. Kumar, J. H. V. Lienhard (2018) *Environmental Science & Technology* 52(10):5949-5958.

²⁵A. Ma, A. Abushaikha, S. J. Allen, G. McKay (2019) *Chemical Engineering Journal* 358:1-10.

mérés érzékenységére, és a kalibrációs egyenes R^2 jóságára. Az optimalizált körülmények között meghatároztam a módszer analitikai teljesítményjellemzőit különböző pufferek (acetát, HEPES, MOPS, Tris) mellett, és ismert koncentrációjú standard-oldatok alkalmazásával validáltuk a módszert. Emellett magnézium, valamint szilícium-dioxid mérésére is sikeresen adaptáltam megfelelő fotometriás mérési módszereket.

A csapadékképzés, koaguláció, flokkuláció, illetve szedimentáció útján történő sóléztisztítás vizsgálatokor első lépésben a BorsodChem Zrt. által is alkalmazott erdélyi bányasóból közel telített 25 t%-os oldatot készítettünk, majd annak pH-ját 60 °C hőmérsékleten a kívánt értékre állítottuk. Egyes kísérletekben ezt követően poliakrilamid típusú flokkulálószer is adtunk a rendszerhez. Ezt követően a sólevet termosztált duplikátorba helyeztük, majd a szedimentációt 4 órán keresztül tanulmányoztuk. Az eltávolítás hatékonyságára az oldat felszínéről vett minták szennyezőanyag-tartalmának csökkenéséből következtettem. Az oldottalumínium-tartalmat saját fejlesztésű spektrofotometriás módszerünkkel mértük, a további fémszennyezők koncentrációját ICP-AES méréssel követtük. Ezen úton optimalizálni tudtam a pH-t és az alkalmazott flokkulálószer típusát, koncentrációját, valamint a szedimentációs időt. Az egyes fémszennyezők csapadékképzésre gyakorolt kölcsönhatását az előbbi eljáráshoz hasonló modellkísérletekkel vizsgáltuk. Ezen kísérletekhez az eredeti üzemi technológiával tisztított sólevet használtuk, melyhez a szennyező ionok különböző mennyiségét adtuk. A SiO_2 -eltávolítás vizsgálatokor műanyag eszközökkel dolgoztunk. Emellett további, laboratóriumi vegyszerekkel történő modellkísérleteket is végeztünk a flokkulálószer koncentrációjának és az egyes fémionoknak egymás eltávolítására gyakorolt hatásának felderítésére. A csapadékok morfológiáját, összetételét pásztázó elektronmikroszkópia (SEM), valamint röntgen-diffrakció (XRD) segítségével, az aggregációs folyamatot dinamikus fényszórási (DLS) mérésekkel, a mikrofázisok töltését zépotenciál-mérésekkel vizsgáltuk. Emellett tanulmányoztuk a csapadékok oldhatóságát is a leválasztás pH-jától eltérő pH-jú sóvekben.

Az ioncserés eljárások vizsgálata során az ioncserélő gyanták karakterizálását követően először az ígéretesnek talált ioncserélő gyanták Al-megkötő kapacitását vizsgáltuk. Ehhez ismert térfogatú gyantát rázattunk ismert tömegű és Al-tartalmú, különböző pH-ra pufferelt sóvekben. A nem megkötött Al-tartalmat saját fotometriás módszerünkkel állandósult állapotig mértük, majd a komponensmérleg-egyenlet segítségével a gyanták kapacitását kiszámítottam. Az optimálisnak talált pH értékeken szakaszos, valamint megkötési kísérleteket végeztünk. A szakaszos kísérletek alapján meghatároztam a folyadékoldali teljes komponensátadási tényezőt, és kinetikai szempontból összehasonlítottam a vizsgált gyanták teljesítőképességét. A dinamikus megkötési kísérletek során a teljes kapacitásukhoz képest különböző mértékig telített ioncserélő gyanták Al-megkötő hatását tanulmányoztam az optimális pH-n, termosztálás mellett, így különböző hőmérsékleteken és különböző gyantatípusok esetén felvéve az áttörési görbét. Emellett a gyantaoszlop geometriáját is vizsgáltam ugyanazt a gyantamennyiséget különböző átmérő/magasság arányú oszlopokba betöltve, miközben minden más paramétert változtatlan értéken tartottam. Végül, de nem utolsó sorban az Al-megkötő ioncserélő gyanták regenerálási módját (ciklusidő, regenerálószer típusa, koncentrációja, mennyisége, térfogatárama, regenerálószer sorrendje) is optimalizáltam. A szükséges Al-meghatározás a regenerálási vizsgálatok során is az általam fejlesztett fotometriás módszerrel történt.

A sólékör rendszerszintű szimulációjához Aspen Plus programot használtam. A modell felállításakor figyelembe vettem a sólé-recirkulációt, a NaOH-oldattal, valamint Na_2CO_3 -tal segített csapadékképzés, a szedimentáció és a szűrés folyamatát, a kétlépeses ioncserét az alkáliföldfémek, és az egylépeses ioncserét az alumínium eltávolítására, valamint az ioncserélő gyanták regenerálásakor keletkező regenerátumok visszaforgatását. A felállított modell segítségével érzékenységvizsgálatokat végeztem a sólé összetételének, az adagolt leválasztószereknek, a hőmérsékletnek az eltávolítás hatékonyságára gyakorolt hatására. Az ioncserélés részletes modellezését megvalósító, saját magunk által készített Python-program a HSDM módszeren alapul, a Crank-Nicolson algoritmus használatával. A program segítségével érzékenységvizsgálatokat végeztem, feltérképezve számos paraméter hatását (pl. belépő sólé összetétele, gyanta mennyisége, oszlopgeometriája, áramlási sebesség). Ezen paraméterek változtatásával számos áttörési görbét, illetve izotermát, izoplánt és izokront vettem fel. Emellett a gyantaágy ciklikus működését is vizsgáltam.

4. Eredmények

4.1. Spektrofotometriai mérési módszer kifejlesztése a nyomnyi alumíniumtartalom meghatározására tömény sós közegben

Kísérleteink alapján kiderült, hogy az oldott alumínium ECR-reagenssel, mint komplexképző ligandummal kationos felületaktív anyag jelenléte mellett spektrofotometriai úton meghatározható tömény NaCl-tartalmú minták esetén is nyomnyi, 5,9-690 ppb közti koncentrációtartományban, sőt a mérés nemcsak, hogy működőképes tömény sós közegben, hanem a módszer érzékenységét a sótartalom növelése jelentősen javítja (lásd 1. ábra), így annak ellenére, hogy szilárd reaktánsok helyett a könnyebb kezelhetőség érdekében mérőoldatokat használunk, és így a kiindulási mintát hígítjuk, hasonló dinamikus tartomány érhető el, mint híg oldatok esetén szilárd reaktánsokat használva.

