

A reakció és az anyagtranszport relatív sebességének hatása csapadékképző reakciók termékeinek mikro- és makroszerkezetére

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Papp-Balog Edina

Témavezető: Dr. Schuszter Gábor, *egyetemi adjunktus*

Kémia Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék

2024

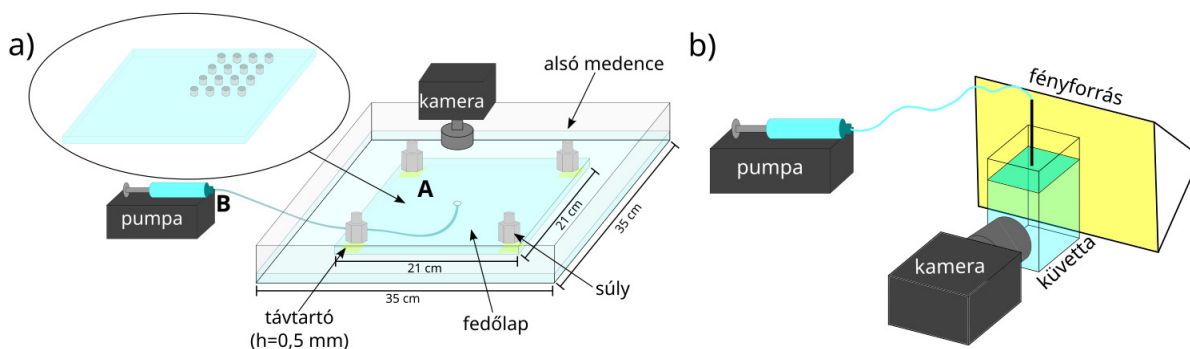
1. Bevezetés és az értekezés célkitűzései

A különféle csapadékképződéssel járó reakciók számos helyen jelen vannak környezetünkben, például a természetben előforduló kőzetek kialakulásában, vagy ipari alkalmazásokban (pl. szennyvizek és gázok tisztítása, pigmentek előállítása). Továbbá, ezen reakciók a kutatás területén is fontos szerepet töltenek be, hiszen lehetőséget nyújtanak különféle ionok kimutatására, amely minőségi és mennyiségi analízisre egyaránt alkalmazható. Ezen kívül a csapadékképző reakciók alkalmazásával további felhasználásra szánt termékek is előállíthatók (pl. gyógyszeriparilag releváns polimorfok, katalízis szempontjából előnyös szerkezetek), ehhez azonban fontos a megfelelő szintézismódszerek kidolgozása. Hagyományosan a szilárd termékek előállítását jól kevert rendszerben valósítják meg, azonban az irodalomban számos példát mutattak már be egyensúlytól távoli rendszerekben történő csapadékképződésre is. Utóbbi módszerek előnye a jól kevert szintézisekkel szemben, hogy a reakciók során kialakuló különféle térbeli gradiensek külső szabályozásával könnyen hangolható a keletkező termék mikro- és makroszerkezete, illetve a képződő kristályok mérete. Éppen ezért ezen transzportfolyamatokkal (pl. áramlással vagy diffúzióval) kapcsolt rendszerek alkalmasak lehetnek olyan termékek előállítására is, melyre jól kevert rendszerben nem lenne lehetőség (pl. termodinamikailag kevésbé stabil polimorfok). Ezen szintézismódszerek alkalmazására egy jó példa lehet az irodalomban manapság nagy érdeklődést keltő zeolit-típusú imidazolát vázszerkezetek (ZIF-ek) előállítása. A cink(ZIF-8)-, valamint a kobalt(ZIF-67)-ionok 2-metil-imidazollal (2-MeIm) való reakciója a körülményektől függően különféle polimorfok kialakulásához vezethet. A szodalit-típusú polimorfok jellemzője, hogy pórusos szerkezettel, ebből adódóan pedig rendkívül nagy fajlagos felülettel rendelkeznek, azonban termodinamikailag kevésbé kedvezményezett a kialakulásuk más polimorfokkal szemben. Éppen ezért fontos lehet egy optimalizált szintézismódszer kidolgozása, amely lehetővé teszi ezen polimorfok képződését, ezáltal a termék széleskörű alkalmazását (pl. gázok adszorpciója, heterogén katalízis).

