

Gipsz kristályosodásának kinetikája, a citromsav inhibíciós hatása és annak felhasználása $\text{Mg}(\text{OH})_2$ és $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ kristályosodásának elválasztásához

PhD értekezés tézisei

Ziegenheim Szilveszter



Témavezetők:

Prof. Dr. Sipos Pál egyetemi tanár

Prof. Dr. Pálinkó István egyetemi tanár

Környezettudományi Doktori Iskola
Természettudományi és Informatikai Kar
Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék
Anyag- és oldatszerkezeti kutatócsoport

Szeged

2021

1. Bevezetés

A különböző szilárd anyagok kristályosodása túltelített oldatokból számos nehézség forrása lehet különböző ipari folyamatok során: a nemkívánatos csapadékok elzárhatnak csöveket, eltömíthetnek membránokat, melléktermékként elszennyezhetik az adott folyamat termékét, vízkőként kiválva csökkenthetik a hőcserélő eljárások hatékonyságát *stb.* A kalcium-szulfát dihidrát ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ avagy gipsz) az egyik leggyakoribb ilyen csapadék, ennél fogva az elmúlt évtizedekben számos kutatás foglalkozott a gipsz kristályosodásának kinetikájával és a reakció kontrolálásának és inhibíciójának lehetőségeivel.

Bár ez a munka egyértelmű ipari célokat szolgál, a jelenség vizsgálata környezeti szempontból is igen jelentős. A sótlanítási eljárásokat világszerte alkalmazzák, hogy az újrahasznosított-, tenger- és szennyvizekből fogyasztható vizet állítsanak elő. Vízkészleteink megőrzése fontos, hogy az emberiség növekvő frissvíz igényét fenntartható módon kielégítsük. A különböző szennyvizek újrafelhasználása segítheti a szárazabb vidékek vízhiányának enyhítését. A leggyakrabban használt (és legolcsóbb) módja a sótlanításnak a fordított ozmózis, azonban a folyamat során keletkező tömény sósvízből kiválhatnak szilárd anyagok, melyek eltömítve a membránt lassíthatják vagy meg is állíthatják a folyamatot, emiatt nagyon fontos ezeknek a reakcióknak a megakadályozása. Továbbá a keletkezett tömény sós vizet is kezelni kell, magas sótartalma miatt. A szilárd anyagok kontrollált, szétválasztott kristályosításával fontos, hasznos anyagokhoz juthatunk, mint például a gipsz (építőipar), magnézium-hidroxid (savas szennyvizek kezelése) vagy a nátrium-klorid. Ezek az eljárások segíthetnek csökkenteni a keletkező hulladék mennyiségét és a frissvíz igényt.

Egy másik, jelentős gond a savas szennyvizek kezelése, ami komoly fenyegetést jelent a környezetre nézve, magas fémtartalma (mérgezők vagy akár karcinogének lehetnek) és alacsony pH-ja miatt, amennyiben nem semlegesítik azokat megfelelően. Ezeket a szennyvizeket hagyományosan nátrium-hidroxiddal vagy mésszel semlegesítik, így a fémionokat hidroxid formájában leválasztják és megemelik a pH-t. A meszes semlegesítés után egy többféle fém-hidroxidot és gipszet tartalmazó iszapot kapnak, melyet szintén tárolni vagy kezelni kell. Ezen túl a visszamaradó folyadék pH-ja gyakran túl magas, és káros lehet a természetes vizekbe visszaengedve. A semlegesítést több lépésben végrehajtva a fém-hidroxidokat külön is leválaszthatjuk (amennyiben lehetséges újra is hasznosíthatjuk) ha első lépésként magnézium-alapú sókkal semlegesítjük az oldatot (MgO , $\text{Mg}(\text{OH})_2$). Második lépésként a magnézium visszanyerhető mészhozzáadásával, a keletkező gipsz pedig

építőipari alapanyagként szintén hasznosítható. Így jóval kevesebb szilárd és folyadék hulladék keletkezik, amit kezelni kell, valamint az eljárás ára is csökken. Munkám során főként az utóbb leírt többlépcsés folyamat optimalizálásával és javításával foglalkoztam.