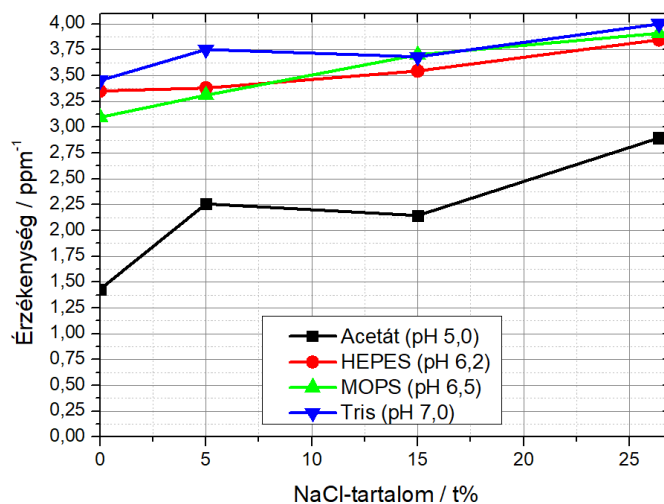
Összegezve tapasztalataimat, a mérési eljárás a következőképpen hajtható végre:

- Adjunk a mintához a mintára nézve 1/6 tömegű 0,08000 t% töménységű ECR-mérőoldatot
- Adjunk a minta kezdeti tömegére nézve 1/3 tömegű CTAB-t és a megfelelő puffert is tartalmazó, oldatot a rendszerhez. Ezen oldatok töménysége CTAB-re nézve 0,546 t%, a pufferre nézve a következő:
 - Ecetsav-nátrium-acetát: 35,8 t% $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, majd 2,37 t% ecetsav bemérése
 - Tris-HCl: 22,5 t% Tris bemérése, majd pH-állítás 7,0-ra sósavval
 - MOPS-NaOH: 13,5 t% MOPS bemérése, majd pH-állítás 6,5-re NaOH-oldattal
 - HEPES-NaOH: 18 t% HEPES bemérése, majd pH-állítás 6,2-re NaOH-oldattal
- Az összeméréstől számítva az acetát puffer esetén 15-90 perc, MOPS puffer esetén 2-8 óra, HEPES-puffer esetén 4-24 óra, Tris puffer esetén 4-8 óra múlva mérjük meg a minta abszorbanciáját. A hígítási arány és a korábban felvett, a minta sótartalmának megfelelő kalibrációs egyenes alapján a minta oldotalumínium-koncentrációja megadható.

A fenti eljárásra vonatkozóan, az egyes pufferrendszerek használata esetén mért analitikai teljesítményjellemzők az 1. táblázatban szerepelnek.

1. táblázat: Az Al-meghatározásra kifejlesztett fotometriai módszer analitikai teljesítményjellemzői.

	Acetát (pH 5,0)	HEPES (pH 6,2)	MOPS (pH 6,5)	Tris (pH 7,0)
Kimutatási határ	2,5 ppb	1,8 ppb	2,0 ppb	1,9 ppb
Meghatározási határ	8,4 ppb	5,9 ppb	6,8 ppb	6,3 ppb
Érzékenység (S)	$2,897 \text{ ppm}^{-1}$	$3,846 \text{ ppm}^{-1}$	$3,911 \text{ ppm}^{-1}$	$4,001 \text{ ppm}^{-1}$
Moláris abszorpciós koefficiens	$1,05 \cdot 10^5 \text{ Lmol}^{-1}\text{cm}^{-1}$	$1,39 \cdot 10^5 \text{ Lmol}^{-1}\text{cm}^{-1}$	$1,42 \cdot 10^5 \text{ Lmol}^{-1}\text{cm}^{-1}$	$1,45 \cdot 10^5 \text{ Lmol}^{-1}\text{cm}^{-1}$
Lineáris tartomány	8,4-690 ppb	5,9-469 ppb	6,8-470 ppb	6,3-349 ppb



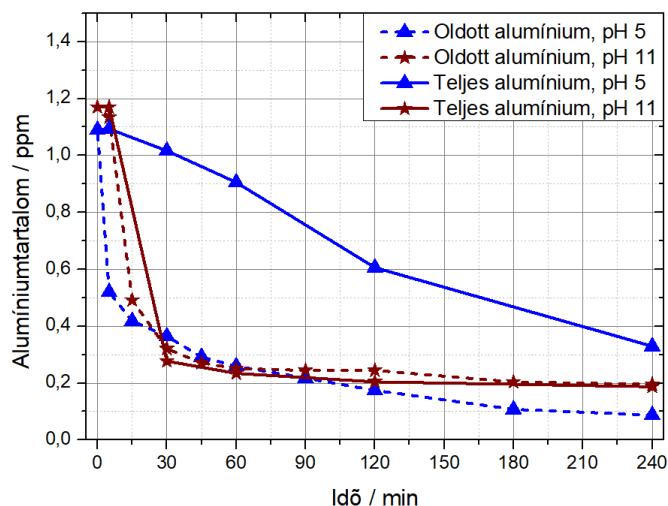
1. ábra: A minta NaCl-tartalmának hatása a mérés érzékenységére az egyes pufferrendszerek esetén.

Az ecetsav-nátrium-acetát pufferrendszerben, 5-ös pH-jú közegben végzett méréshez képest, amennyiben a pH-t megfelelő biológiai pufferekkel (HEPES, MOPS, Tris) 6,2-7,0 közé növeljük, a mérés érzékenysége 32,8-38,1%-kal növekszik a pufferrendszer fajtájától függően, tömény sótartalmú minták esetén. A biológiai puffereket alkalmazó eljárások további előnye, hogy az érzékenység sokkal kevésbé függ a sótartalomtól, mint ecetsav-nátrium-acetát pufferrendszer esetén, ami lehetővé teszi, hogy tájékozódó mérést a minta sótartalmának meghatározása, és az ezen sótartalomnak megfelelő kalibráció elkészítése nélkül is elvégezzünk (amennyiben valamilyen kalibráció rendelkezésre áll). Ugyanakkor, szemben az acetátpuffer esetén tapasztalható 15-20 perccel, MOPS puffer esetén csak 2 óra, HEPES és Tris puffer esetén csak 4 óra alatt alakul ki a megfelelő jel, ami hosszadalmasabbá teszi a mérést, viszont a megfelelő jel jelentősen hosszabb ideig fennmarad, mint 5-ös pH-jú közegben. A hőmérséklet hatását vizsgálva megállapítható, hogy a megfelelő eredmény biztosítása érdekében a mérést a kalibráció hőmérsékletén, vagy attól legfeljebb néhány °C fokkal eltérő hőmérsékleten kell végezni, a hőmérséklet zavaró hatása a Tris puffer esetén a legjelentősebb. Szintén a Tris puffer használata ellen szól az, hogy esetében a vakodat abszorbanciája nagyobb, így a mérés dinamikus tartománya szűkebb.