Ebből adódóan, doktori munkám során célul tűztük ki a ZIF kristályok áramlásvezérelt rendszerben és vékony folyadékrétegben történő szintézisének kidolgozását. Ehhez azonban elsőként annak megismerése volt szükséges, hogy a csapadékmintázatok mikro- és makroszerkezete hogyan befolyásolható a kísérleti paraméterek változtatásával. Ennélfogva különböző kémiai rendszereken tanulmányoztuk a csapadékok mikro- és makroszerkezete közötti összefüggéseket, valamint a reakciók sebességének és az ionok kombinálásának hatását a kialakuló mintázatokra. Ezenkívül, annak érdekében, hogy a kívánt tulajdonságú ZIF kristályokat elő tudjuk állítani, nélkülözhetetlen volt megismerni a göcök képződésére és növekedésére vonatkozó kinetikai jellemzőket is. Mindezek ismeretében, a csapadékképző reakciók és az áramlás tipikus időskáláinak összehangolásával már lehetőségünk nyílt a ZIF kristályok különböző polimorfjainak áramlásvezérelt szintézisére.

2. Kísérleti rész

Doktori munkám során elsőként a kísérleti paraméterek (pl. reaktánsok koncentrációja, áramlási sebesség stb.) hatásának vizsgálatát végeztük el az áramlásvezérelt rendszerben és vékony folyadékrétegben kialakuló csapadékmintázatok szerkezetére. A kristályok mikroszerkezete és a makroszkopikusan látható mintázatok közötti összefüggéseket különböző, fémionként kalcium(II)-ot tartalmazó csapadékok esetén, míg a reakció sebességének hatását eltérő alkáliföldfém- és átmenetifém-oxalát mintázatok előállításával tanulmányoztuk. Végül az ily módon megszerzett tapasztalataink alapján különféle fémionok kombinálásával igyekeztünk módosítani a kialakuló alkáliföldfém-karbonát csapadékmintázatok makroszerkezetét. Az áramlásvezérelt kísérleteket az 1a ábrán látható, vízszintes elrendezésű Hele-Shaw cellában hajtottuk végre. A kísérleti berendezés felépítését tekintve egy tartóállványra helyezett nagyobb alsó medencéből (35 cm × 35 cm), valamint egy kisebb fedőlappból (21 cm × 21 cm) áll, melyek plexiből készültek. A két plexilap közötti állandó rétegvastagságot (~0,5 mm) négy távtartó lemez, valamint négy súly segítségével biztosítottuk, melyet a fedőlap négy sarkához helyeztünk el. A kísérletek során a plexilapok közötti teret először az egyik reaktáns vizes oldatával töltöttük meg (A). Ugyanezen oldatot öntöttük a fedőlap körüli térbe (~4 mm vastag folyadékréteget formálva), amely a plexilapok közti oldattal érintkezve biztosította annak homogén kiáramlását. Ezt követően az alsó edény közepén lévő ~1 mm átmérőjű beömlőnyíláson keresztül történt a másik reaktáns vizes oldatának (B) beinjektálása fecskendőpumpa alkalmazásával különböző térfogatáramlási sebességek (Q) esetén. A beáramoltatott térfogat (V) minden esetben 5 ml volt. Az ily módon előállított makroszkopikus csapadékmintázatok felülről egy fekete-fehér digitális kamera segítségével rögzítettük. A csapadékszerkezeteket felépítő kristályok mikroszerkezetét ideális esetben *in situ* optikai mikroszkóppal vizsgáltuk, viszont abban az esetben, ha nagyon apró kristályok keletkeztek, csak a reakciótérből történő mintavétel után volt elvégezhető a mikroanalízis (pl. pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) és energiadiszperzív röntgenspektroszkópia (EDX)). Ennek érdekében egy olyan fedőlapot is készítettünk, melyen apró, szisztematikusan pozicionált és légmentesen zárható nyílásokat hoztunk létre (1a ábra bal felső része), mely lehetővé tette a precíziós mintavételt és a mikroszerkezet lokalizált vizsgálatát.