2. Célok

Munkánk fő célja a magnézium-hidroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) és gipsz kristályosodási reakciójának *in situ* szétválasztása volt, hogy mindkét anyagot a lehető legtisztább formában nyerhessük ki. Az eljárás felhasználható lenne a savas szennyvizek kétféle lépéses semlegesítése során, valamint hasznosnak bizonyulhat sótlanítási eljárás során is. Hogy ezt elérjük, a gipsz kristályosodását és az inhibíciójának lehetőségeit is tanulmányoznunk kellett.

Elsőként szeretnénk volna egy kinetikai modellt felállítani, ami képes a nukleáció és a kristálynövekedés folyamatát egymás mellett megfelelően leírni, széles koncentrációtartományon. Ennek érdekében meg kellett vizsgálnunk a gipsz kristályosodásának kinetikáját, a teljes kísérletileg elérhető koncentrációtartományon, a reakciókörülmények szigorú kontrollja mellett.

Következő lépésként a citromsav hatásait akartuk megvizsgálni, mivel előkísérleteink során a citromsav (citrát) bizonyult a legígéretesebb inhibitornak a korábban említett reakciók szétválasztása során. A tesztreakciók összeállításakor az iparihoz közelítő körülményeket választottunk, melyek a gipsz kiválásának kedveznek, így derítve fel az inhibitor lehetőségeinek határait. A citrát reakciókinetikára és a kiváló szilárd anyagokra gyakorolt hatásait is megvizsgáltuk. Hasonló reakciókat hajtottunk végre háttérekrolit jelenlétében is, hogy felderítsük a citrát alkalmazhatóságának lehetőségeit, tengervizet használó rendszerekben is.

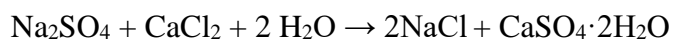
Végül szeretnénk volna a két kristályosodási reakciót *in situ* elválasztani egymástól a $\text{MgSO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ reakcióban, citrát segítségével lassítva a gipsz kiválását. Mivel ipari körülményeket szeretnénk volna szimulálni, kalcium-hidroxid forrásként mésztejet használtunk, melyet természetes forrásból származó mészkőből állítottunk elő. A reakció optimalizálása során a reakciókörülmények hatásait is megvizsgáltuk (adalék koncentráció, reaktáns koncentráció, hőmérséklet), valamint az adalék újrafelhasználhatóságának lehetőségét is tanulmányoztuk, mely gazdasági és környezeti szempontból is fontos paraméter a gyakorlati felhasználás során.

3. Kísérleti rész

3.1. Kísérletek végrehajtása

Gipsz kristályosodásának kinetikája

A gipsz kinetikájának vizsgálatokor a következő reakciót hajtottuk végre:



A reakciók elindításához 50 cm³ térfogatú oldatokat készítettünk melyek ekvivalens mennyiségben tartalmazták a reaktánsokat, majd ezeket összeöntöttük. A reaktánsok kiindulási koncentrációját szisztematikusan változtattuk a 0.04 – 0.20 M tartományban. A kísérleteket 25°C- on termosztálva hajtottuk végre. A jó ismételhetőség érdekében minden kísérletet a lehető leghasonlóbban végeztünk el, ugyanazokat az eszközöket használva (reakcióedény, elektródok, keverőpálca, keverési sebesség).

A reakciókat *in situ* vezetőképesség-méréssel és direkt potenciometriával követtük, Ca-ISE- ot használva az utóbbihoz. Hogy megvizsgáljuk a mérési módszerek megbízhatóságát, ICP-OES méréseket végeztünk az oldatban maradt kalcium mennyiségének pontos meghatározásához adott időpontokban. Miután a reakciók teljesen lejátszódtak, a szilárd anyagokat leszűrtük, a szerkezetüket porröntgen-diffraktometriával (pXRD) a kristályok morfológiáját pedig SEM képek segítségével vizsgáltuk meg.