A vizsgált 3 biológiai puffer közül a MOPS puffer használatát tartom a legelőnyösebbnek, melynek további előnye, hogy esetében nem mutattam ki eltérést a mérés optimális pH-jában az Al-koncentráció függvényében. Összehasonlítva a MOPS és az acetát pufferrel végzett mérési módszerek jellemzőit tömény sós közeg esetén, megállapítható, hogy mindkét módszernek vannak előnyös tulajdonságai a másikkal szemben. Az ecetsav-nátrium-acetát pufferrendszerben történő mérés gyorsabban ad eredményt, és a pufferrendszer is általánosabban használt, olcsóbb, ugyanakkor a MOPS puffer nagyobb érzékenységet és kisebb kimutatási és meghatározási határt biztosít. Az alkalmazott módszert mindig az adott céloknak, erőforrásoknak megfelelően kell megválasztani. Igazoltam, hogy mind az ecetsav-acetát, mind a vizsgált 3 biológiai puffer lehetővé teszi nyomnyi, ppb nagyságrendű Al-tartalom meghatározását tetszőleges sótartalmú, azaz tömény sós közegben is. Kifejlesztett mérési módszerünk előnye annak egyszerűsége, gyorsasága és az, hogy nem igényel jelentős műszerezettséget, egy általános UV-VIS spektrofotométerrel is kivitelezhető, szemben az ICP-AES vagy a GF-AAS módszerekkel. A módszer felhasználható mind ipari környezetben, mind tudományos célú mérések során.

4.2. A sólétisztítás csapadékképzéses, koagulációs, flokkulációs, szedimentációs lépésének optimalizálása

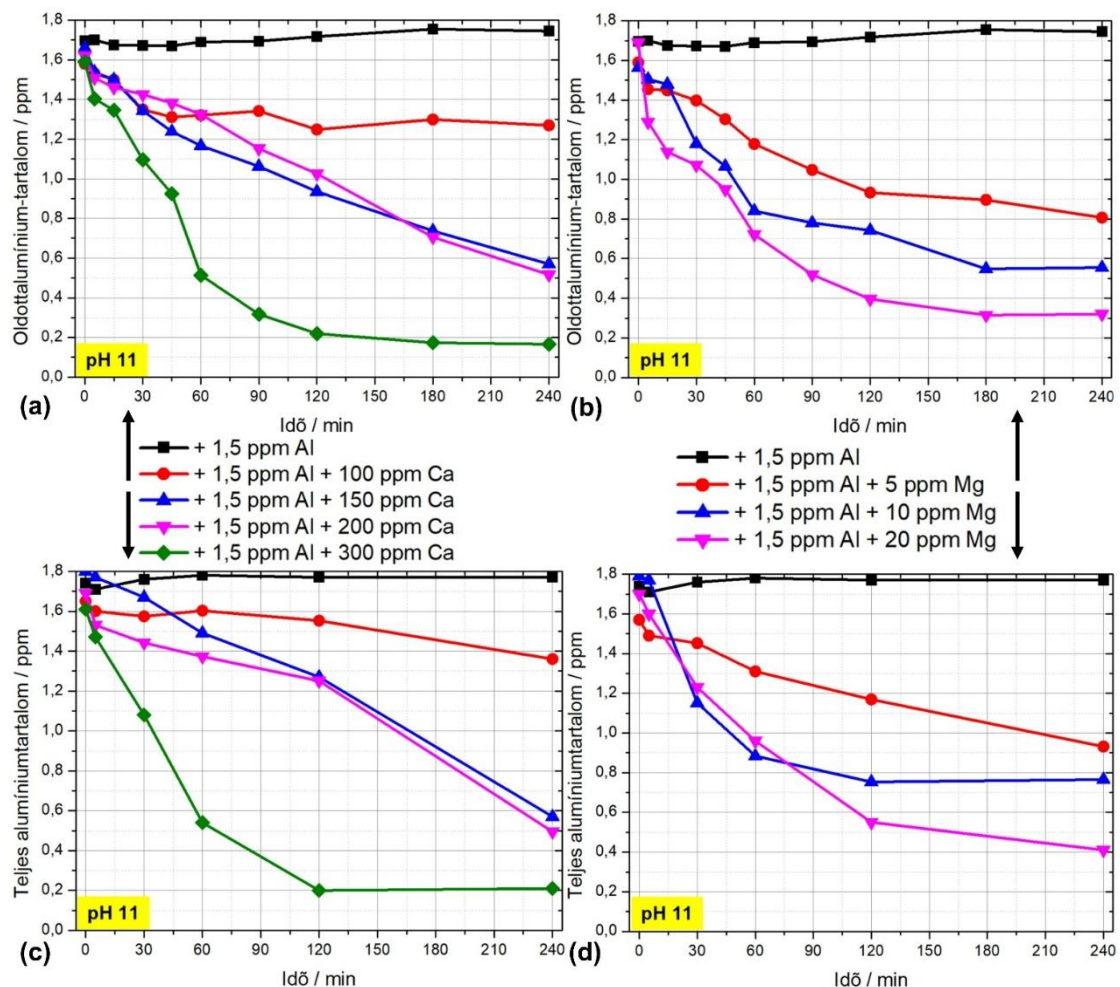
A sólétisztítási eljárás első fő lépését, a csapadékképzést, koagulációt, flokkulációt, szedimentációt pH 3 és pH 12 közt vizsgálva kimutattam, hogy az alumínium csapadékképződése a leghatékonyabban pH 5 és pH 11 esetén megy végbe a vizsgált bányászati 25 t% töménységű oldatában (ekkor mértük a legkisebb oldotalumínium-tartalom értékeit). Bár az alumínium csapadékként való kiválása mindkét pH-n hasonló hatékonysággal végbemegy, azonban a keletkező csapadék pH 11 mellett jóval hatékonyabban ülepedik, mint pH 5 esetén, amit a teljes alumíniumtartalom jóval gyorsabb, az oldotalumínium-tartalom csökkenésével jó közelítéssel megegyező ütemű csökkenése jelez. Ezen jelenséget szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra: Az alumínium leválasztásának, szedimentációjának hatása az oldat felső 1 cm-es rétegében mérhető oldott-, valamint teljes alumíniumtartalomra az optimális pH értékeken.