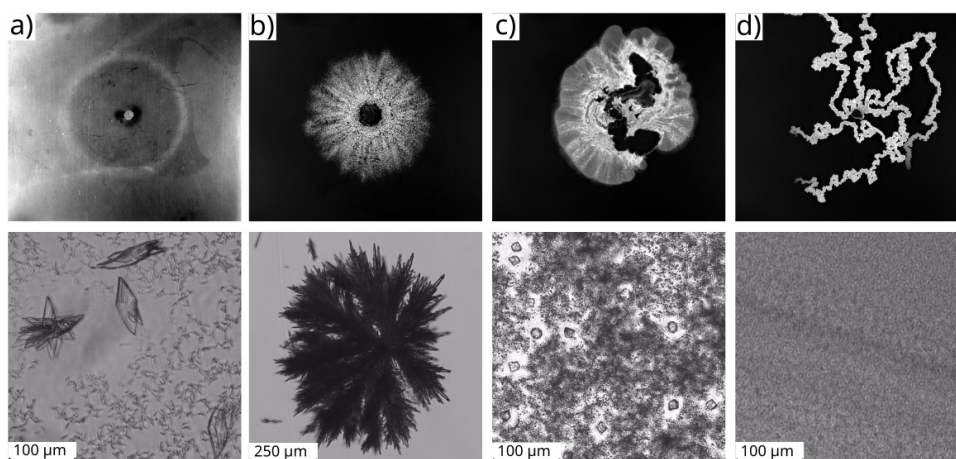
1. ábra. a) Az áramlásvezérelt és a b) gyorskamerás kísérletek során alkalmazott berendezések sematikus felépítése.

Ahhoz, hogy a ZIF kristályok áramlásvezérelt szintézise is megvalósítható legyen, először a kristálygócok képződésére és növekedésére vonatkozó kinetikai jellemzőket térképeztük fel. A gócképződés folyamatát gyorskamerás módszerrel, míg a gócnövekedést UV-vis spektrofotométerrel tanulmányoztuk. Utóbbi esetben a reaktánsokat egy küvettába töltöttük, majd folyamatos kevertetés közben rögzítettük a turbiditás időbeli változását. Az ily módon jól kevert rendszerben előállított termékek mikroszerkezetét különböző módszerekkel vizsgáltuk (SEM, röntgendiffrakció (XRD), Raman és Fourier-transzformációs infravörös (FTIR) spektroszkópia, N₂ adszorpció (BET)). A gyorskamerás módszer esetén az egyik reaktáns vizes oldatát töltöttük egy küvettába, majd ebbe történt felülről a másik reaktáns oldatának beinjektálása fecskendő-pumpa segítségével. A reaktáns oldatok keveredését, valamint a kolloidális csapadékszemcsék képződését gyorskamera segítségével rögzítettük (1b ábra). Ezen felvételek alapján a reakció sebességét az indukciós idő segítségével jellemeztük.

3. Új tudományos eredmények

I. A vékony folyadékrétegben áramlásvezérelt körülmények között lejátszódó csapadékreakciók esetén csapadékcsöves mintázat jön létre egy, a viszkózus ujjasodással analóg jelenség hatására, amennyiben a göcképződés dominál a göcnövekedéssel szemben [4].