A vezetőképesség-méréssel gyűjtött adatokat felhasználva javasoltunk egy kinetikai modellt. Az ehhez szükséges számításokat a ChemMech programcsomag segítségével végeztük el.

Citromsav hatásai a gipsz kristályosodási kinetikájára

A citromsav hatásait szintén a Na₂SO₄ és CaCl₂ sztöchiometrikus reakcióját végrehajtva tanulmányoztuk, ugyanazt a felszerelést és mérési módszereket használva, mint a korábbi kísérletek során. A kiindulási reaktáns koncentráció 0,1 M, a kevertetési sebesség pedig 300 rpm volt. Hogy meghatározzuk a pH inhibícióra gyakorolt hatását, a közeg kémhatását NaOH segítségével szisztematikusan változtattuk pH = 3,15 és 10 között. Az adalék koncentrációjának hatásait pH = 6,5 kémhatású közegben – mely optimális az inhibíció szempontjából – vizsgáltuk meg, addig növelve a hozzáadott citrát mennyiségét, míg annak inhibíciós hatása nem növekedett tovább jelentősen.

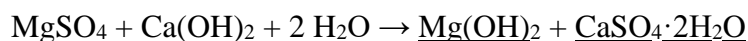
A reakciók lejátszódása után itt is elválasztottuk a csapadékokat a folyadék fázistól, mindkettőt megtartva a további vizsgálatokhoz. A szilárd anyagok szerkezetét pXRD segítségével, morfológiai változásait pedig SEM képek rögzítésével tanulmányoztuk.

Hogy meghatározzuk a citrát elhelyezkedését a reakciók után, a hígított szűrleteket UV spektroszkópiás mérésekkel tanulmányoztuk. Az így kapott eredményeket a szilárd anyagokról készült IR spektrumok segítségével erősítettük meg.

A citromsav (citrát) inhibíciós hatásait háttérelektrolit jelenlétében (1 M NaCl), magasabb ionerősségű rendszerben is tanulmányoztuk. Ehhez az eddig vizsgált reakciót hajtottuk végre háttérelektrolit mellett, adalékmentes közegben valamint 1,5 mM citromsav illetve nátrium citrát jelenlétében. A reakciók lefolyását Ca-ISE segítségével követtük. A reakciók végeztével a szilárd anyagokat az eddigiekhez teljesen hasonló módon vizsgáltuk.

Mg(OH)₂ és CaSO₄·2H₂O kristályosodási reakciójának in situ elválasztása

A Mg(OH)₂ és a CaSO₄·2H₂O kristályosodásának *in situ* elválasztásához - az utóbbi citráttal való inhibíciójának segítségével - a következő reakciót hajtottuk végre:



Ca(OH)₂ forrásként mésztejet használtunk, melyet természetes forrásból származó mészkőből állítottunk elő. A teljes reakciótérfogat mindig 1 L volt. A MgSO₄-ot és az adalékot desztillált vízben feloldottuk, és a reakciót a mésztej hozzáadásával indítottuk el. A kevertetést egy csavart propeller fejű PTFE száras keverővel végeztük 700 rpm sebességgel. A reakciókat *in situ* vezetőképesség-méréssel követtük, miközben a reakcióelegy hőmérsékletét és pH-ját is megfigyeltük. Az eredményeket ICP-OES mérések segítségével erősítettük meg. A folyamat optimalálása során a hőmérséklet, a kiindulási reaktáns koncentráció és az additív koncentráció megváltoztatásának a reakció kinetikájára gyakorolt hatásait vizsgáltuk.

Ahhoz, hogy a kiváló szilárd anyagokat megvizsgálhassuk, el kellett őket választanunk a folyadék fázistól és egymástól is. A folyamat termékeként négyféle mintát kaptunk a további vizsgálatokhoz: Mg(OH)₂, CaSO₄·2H₂O, a mosófolyadék illetve a második szűrlet.