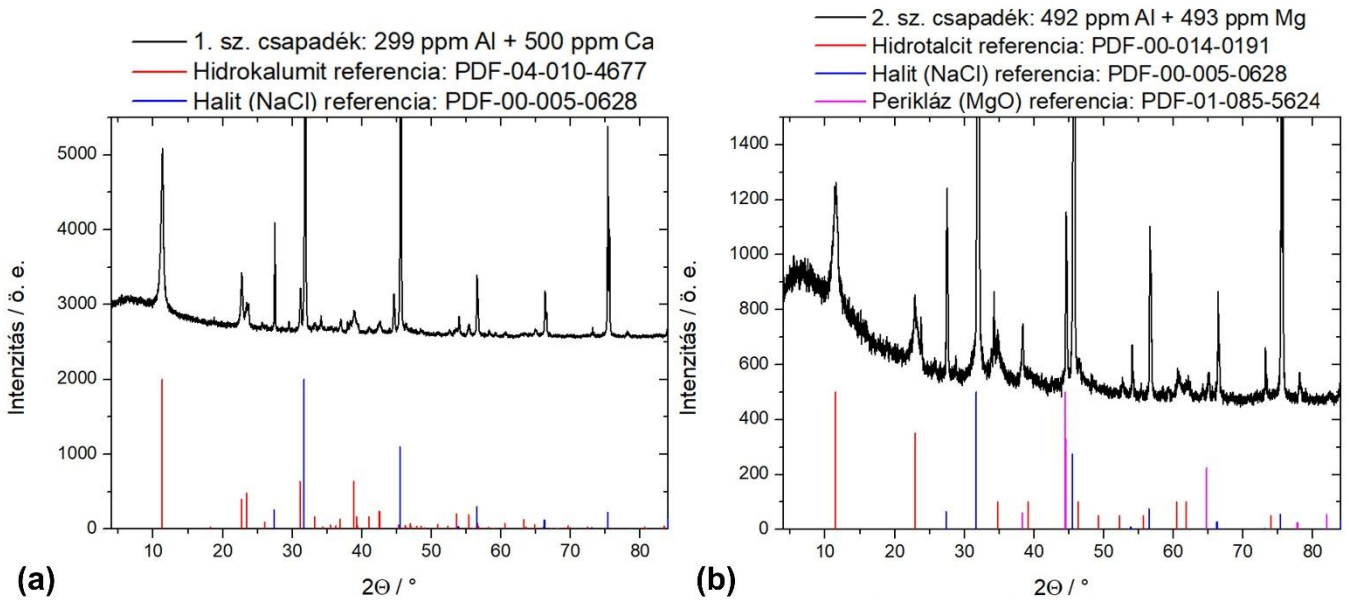
Megvizsgáltuk emellett egyéb fémek viselkedését is. A kalcium pH 11 alatt nem ülepedett, pH 11 esetén 30 perc után 100-110 ppm-en, pH 12 esetén pedig 2 óra elteltével 10 ppm alatt állandósult. A magnézium pH 9 alatt nem ülepedett, majd a pH növelésével egyre kisebb Mg-tartalmat mértünk, például pH 11 esetén 2 óra elteltével a Mg-tartalom 0,2 ppm alatt állandósult. A stroncium és a bárium a vizsgált közegben és körülmények közt (pH 3-12, 60 °C), a vizsgált kiindulási koncentrációk mellett (Sr 1,8-2,1 ppm, Ba 25-30 ppb) egyik esetben sem szedimentálódott. A vas viselkedése némileg hasonló volt az alumíniuméhoz, a lúgos, 10-12 közötti pH értékek voltak a kedvezőek, a legkedvezőbbnek bizonyuló pH 11 mellett például a kezdeti 1,29 ppm vastartalom 30 perc után 0,33 ppm-re, 120 perc után 0,11 ppm-re, 240 perc után 0,04 ppm-re csökkent, de a pH 6 is viszonylag kedvező volt (kissé kevésbé, mint a lúgos közeg).

Az alumínium esetében tapasztaltak ellentmondásban voltak az általános, híg vizes oldatokban ismert, az amfoter tulajdonságból és az aluminátkomplex képződéséből következő oldhatósági határokkal, és az általunk tömény sós közegben mért oldhatósági határokkal is. Kísérleteink szerint az alumínium eltérő viselkedését a kalcium- és a magnéziumionok okozzák. Modellkísérleteink alapján a Ca- és Mg-tartalom az alumínium oldhatóságát a vizsgált körülmények közt jelentősen csökkenti, a kiváló csapadék pedig jól ülepedik, ahogy azt a 3. ábra mutatja. Kalcium és magnézium hiányában, egyébként ugyanilyen körülmények között (az egyéb ionok, például vas, szilikát jelenlétében) hasonló hatást nem tapasztaltam.

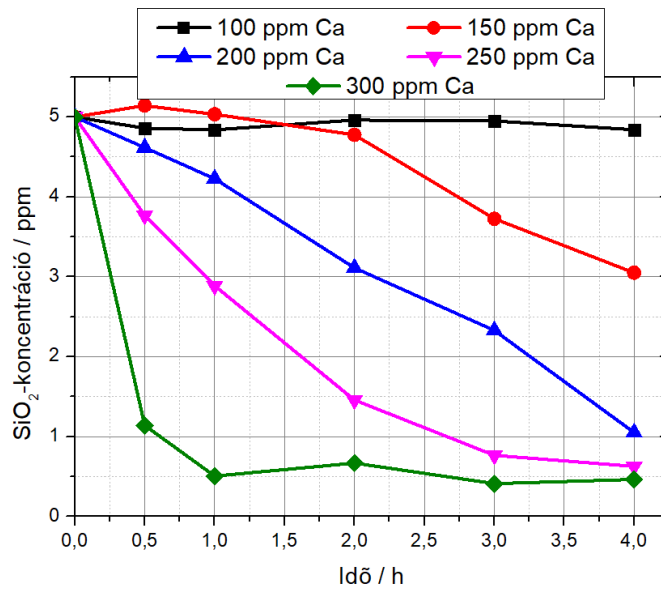


3. ábra: A kalcium (felül) és a magnézium (alul) hatása a felszíni Al-tartalomra (pH 11, 60 °C).