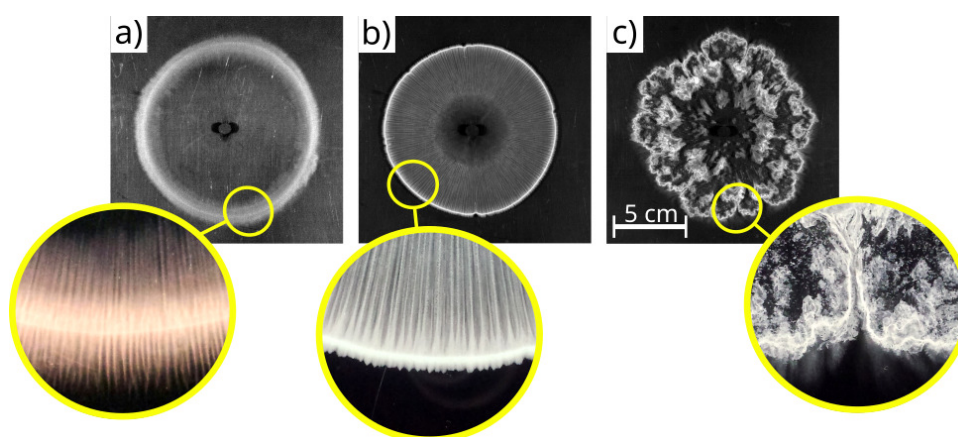
A kristályok mikroszerkezetének a kialakuló mintázatokra gyakorolt hatását kalcium-foszfát, -szulfát, -karbonát és -szilikát csapadékok esetében tanulmányoztuk, melyeket az anionok oldatának kalcium-klorid oldatba történő injektálásával állítottunk elő. Megfigyeltük, hogy a reaktánsok kémiai természetétől függően lényegesen eltérő csapadékszerkezetek alakultak ki adott kísérleti paraméterek esetén. Míg a kalcium-foszfát és -szulfát mintázatokra a körszimmetria jellemző (2a és b ábra, felső panel), addig a kalcium-karbonát és -szilikát esetében membránszerű struktúrák kialakulását tapasztaltuk (2c és d ábra, felső panel). A közöttük lévő különbség a mintázatokat felépítő kristályok mikroszerkezetével magyarázható. Megállapítottuk, hogy a kalcium-foszfát és -szulfát csapadékmintázatokat kevesebb, de nagyobb kristályok építik fel, melyek ezáltal hamarabb kiülepednek az áramlás közben (2a és b ábra, alsó panel). Ebből adódóan a mintázatok jellegét a reakciótér permeabilitásának csökkenése szabja meg. Ezzel ellentétben a kalcium-karbonát és -szilikát rendszerek esetén nagyon sok apró csapadékszemcse keletkezik a reaktáns oldatok érintkezését követően (2c és d ábra, alsó panel). Ezen kristályok között van der Waals jellegű kölcsönhatás léphet fel, így azok egy kolloid gél régió kialakulását eredményezik a reaktáns oldatok közti határfelületen, amely a viszkozitás megnövekedését idézi elő a reakciótérben. Az így kialakuló viszkozitásgradiens miatt egy, a viszkózus ujjasodással analóg jelenség okozza a csapadékmembrános struktúrák kialakulását. Tehát abban az esetben, ha a vékony folyadékrétegben lejátszódó csapadékképződési reakcióban a göcképződés dominál, nagyobb lesz a kölcsönhatás a kémiai reakció és a hidrodinamika között.



2. ábra. Felső panel: A kísérletek során előállított makroszkopikus a) kalcium-foszfát, b) -szulfát, c) -karbonát és d) -szilikát csapadékmintázatok; $c_{CaCl_2} = 2 \text{ M}$, $c_{anionok} = 1 \text{ M}$, $V = 5 \text{ ml}$. Alsó panel: Csapadékszemcsék *in situ* optikai mikroszkópos felvételei rögtön az áramoltatás befejezésekor; $c_{CaCl_2} = 1 \text{ M}$, $c_{anionok} = 0,5 \text{ M}$, $V = 3 \text{ ml}$. $Q = 1 \text{ ml/perc}$.

II. A vékony folyadékrétegben áramlásvezérelt körülmények között lejátszódó csapadékreakciók esetén a reakció és a hidrodinamikai áramlás tipikus időskáláinak aránya szabja meg a kialakuló mintázatot: viszonylag lassú reakció körszimmetriájú, míg viszonylag gyors reakció összetett csapadékmintázat kialakulásához vezet [3].