A szétválasztott szilárd minták összetételét pXRD-vel határoztuk meg. A kristályok morfológiájának megfigyeléséhez SEM képeket készítettünk. A mosott és mosatlan Mg(OH)₂ mintákról készült SEM-EDX mérések eredményei és a felvett elemtérkép lehetővé tették, hogy tanulmányozzuk a kicsapódó szilárd anyagok eloszlását a mintáinkban.

A citrát-ionok reakció utáni elhelyezkedésének meghatározásához a korábban szétválasztott folyadék- és eluensben feloldott szilárd mintákat HPLC mérésnek vetettük alá.

A mérési eredmények igazolásához a szilárd minták (adalék nélküli, illetve adalék jelenlétében leválasztva) IR spektrumait is felvettük.

3.2. Mérőműszerek és mérési módszerek

A kristályosítási reakciókat egy Jenway 027013 vezetőképesség-mérő elektróddal követtük, melyet egy Jenway 3540 pH és vezetőképességmérőhöz csatlakoztattunk. Az elektród beépített szenzorját is felhasználtuk a hőmérséklet követésére.

Az oldatok pH-ját egy Sentix 62 pH segítségével mértük, 5 pontos kalibrációt alkalmazva a következő értékeken: pH 2; 4; 7; 10; 11,5.

A potenciometriás méréseket egy Metrohm 794 Basic Titrino segítségével végeztük, egy Metrohm kombinált polimermembrános Ca-ionszelektív elektród felhasználásával.

Az ICP-OES mérése végrehajtásához adott időpontokban mintát vettünk a reakcióelegyből, egy fecskendő segítségével. A mintákat gyorsan (körülbelül 5-10 másodperc) átszűrtük egy 0,45 μm pórusátmérőjű fecskendőszűrőn. Az így kapott szűrletet 2m/m%- os salétromsavban százszorosára hígítottuk. A mérések egy Thermo Scientific iCAP 7400 ICP-OES DUO spektrométerrel hajtottuk végre.

A röntgen-diffraktometriás mérések elvégzéséhez egy Rigaku MiniFlex II type Röntgen diffraktométert használtunk. A szilárd minták diffraktogramjait a $2\theta = 4^\circ - 60^\circ$ tartományon, $2^\circ/\text{perc}$ sebességgel, $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) sugárzást használva vettük fel.

A kristályok morfológiáját pásztázó elektron-mikroszkópiával vizsgáltuk, egy Hitachi S-4700 pásztázó elektron mikroszkópot használva. A gép tartalmazott egy beépített Röntec QX2 spektrométert, ami lehetővé tette az elemterképek készítését.

A folyadék minták UV-Vis spektrumát egy Analytic Jena Specord 210 plus spektrofotométerrel vettük fel.

A szilárd minták IR spektrumát kétféle technikával rögzítettük. A korábban bemutatott spektrumokat egy BIO-RAD 18 Digilab Division FTS-65 A/896 FT-IR spektrofotométerrel vettük fel, DRS technikával, háttérként KBr-ot használtunk. A későbbiekben látható mérések egy JASCO FT/IR-4700 spektrofotométerrel készültek, ATR technikával. A méréseket mindkét esetben 4 cm^{-1} felbontással, a $4000-650 \text{ cm}^{-1}$ hullámszám-tartományon végeztük 256 interferogrammot felhasználva egy spektrumhoz.

A szilárd- és folyadékminták HPLC méréseit egy Agilent 1100 HPLC segítségével, egy Grom-Resin ZH típusú kolonnán végeztük. Eluensként 0,01 M koncentrációjú kénsavat használtunk.

4. Új tudományos eredmények

T1. Kialakítottunk egy részletes kinetikai modellt, mely képes leírni a gipsz vizes oldatokból való kristályosodásának kinetikáját a teljes, kísérletileg elérhető koncentrációtartományon. A modell képes a nukleáció és a kristálynövekedés folyamatait párhuzamosan figyelembe venni.