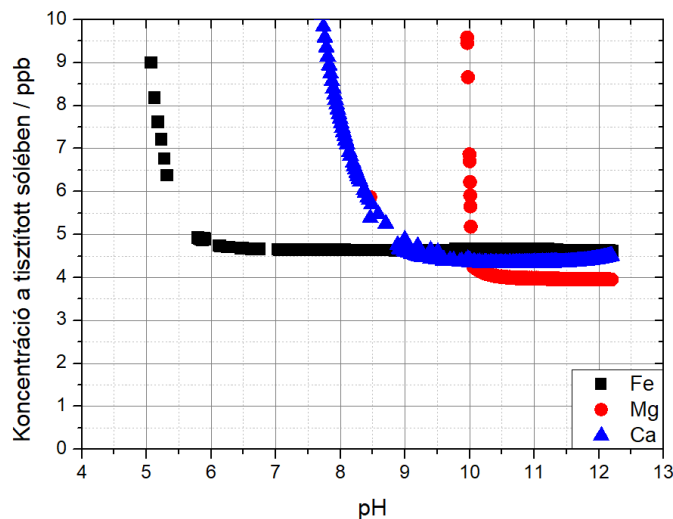
A csapadékokat XRD-módszerrel megvizsgálva, azokban a kalcium és a magnézium alumíniummal képzett közös vegyületeit, hidrokalciumot, illetve hidrotalciumot mutattunk ki (lásd 4. ábra). Ezáltal bebizonyítottam, hogy a Ca-tartalom és a Mg-tartalom azáltal segíti az Al-tartalom csapadékként történő kiválását, hogy közös, rosszul oldódó vegyületet képezve csapadékként kiválik vele (ko-precipitáció). A Ca-tartalom emellett a SiO₂-tartalom eltávolítását is segíti (lásd 5. ábra). A kalcium, a magnézium és a vas eltávolíthatóságának pH-függését Na₂CO₃ jelenlétében Aspen Plus-szimuláció segítségével tanulmányoztam (lásd 6. ábra). Ez alapján az optimális pH 10 fölött van.



4. ábra: A modellsóvelekből leválasztott csapadékok röntgen-diffraktogramjai. Az ábrán a modell-sóvelek kiindulási összetételei, valamint a kristályfázisok azonosításához használt referenciák láthatók.



5. ábra: Tömény sóoldat szilícium-dioxid-koncentrációjának csökkenése az idő függvényében csapadékképzés révén, különböző kalciumtartalom mellett.



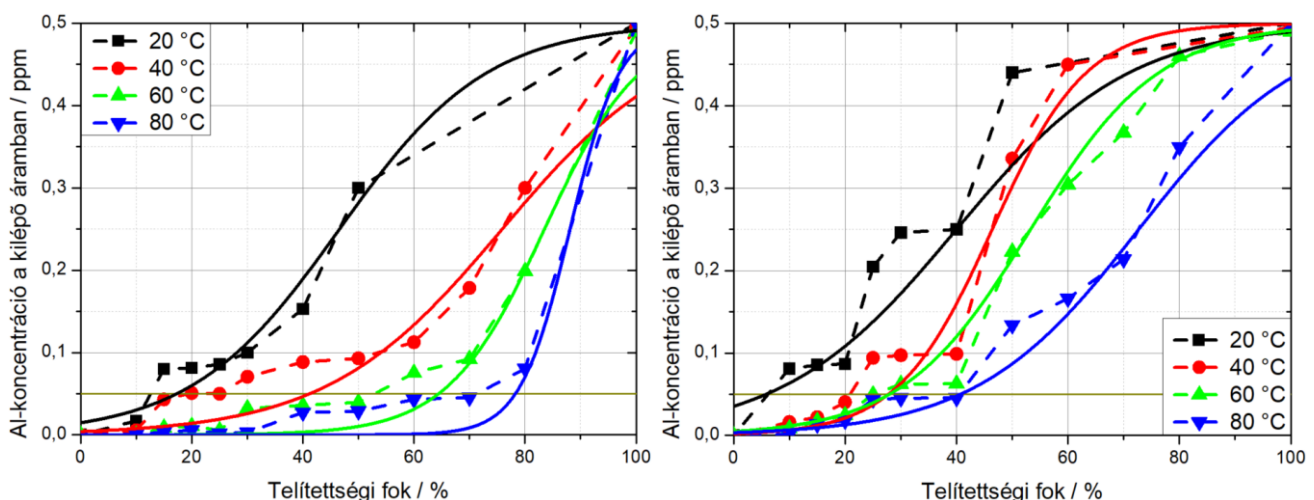
6. ábra: Az egyes fémszennyezők eltávolíthatósága a pH függvényében, Na_2CO_3 jelenlétében Aspen Plus szimuláció alapján.

Kimutattam azt is, hogy a kiindulási sólé, és így az abból képződött csapadék Ca- és Mg-tartalma nem csak a kiválást és ülepedést segíti, hanem a csapadék visszaoldódását is gátolja, mind savas (pH 3), mind lúgos (pH 11) sólében az előzőekben felsorolt, az $\text{Al}(\text{OH})_3$ -nál rosszabbul oldódó csapadékok keletkezése által. Eredményeim igen biztatóak üzemi szempontból is, hiszen ez alapján pusztán a csapadékleválasztás és a szedimentáció során alkalmazott pH-t megváltoztatva elérhetővé válhat már a technológia ezen pontján az Al-tartalom a jelenleginél nagyobb mértékű csökkentése anélkül, hogy egyéb vegyszert kellene adagolni a rendszerhez, újabb idegenanyag bejuttatásával, hiszen a kalcium- és magnéziumionok már eredetileg is jelen vannak a bányasóban. Eredményem szerint tehát éppen a szennyezők segítik egymás kiválását a körülmények helyes megválasztása mellett.

4.3. A sólé tisztítás ioncserés lépésének optimalizálása

A csapadékképzéses eltávolítást követően még oldatban maradó fémionok ioncserés eltávolítását is vizsgáltam. Ehhez több ioncserélő gyantát is karakterizáltunk. Megállapítottam, hogy az alumínium eltávolítására az aminometilfoszfonsav funkciós csoportú ioncserélő gyanták eredményesen alkalmazhatók, esetükben az eltávolítás optimális pH-ja 2,5-3,0, ekkor mérhető a kapacitás maximuma. Ez jelentősen eltér az alkáliföldfémek iminodiacetát funkciós csoportú ioncserélő gyantával történő eltávolítása esetén optimális gyengén lúgos kémhatástól, emiatt az Al-eltávolításra külön ioncserélő oszlop telepítése szükséges, gyantakeverék segítségével az alkáliföldfémionokkal párhuzamos eltávolítás nem valósítható meg.