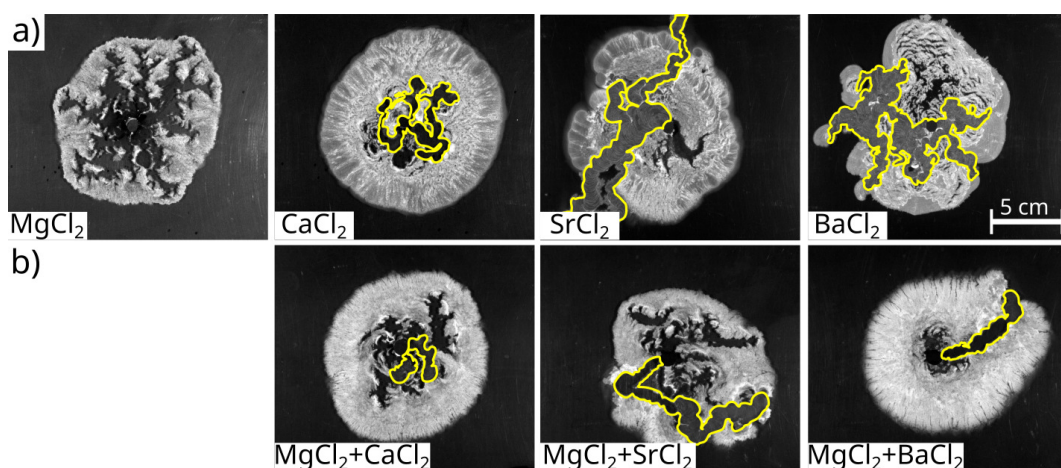
A reakció sebességének hatását a makroszkopikusan kialakuló mintázatokra különböző alkáliföldfém (Mg(II), Ca(II), Sr(II), Ba(II))- és átmenetifém (Co(II), Ni(II), Cu(II), Zn(II))-oxalát csapadékok esetében vizsgáltuk, hiszen ezen rendszerek kinetikájára vonatkozóan már rendelkezésünkre álltak irodalmi adatok. A kísérletek során oxalát-ionok vizes oldatát áramoltattuk a plexilapok közé töltött fémionok oldatába, továbbá a 3b ábrán látható réz(II)-oxalát mintázat esetében fordított áramoltatást alkalmaztunk. Megfigyeltük, hogy a reakciók eltérő sebességéből adódóan lényegesen különböző csapadékszerkezetek alakultak ki azonos kísérleti paraméterek mellett. Abban az esetben, ha a reakció lassú az áramlás időskálájához viszonyítva, viszonylag sokára jelenik meg csapadék a reaktáns oldatok érintkezését követően. Ekkor a mintázatok gyűrűs szerkezetet mutatnak és azok jellemzőit csak az oldatok közötti sűrűségkülönbség okozta hidrodinamikai instabilitás határozza meg (3a ábra közeli felvételei, csapadéksávok megjelenése a mintázat periferiáján). Ezzel ellentétben, ha a csapadékképződési reakció és az áramlás tipikus időskálái összemérhetőek, a csapadék szinte azonnal leválik a reaktáns oldatok érintkezését követően. Ennek következtében radiális szimmetriával rendelkező mintázatok jönnek létre, melyek tartalmazzák az áramlási mező jellemzőit is (3b ábra közeli felvételei, csapadéksávok jelenléte a mintázat egész területén). Végül abban az esetben, ha a reakció lényegesen gyorsabb mint az áramlás, nagy mennyiségű csapadék keletkezik, melyből adódóan nagy lesz a kölcsönhatás a csapadékképződés és a hidrodinamika között. Ennek eredményeként összetett csapadékmintázatok keletkezhetnek (3c ábra, megtört körszimmetria).



3. ábra. A kísérletek során előállított makroszkopikus a) kobalt-, b) réz- és c) kalcium-oxalát csapadékmintázatok; $c_{M^{2+}} = c_{(COO)_2^{2-}} = 0,25 \text{ M}$, $V = 5 \text{ ml}$, $Q = 5 \text{ ml/perc}$. A közeli felvételek a mintázatok periferiáját szemléltetik.

III. A vékony folyadékrétegben áramlásvezérelt körülmények között lejátszódó alkáliföldfém-karbonát csapadékreakciók esetén a különböző fémionok kombinálásával elérhető a csapadékcsöves szerkezet kialakulása még viszonylag lassú reakciókban is, melynek hajtóereje a göcképződés folyamatának kedvezményezettebbé válása [1].