A $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCl}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaCl} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ reakció kinetikáját vizsgáltuk különböző módszerekkel (vezetőképesség-mérés, Ca-ISE), a 0,04 – 0,20 M kiindulási koncentrációtartományon. A reaktánsokat sztöchiometrikus mennyiségben adagoltuk az egyes reakciókban. A koncentrációtartomány határait úgy választottuk, hogy a reakciók teljesen lejátszódjanak belátható időn belül (alsó határ), valamint kontrollálni tudjuk a rendszer homogenitását és az indukciós periódust.

T2. Elsőként bizonyítottuk, hogy a $\text{CaSO}_{4(\text{aq})}$ oldott ionpár képződését figyelembe kell venni a reakció kinetikájának pontos leírásához, valamint hogy a falhatás befolyása elhanyagolható az általunk alkalmazott körülmények között.

A 0,06 M kiindulási koncentrációjú reakciót három különböző reakcióedényben végrehajtva nagyon hasonló eredményeket kaptunk, ami arra utal, hogy a falhatás nem befolyásolja jelentősen a reakció kinetikáját. A mért vezetőképességi értékek ugyan lineáris összefüggést mutattak az ionkoncentrációval, a zérustól eltérő tengelymetszetet a semleges ionpár képződésével magyarázhatjuk. A kinetikai modellben minden esetben figyelembe kellett venni a $\text{CaSO}_{4(\text{aq})}$ semleges ionpár képződését, valamint számolni kellett az ionos komponensek moláris vezetőképességének ionerősség-függésével is.

T3. Bebizonyítottuk, hogy jól meghatározott körülmények között a Ca-ISE megfelelő lehet a $[\text{Ca}^{2+}]$ pontos mérésére gipsz kristályosodási reakciójában. A Ca-ISE-ot mi alkalmaztuk először az ionkoncentráció változásának közvetlen mérésére ebben a kristályosodási reakcióban.

Eredményeink azt mutatták, hogy a vezetőképesség-mérés alkalmas a gipsz kristályosodási kinetikájának tanulmányozására gyors reakciókban, viszonylag magas reaktáns-koncentráció mellett is. A vezetőképességmérő elektród válaszüzeje nagyon rövid, azonban nem alkalmazható magas koncentrációjú háttérelektrolit jelenlétében. Hogy elkerüljük a problémát, a Ca-ISE-ot lassú reakciókban, háttérelektrolit jelenlétében

próbáltuk meg alkalmazni. Bár a Ca-ISE válaszideje jóval hosszabb a vezetőképességméréshez képest, a stabil Ca-ISE potenciál méréséhez konstans, magas háttélelektrolit koncentráció szükséges. Mindkét mérési módszer alkalmazhatósági tartományát, megbízhatóságát ICP-OES mérésekkel igazoltuk.

T4. Leírtuk a citromsav (citrát) inhibíciójának hatásait gipsz kristályosodására magas túltelítettségű oldatokból, különböző pH értékeken, valamint megállapítottuk az inhibíció maximális hatásfokához szükséges optimális körülményeket.

A citromsav inhibíciójának hatásait Na_2SO_4 és CaCl_2 sztöchiometrikus reakciójában, 0,1 M kiindulási reaktáns koncentráció mellett. Az eredmények azt mutatják, hogy pH 4 alatt az inhibíciós effektus drasztikusan csökken a citromsav karboxilát-csoportjainak protonálódása miatt. Az adalék koncentrációjának hatásait pH 6.5 kémhatású rendszerekben vizsgálva azt találtuk, hogy az inhibíció hatásfoka telítésbe hajlik a citrát koncentrációjának növelésével. 3 mM adalék-koncentráció felett a kristályosodási reakció nem lassul jelentősen további citrát hozzáadásával. A kristályok morfológiájára szintén hatással van az inhibíció hatásfoka, míg citromsav jelenlétében döntően pálcika alakúak maradnak a kristályok (akárcsak az inhibitor-mentes közegben), citrát jelenlétében lapka alakú kristályok keletkeznek.

T5. Összehasonlítottuk citrát inhibíciójának gipsz kristályosodására gyakorolt hatásait háttélelektrolit nélküli rendszerekben, és tengervíz modellező, magas ionerőségű rendszerekben. Megállapítottuk, hogy a NaCl megnövelte a citrát inhibíciós hatását, de a kristályok morfológiájában bekövetkező változások kisebbek voltak, mint a háttélelektrolit nélküli rendszerekben. Ez arra utal, hogy a klorid-ionok megváltoztatják az inhibíció mechanizmusát.