Több különböző beszállító aminometilfoszfonsav funkciós csoportú ioncserélő gyantáját vizsgálva a hőmérséklet függvényében felvettem az áttörési görbéket, melyek a 7. ábrán szerepelnek. Kimutattuk, hogy akár 50% feletti kapacitáskihasználás is elérhető, még a membráncellás technológia esetén elvárt 0,1 ppm Al-koncentrációlimit tartása mellett is. Az így megnövelhető ciklusidő csökkenti a cellára kerülő sólé Al-tartalmának fluktuációját (mivel az idő kisebb részében van regenerálási fázisban az oszlop), és csökkenti a regeneráláshoz szükséges vegyszerigényt is, mely számottevő költségmegtakarításhoz vezet.

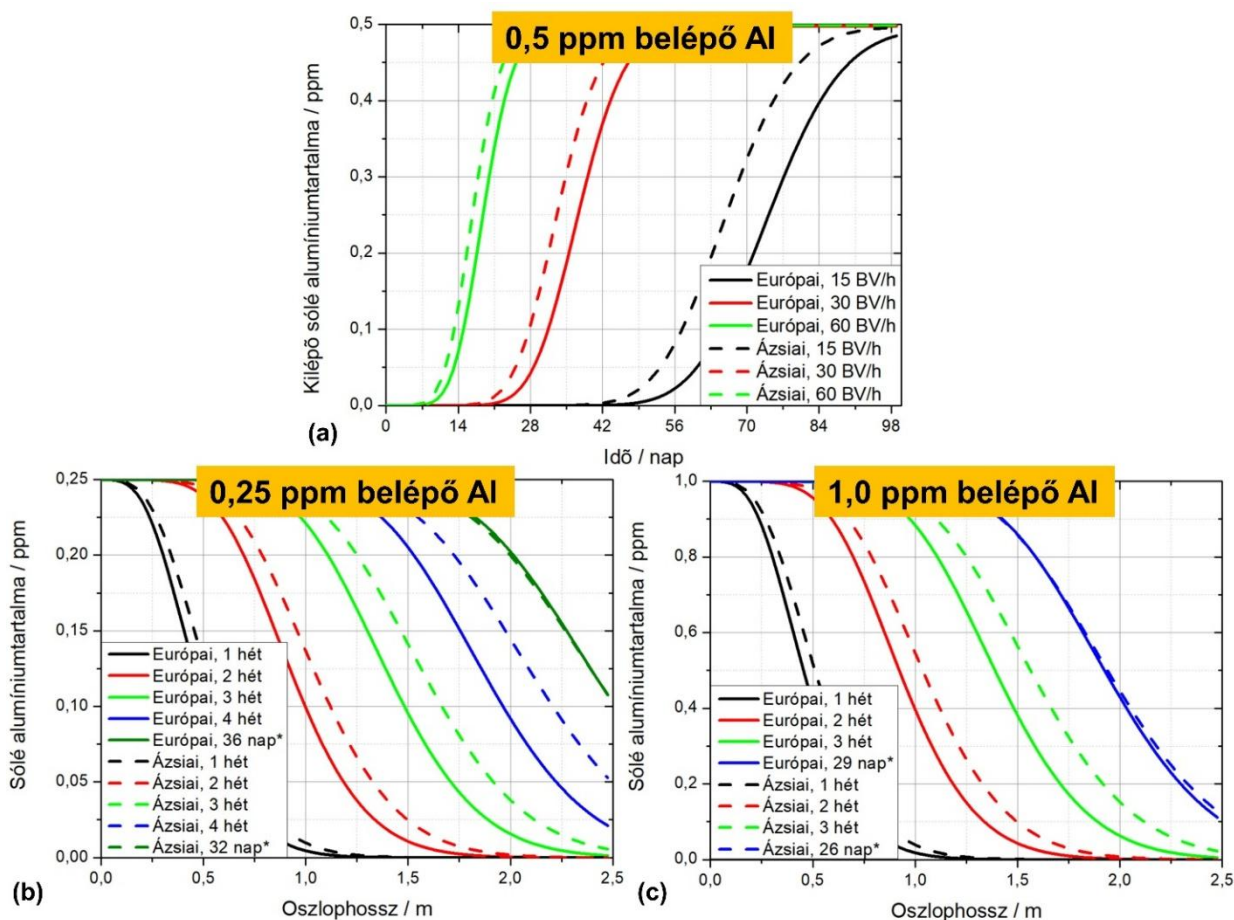


7. ábra: A hőmérséklet és a telítettségi fok hatása az aminometilfoszfonsav funkciós csoportú gyanták Al-megkötő képességére, balra az európai gyártó, jobbra az ázsiai gyártó terméke esetén. A szaggatott vonal csak a szem vezetésére szolgál, míg folytonos vonal a logisztikus függvényillesztést jelöli.

Az Al-megkötésre használt aminometilfoszfonsav funkciós csoportú gyanták regenerálási módjának optimalizálása során kimutattam, hogy a regeneráláskor a korábban használt sósav többnyire elhagyható (10 ciklusonként az egyéb megkötött fémionok eltávolítására célszerű továbbra is beiktatni sósavas mosást), az alumínium pedig a lúgos mosási lépés során távozik. Korábban más szerzők tudomásom szerint hasonló regenerálási módot nem vizsgáltak. Ez további vegyszermegtakarításhoz és költségcsökkentéshez, valamint a regenerálási idő lerövidüléséhez vezet.

Az ioncserés műveletet saját készítésű, a homogén felületi diffúzió modelljén alapuló programunk segítségével részletesen szimuláltam, vizsgálva a belépő sólé összetételének, térfogatáramának, a gyanta mennyiségének, a gyantaágy geometriájának hatását, kiterve az üzemi méretnövelés modellezésére is. A kapott áttörési görbék, izoplánok, izokronok kísérleti eredményeinkkel összhangban vannak. Kimutattam,

hogy még a jelenlegi 30 BV/h (a gyantaágy 30-szoros térfogatának megfelelő sólé átáramlása óránként) sóléáram megkétszerezésekor is képes ellátni az ioncserélő torony a feladatát, ahogy azt is kimutattam, hogy a belépő Al-tartalom megemelkedése az áttörési időpontot csak kevéssé csökkenti (lásd 8. ábra), melynek feltételezésem szerint a nagyobb folyadékoldali koncentráció révén megemelkedő komponensátadási hajtóerő az oka.