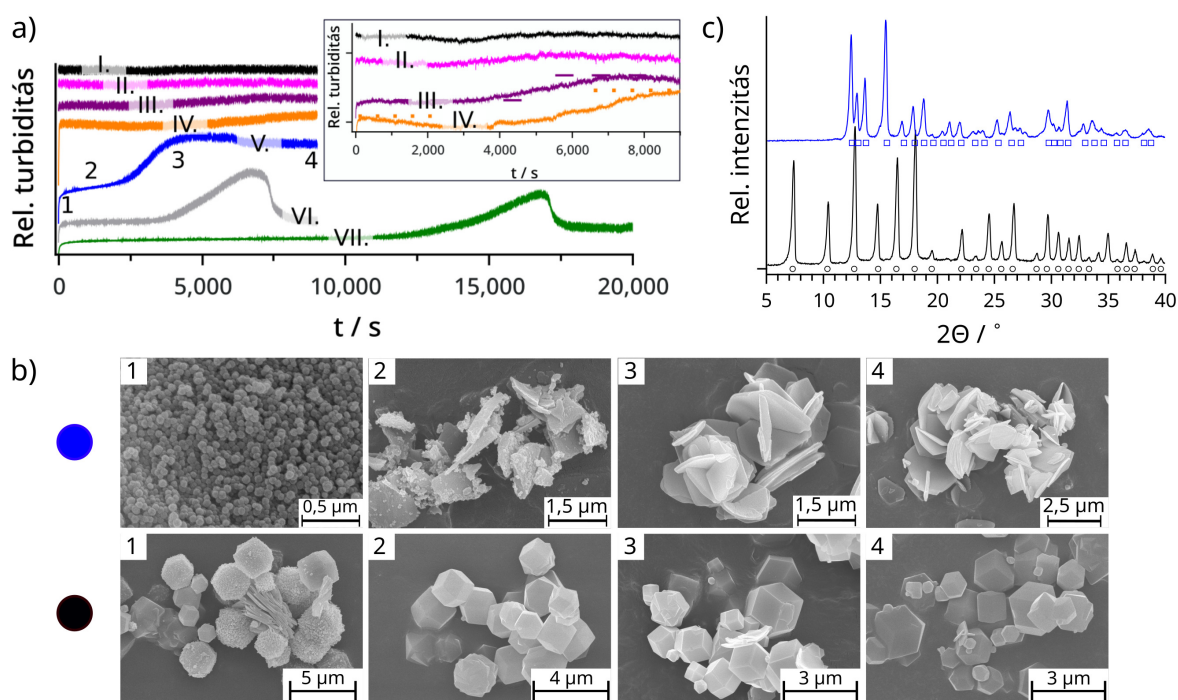
Az ionok kombinálásának hatását a Hele-Shaw cellában kialakuló mintázatok makroszerkezetére különböző alkáliföldfém-karbonát csapadékok esetében tanulmányoztuk. Referencia kísérleteink során a fémionokat külön-külön töltöttük a plexilapok közötti reakcióterbe, majd ebbe történt a nátrium-karbonát vizes oldatának beinjektálása. Megfigyeltük, hogy kellően magas oldatkonzentrációk esetén (1,5 M) a kalcium-, stroncium- és bárium-karbonát mintázatok membrános/csapadékcsöves szerkezetet mutatnak, hiszen ilyen körülmények között nagy a túltelítés mértéke és kedvező a göcképződés folyamata (4a ábra sárgával jelölt részei). A magnézium-karbonát esetében azonban nem alakult ki a membránszerkezet az előzőekkel azonos kísérleti paraméterek alkalmazása esetén, melynek oka, hogy ez a reakció lényegesen lassabb a többi alkáliföldfém-karbonát rendszerhez viszonyítva. Ebből adódóan ezen csapadékmintázat jellemzőit igyekeztünk módosítani azáltal, hogy a plexilapok közti térbe különböző alkáliföldfém-ionokkal adalékolt tömény (1,5 M) magnézium-klorid oldatot töltöttünk, hiszen ezáltal kedvezményezettebbé tehető a göcképződés folyamata és növelhető a túltelítés mértéke. Az ionok kombinálásával sikeresen módosítottuk a magnézium-karbonát mintázat jellemzőit, ugyanis már viszonylag alacsony hozzáadott alkáliföldfém-ion koncentrációnál (0,5 M) is kialakult a csapadékcsöves struktúra (4b ábra sárgával jelölt részei). A tiszta rendszerek esetében ennél jóval nagyobb koncentrációk mellett alakult csak ki a membránszerkezet, ami arra utal, hogy a kompozit csapadék esetében a leggyorsabb a göcképződés, ezáltal a magnézium- és a jelenlévő másik alkáliföldfém-ion együttesen építi fel a képződő háromdimenziós csapadékcsöveket.



4. ábra. Makroszkopikus alkáliföldfém-karbonát csapadékmintázatok, melyek előállításához a fémionokat a) külön-külön ($c_{M^{2+}} = c_{CO_3^{2-}} = 1,5 \text{ M}$), illetve b) kombinálva ($c_{Mg^{2+}} = c_{CO_3^{2-}} = 1,5 \text{ M}$, $c_{M^{2+}} = 0,5 \text{ M}$) alkalmaztuk. $V = 5 \text{ ml}$, $Q = 1 \text{ ml/perc}$. A sárgával kiemelt részek szemléltetik a membrános/csapadékcsöves struktúrák helyét a mintázaton belül.