Na_2SO_4 és CaCl_2 sztöchiometrikus reakcióját, 0,1 M kiindulási koncentrációval 1 M hozzáadott NaCl háttélelektrolit jelenlétében is végrehajtottuk. A magasabb ionerőségű rendszerben a gipsz oldhatósága megnőtt, ezáltal a reakció sebessége csökkent, így adott mennyiségű citromsav, illetve citrát is sokkal eredményesebben lassította a kristályosodást. A szilárd anyagokban bekövetkező változások hasonló tendenciákat mutattak, mint alacsony ionerőségű rendszerekben, de a különbségek az additívmentes és a citromsav jelenlétében végrehajtott reakciók között jóval kisebbek voltak. Citrát-ionok jelenlétében a magas ionerőségű rendszerekben is találhattunk lapka és rombusz alakú kristályokat, de azok fő tömegben rövid, összenyomott pálcikákat formáztak.

T6. Optimaltunk a reakciókörülményeket $\text{Mg}(\text{OH})_2$ és $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ kristályosodási reakcióinak *in situ* elválasztásához, citrát ionokkal lassítva az utóbbi kiválását.

A $\text{MgSO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ reakció során a két csapadék kiválását időben eltoltuk egymástól a gipsz kicsapódását citrát ionokkal lassítva. Az optimális paraméterek a mi esetünkben 20°C , 0,1 M kiindulási reaktáns koncentráció, 1.5 mM citromsav adalékanyag és a szűrt $\text{Mg}(\text{OH})_2$ mosása desztillált vízzel, a szűrt minta térfogatának négyszeresével. Pontos tervezéssel ezek a paraméterek változtathatók, így az egyes folyamatoknak és igényeknek megfelelően alakíthatók és alkalmazhatók lehetnek az adott specifikus eljárások során.

T7. Meghatároztuk a citrát-ionok helyzetét a mindkét kristályosodási reakció teljes lejátszódása után, mely a $\text{Mg}(\text{OH})_2$ és a végső szűrlet között oszlik meg. Ezen eredmények alapján az adalék újra felhasználható a gyakorlati alkalmazások során.

A folyadék- valamint az újraoldott szilárd minták HPLC mérésének eredményei alapján a citrát ionok részben a $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -hoz kötődve találhatóak a reakciók lejátszódása után. Az adalék a $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -hoz valószínűleg annak felületén kötődik meg, szükség esetén Ca^{2+} ionokat is megkötve a citrát-ionok töltésének kompenzációja végett. Az adalék többi része az oldatfázisban marad, így akadályozza a gipsz kristályosodását. A citrát-ionok jelenlétében és távollétében leválasztott szilárd minták IR spektrumai is megerősítik ezeket a feltevéseket.

5. Lehetséges gyakorlati alkalmazások és környezetvédelmi jelentőség

A $\text{Mg}(\text{OH})_2$ és $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ kristályosodásának elválasztását, az utóbbi kiválását citrát ionokkal lassítva felhasználhatják a savas szennyvizek két lépésben történő semlegesítése során. Mivel a reakcióparaméterek hangolhatóak, több hasonló folyamatban is hasznosítható a módszer. A módszer növelheti az eljárások gazdaságosságát, valamint csökkentheti a környezeti terhelésüket is. A nehézfémek szeparált leválasztásával csökkenthetjük a keletkező szilárd hulladék mennyiségét. Az eljárás második lépésében leváló szilárd anyagok tiszta formában szintén hasznos alapanyagok, a $\text{Mg}(\text{OH})_2$ újra felhasználható a semlegesítés első lépésében, míg a gipsz hasznos építőipari alapanyag. A citrát biológiailag

lebomló adalék, emiatt egy sokkal jobb alternatíva a gipsz kristályosodásának akadályozására, mint a gyakran használt, nem lebomló poliakrilát. A kapott eredményeink alapján a citrát egy részét akár újra is lehet használni ezekben a rendszerekben, tovább javítva az eljárás környezetbarát voltát.