8. ábra: A HSD-modell alapján készített szimuláció eredményei üzemi léptékű ioncserére: a belépő sólé térfogatáramának (felül), valamint Al-tartalmának (alul) hatása. Az áttörést *-gal jelöltem.

5. Alkalmazás

Eredményeim az üzemi gyakorlatban közvetlenül alkalmazhatók, azokat minden negyedévben ismertettem a BorsodChem Zrt. megfelelő felsővezetőinek, valamint a 2023-ban megrendezett Technológiai Fórumon is bemutatásra kerültek. A prezentációkat emellett az üzemi szakemberek felé is ismertettem negyedévente, az egyéb rendszeres konzultációk mellett. Már a 2023-as évre vonatkozóan megkaptam a BorsodChem Zrt. vezérigazgatójától a Példamutató Munkáért kitüntetést, mely igazolja az elért eredmények üzemi hasznosságát és fontosságát.

A tömény sóoldatok nyomnyi mennyiségű oldotalumínium-tartalmának meghatározására kifejlesztett spektrofotometriás módszert az azt követő Al-eltávolítási fejlesztési munka, valamint egyéb üzemi kimérések, monitorozás során folyamatosan alkalmaztuk és alkalmazzuk. Emellett tudomásom van róla, hogy publikált módszerünket már más európai klór-alkáli iparban tevékenykedő vállalat laboratóriumában is alkalmazzák.

A sólé tisztítás optimalizációs eredményeinek egy részét a BorsodChem Zrt. Klór Üzeme már alkalmazza. Ilyen például az új, az alkáliföldfémek megkötésétől elkülönített Al-megkötő ioncserélő oszlop telepítése, mely már megtörtént, üzembe helyezték. Az Al-megkötő torony optimális pH-beállításához szükséges rendszer kiépítése folyamatban van. További eredmények gyakorlati megvalósítása még várat magára.

Reményeim szerint eredményeimmel hozzájárulok a klór-alkáli ipar, így a magyar gazdaság fejlődéséhez.

6. Tézispontok

1. Spektrofotometriai mérési módszert fejlesztettem ki tömény sóoldatok nyomnyi, ng/g nagyságrendű mennyiségű alumíniumtartalmának meghatározására. Kísérletekkel kimutattam, hogy a Na^+ és Cl^- ionok okozta interferenciaeffektus tetszőleges sótartalmú, akár tömény NaCl-oldatok esetén is kiküszöbölhető az eriokróm cianin R (ECR) komplexképző reaktánsal történő spektrofotometriai oldotalumínium-tartalom meghatározás során. A mérés érzékenysége a közeg NaCl-tartalmának növekedésével jelentősen nő. (P.I)
2. Kísérletileg kimutattam, hogy az ecetsav-nátrium-acetát pufferrendszerrel pH 5-re pufferelt közegben alkalmazott, ECR komplexképzőt és CTAB kationos tenzidet alkalmazó spektrofotometriás oldotalumínium-mérési módszer érzékenysége tovább növelhető, kimutatási és meghatározási határa pedig csökkenthető, amennyiben az ecetsav-nátrium-acetát puffer (pH 5) helyett a MOPS (3-(N-morfolino)propánszulfonsav) nevű Good-puffert alkalmazva pH 6,5 közegben végezzük el a mérést. (P.II)
3. Kísérletileg bizonyítottam, hogy amennyiben egy, a klór-alkáli iparban is nyersanyagként használt tömény kősóoldatban a különböző fémszennyezők megfelelő mennyiségben vannak jelen, azok egymás csapadékképzéses eltávolítását jelentősen segíthetik, pusztán az optimális pH-beállítás (pH 11, 60 °C hőmérsékleten) hatására. Kalcium (minimum 150 mg/kg) és/vagy magnézium (minimum 5 mg/kg) jelenlétében az oldat felülúszójában mérhető alumíniumtartalom 0,2 mg/kg szintig csökkenthető, emellett a sólé kalciumtartalma a vastartalom és a SiO_2 -tartalom csapadékképzéses eltávolítását is segíti. (P.III)
4. Mérésekkel igazoltam, hogy a tömény ipari sólevek esetében pH 11 mellett 60 °C hőmérsékleten tapasztalt jelentős mértékű alumíniumszedimentációs jelenség hátterében az áll, hogy az oldat alumíniumtartalma a kalcium és/vagy magnéziumtartalommal ko-precipitációs folyamatban közös csapadék, hidrokalcium ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), illetve hidrotalcit ($\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) formájában válik ki. A kezdeti oldat, és így a csapadék kalcium- és magnéziumtartalma emellett a kivált alumíniumtartalom visszaoldódási hajlamát is számottevően csökkenti. (P.III)
5. Kísérleti vizsgálataimmal kimutattam, hogy az aminometilfoszfonsav funkciós csoportú ioncserélő gyanták alkalmasak tömény NaCl-oldatok nyomnyi oldotalumínium-tartalmának eltávolítására, a művelet során 0,01 mg/kg alatti maradék alumíniumtartalom is elérhető. Ezen megkötési reakció és az alkáliföldfémek ellen általánosan használt iminodiacetát funkciós csoportú gyantán történő megkötési reakció jelentősen eltérő optimális pH értéke miatt az alumíniumtartalom megkötésére külön ioncserélő tornyot kell alkalmazni. A klór-alkáli iparban jellemző működési paraméterek mellett két regenerálási lépés közt elérhető többhetes ciklusidő révén elért kis vegyszerigény fenntarthatósági és gazdasági szempontból is előnyös.
6. Kísérletileg igazoltam, hogy a tömény sólevek nyomnyi oldotalumínium-tartalmának eltávolítására alkalmas aminometilfoszfonsav funkciós csoportú ioncserélő gyanták regenerálására minimum 3,5 t% töménységű NaOH-oldat eredményesen alkalmazható, savas regenerálási lépés pedig nem szükséges.

7. Közlemények

7.1. A Ph.D. értekezés alapját képező közlemények

- I. **B. Csorba**, L. Farkas, A. Mihalkó, R. Z. Boros, I. L. Gresits (2023) Photometric Determination of Trace Amounts of Aluminum in Nearly Saturated Rock Salt Solutions Used by Chlor-alkali Industry. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 67(3):442-451. <https://doi.org/10.3311/PPch.22051> (CsB: 100%; IF: 1,4; Q3; I:4; FI:2)
- II. **B. Csorba**, L. Farkas, M. Csécsi, L. T. Mika, I. L. Gresits (2024) Facile Determination of Aluminum Content in Industrial Brine by Investigating the Effects of Buffer Systems. *ChemistryOpen* 13(12):e202400038. <https://doi.org/10.1002/open.202400038> (CsB: 85%; IF: 3,1; Q2; I:0; FI:0)
- III. **B. Csorba**, L. Farkas, M. Csécsi, Z. Hórvölgyi, T. Szabó, J. Madarász, A. Mihalkó, Z. Keresztes, R. Z. Boros, I. L. Gresits (2025) Removal of aluminum content of concentrated salt solutions by precipitation, coagulation and sedimentation. *Chemical Papers* 79:4109-4130. <https://doi.org/10.1007/s11696-025-03942-8> (CsB: 90%; IF: 2,5; Q2; I:0; FI:0)

7.2. Az értekezéshez kapcsolódó szóbeli előadások

- I. **B. Csorba**, A. Mihalkó, L. Farkas, R. Z. Boros, I. L. Gresits (2021) Az elektrolízisipar által használt kősóoldatok nyomnyi mennyiségű alumíniumtartalmának meghatározása fotometriás úton. *Nemzetközi Vegyészkonferencia*, online.
- II. **B. Csorba**, A. Mihalkó, L. Farkas, R. Z. Boros, M. Csécsi, I. L. Gresits (2022) A klór-alkáli ipar által használt elektrolizáló kősóoldatok nyomnyi mennyiségű alumíniumtartalmának meghatározása fotometriás úton. *Szent-Györgyi Albert Konferencia*, Budapest.
- III. **B. Csorba**, A. Mihalkó, L. Farkas, R. Z. Boros, M. Csécsi, I. L. Gresits (2022) A klór-alkáli ipar által használt elektrolizáló kősóoldatok nyomnyi mennyiségű alumíniumtartalmának meghatározása fotometriás úton. *Tavaszi Szél Konferencia*, Pécs.
- IV. **B. Csorba**, A. Mihalkó, L. Farkas, R. Z. Boros, M. Csécsi, I. L. Gresits (2022) Photometric determination of trace amounts of Al in cc. NaCl solutions used by the chlor-alkali industry - Coagulation and sedimentation studies. *Chemical Research in Flanders - Chemistry Conference for Young Scientists (CRF - ChemCYS)*, Blankenberge, Belgium.
- V. **B. Csorba**, J. Madarász, L. Farkas, R. Z. Boros, A. Mihalkó, M. Csécsi, I. L. Gresits (2023) Elektrolízisipari tömény kősóoldatok nyomnyi szennyező fémtartalmának eltávolítása koaguláció, szedimentáció útján. *Műszaki Kémiai Napok*, Veszprém.
- VI. **B. Csorba**, J. Madarász, A. Mihalkó, L. Farkas, R. Z. Boros, M. Csécsi, P. Bazsányi, I. L. Gresits (2023) A klór-alkáli iparban használt tömény kősóoldatok flokkulációval, szedimentációval és ioncseréléssel történő tisztítási lehetőségeinek feltérképezése. *Nemzetközi Vegyészkonferencia*, Marosvásárhely, Románia.
- VII. **B. Csorba**, J. Madarász, L. Farkas, R. Z. Boros, A. Mihalkó, M. Csécsi, I. L. Gresits (2023) Removal of Trace Amounts of Polluting Metals from Concentrated Electrolytic Rock Salt Solutions By Coagulation, Sedimentation and Ion Exchange. *AIChE Annual Meeting*, Orlando, Florida, Amerikai Egyesült Államok.
- VIII. **B. Csorba**, J. Madarász, L. Farkas, R. Z. Boros, A. Mihalkó, M. Csécsi, I. L. Gresits (2024) Sólé tisztítási módszer fejlesztése csapadékképzés és ioncserés eljárás útján (klórgyártás). *Symposium on Polymer(s) Innovation (SPI)*, Miskolc.
- IX. **B. Csorba**, L. Farkas, P. Bazsányi, Z. M. Martinkó, A. Mihalkó, R. Z. Boros, I. L. Gresits (2024) Purification of Concentrated Brines Used in the Chlor-Alkali Industry By Ion

Exchange: Experimental Study and Simulation. *AIChE Annual Meeting*, San Diego, Kalifornia, Amerikai Egyesült Államok.

- X. **B. Csorba**, L. Farkas, M. Csécsi, J. Madarász, R. Z. Boros, A. Mihalkó, I. L. Gresits (2024) Sólé tisztítási módszer fejlesztése csapadékképzés és ioncserés eljárás útján. *Borsodi Vegyipari Nap*, Miskolc.
- XI. **B. Csorba**, P. Tóth, Z. Hórvölgyi, J. Madarász, A. Mihalkó, L. Farkas, R. Z. Boros, I. L. Gresits (2025) Klóralkáli elektrolízishez használt sóoldatok csapadékképzés, flokkulációs, ülepitéses és ioncserés tisztításának optimalizálása. *Műszaki Kémiai Napok*, Veszprém.

7.3. Az értekezéshez kapcsolódó poszter előadás

- I. **B. Csorba**, L. Farkas, M. Csécsi, Z. Hórvölgyi, Z. Keresztes, J. Madarász, A. Mihalkó, T. Szabó, R. Z. Boros, I. L. Gresits (2024) Removal of aluminum content of concentrated salt solutions by precipitation, coagulation and sedimentation. *International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering – SSCHE 2024*, Matlárháza, Szlovákia.

7.4. Az értekezéshez szorosan nem kapcsolódó közlemény

- I. **B. Csorba**, P. Szabó, S. Góger, G. Lendvay (2021) The Role of Zero-Point Vibration and Reactant Attraction in Exothermic Bimolecular Reactions with Submerged Potential Barriers: Theoretical Studies of the $R + HBr \rightarrow RH + Br$ ($R = CH_3, HO$) Systems. *The Journal of Physical Chemistry A* 125(38):8386–8396. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.1c05839> (IF: 2,944; Q2; I:8; FI:4)

7.5. Az értekezéshez szorosan nem kapcsolódó poszter előadás

- I. P. Bozsó, K. Várnagy, **B. Csorba**, P. Szabó, L. Farkas, A. Mihalkó, R. Z. Boros (2022) Valerolakton gyűrűnyitási reakciójának tanulmányozása, és a képződött anyagok felhasználása biobázisú poliuretánok előállításához. *Nemzetközi Vegyészkonferencia*, Nagyvárad, Románia.