A magas ionerősségű rendszerekben tapasztalt eredményes inhibíció azt mutatja, hogy a citrát alkalmas lehet gipsz kristályosodásának megakadályozására tengervíz felhasználó eljárások során.

6. Publikációk

6.1. Az értekezés témájához szorosan kapcsolódó teljes közlemények

[1] **Ziegenheim, Sz.;** Peintler, G.; Palinko, I.; Sipos, P.:

The kinetics of the precipitation of gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, over a wide range of reactant concentrations

Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis 131 75-88. (2020)

Hatástényező: 1,520₍₂₀₁₉₎

[2] **Ziegenheim, Sz.;** Szabados, M.; Kónya, Z.; Kukovecz, Á.; Palinko, I.; Sipos, P.:

Differential precipitation of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ from $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ using citrate as inhibitor – a promising concept for reagent recovery from MgSO_4 waste streams

Molecules 25 5012. (2020)

Hatástényező: 3,267₍₂₀₁₉₎

[3] **Ziegenheim, Sz.;** Szabados, M.; Kónya, Z.; Kukovecz, Á.; Pálinkó, I.; Sipos, P.:

Manipulating the crystallization kinetics and morphology of gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ via addition of citrate at high levels of supersaturation and the effect of high salinity

Polyhedron 204 115253. (2021)

Hatástényező: 2,343₍₂₀₁₉₎

[4] **Ziegenheim, Sz.;** Slam, Sz.; Szabados, M.; Sipos, P.; Palinko, I.:
Effect of Na-citrate on the precipitation of gypsum from highly supersaturated solutions
Melnik M.; Segl'a P.; Tatarko M. (editor): Progressive Trends in Coordination, Bioinorganic and Applied Inorganic Chemistry ISBN: 978-80-8208-014-1
Bratislava, Slovakia: Slovak Chemical Society (2019) 104-110.

6.2. További, referált folyóiratban megjelent teljes közlemények

[1] **Ziegenheim, Sz.;** Varga, G.; Szabados, M ; Sipos, P ; Palinko, I
Cu(II)Cr(III)-LDH: synthesis, characterization, intercalation properties and a catalytic application
Chemical papers/Chemické Zvesti 72 897-902. (2018)
Hatástényező: 1,246

[2] Varga, G.; **Ziegenheim, Sz.;** Muráth, Sz.; Csendes, Z.; Kukovecz, Á.; Kónya, Z.; Carlson, S.; Korecz, L.; Varga, E.; Pusztai, P.; Sipos, P.; Palinko, I.:
Cu(II)-amino acid–CaAl-layered double hydroxide complexes, recyclable, efficient catalysts in various oxidative transformations
Journal of molecular catalysis A: Chemical 423 49-60. (2016)
Hatástényező: 4,211

6.3. További, konferenciakiadványban megjelent teljes közlemények

[1] **Ziegenheim, Sz.;** Varga, G.; Sipos, P ; Palinko, I.:
Ni-aminosav komplexek interkalálása Ca₂Al-LDH rétegei közé
XXXVIII. KÉMIAI ELŐADÓI NAPOK : Program és előadás-összefoglalók
Szeged, Magyarország: Magyar Kémikusok Egyesülete (MKE) 59-63. (2015)

[2] **Ziegenheim, Sz.;** Sztégura, A.; Palinko, I.; Sipos, P.:
Kelátképzők inhibíciós hatása gipsz kristályosodására
XLII. KÉMIAI ELŐADÓI NAPOK - Előadásösszefoglalók
Szeged, Magyarország: Magyar Kémikusok Egyesülete Csongrád Megyei Csoportja 154-160. (2019)

Teljes közlemények

Értekezéshez szorosan kapcsolódó: 4

Összesen: 8

Összesített hatástényező

Értekezéshez szorosan kapcsolódó: 7,130

Összesen: 12,587