IV. Zeolit-típusú imidazolát vázszerkezetek (ZIF-8, ZIF-67) vizes fázisú szintézise esetén a reaktánsok koncentrációjának változtatásával kinetikai kontroll érhető el a termék szerkezetére vonatkozóan: alacsony koncentráció és ezáltal lassú reakció a termodinamikailag stabil termék képződésének, míg töményebb oldatok és ezáltal gyors reakció a kedvezőbb tulajdonságú, de kevésbé stabil termék keletkezésének kedvez [2].

A ZIF-8 típusú fémorganikus térhálók kialakulásának kinetikai jellemzése során cink(II)-klorid és 2-MeIm szerves ligandum vizes oldatát töltöttük egy küvettába, majd folyamatos kevertetés közben UV-vis spektrofotométerrel rögzítettük a turbiditás időbeli változását. A kísérletek során a reaktánsok koncentrációit állandó sztöchiometriai arány mellett változtattuk. Magas oldatkoncentrációk és ezáltal gyorsabb reakciók esetén megfigyeltük, hogy a kezdetben mérhető turbiditás nem, vagy csak alig változik az idő előrehaladtával (5a ábra, I.–IV. görbéi). Ezzel ellentétben alacsonyabb koncentrációk alkalmazásával lassabban játszódtak le a reakciók és lépcsőzetes kinetikai görbe megjelenését tapasztaltuk (5a ábra, V.–VII. görbéi), amely a kezdetben leváló kristályok megváltozására utal a reakció előrehaladtával. Ennek bizonyítása érdekében a reakció bizonyos időpontjaiban vizsgáltuk a kristályok morfológiáját (SEM) két olyan koncentrációpár esetén, melyek eltérő kinetikai görbét eredményeztek. Megmutattuk, hogy a turbiditás második megnövekedése valóban

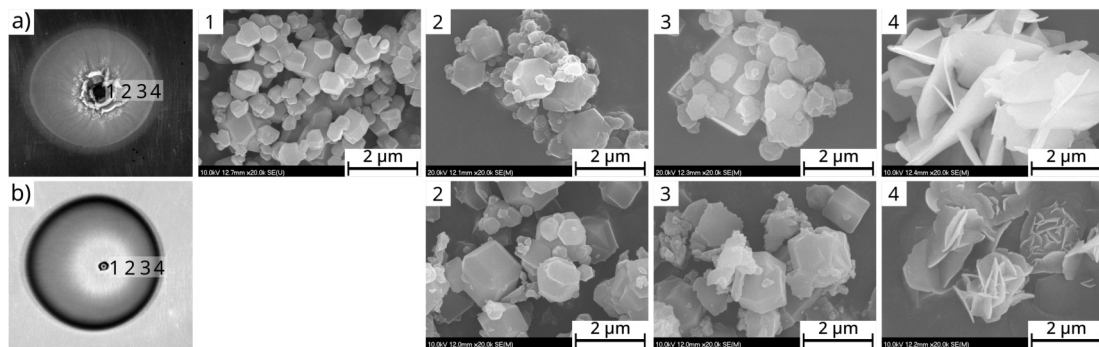


5. ábra. a) A ZIF-8 kristályok kialakulására jellemző relatív turbiditás – idő görbék különböző oldatösszetételek mellett; $[2\text{-MeIm}]_{\text{tot}}$ és $[\text{Zn}]_{\text{tot}}$: **I.** – 500 és 25 mM, **II.** – 375 és 18,75 mM, **III.** – 250 és 12,5 mM, **IV.** – 160 és 8 mM, **V.** – 80 és 4 mM, **VI.** – 40 és 2 mM és **VII.** – 30 és 1,5 mM. b) Kristályok morfológiájának időbeli alakulása lassú (● lépcsőzetes, V. görbe) és gyors (● állandósult turbiditás, I. görbe) reakciók esetén. c) A lassú (kék, V. görbe) és gyors (fekete, I. görbe) reakciók végtermékének kristályfázisa; a kék négyzetek és a fekete körök az egyes polimorfokra jellemző karakterisztikus röntgen reflexiók helyét jelölik.

a kezdetben leváló kolloid köztitermék átkristályosodásához köthető (5b ábra, felső panel), míg állandó turbiditás esetén már a reakció kezdetétől a végterméknek megfelelő polimorf van jelen (5b ábra, alsó panel). Ezen kívül PXRD mérésekkel azt is bizonyítottuk, hogy alacsonyabb oldatkoncentráció, ezáltal lassú reakció a termodinamikailag stabilabb, de kisebb pórusméretű termék kialakulásának kedvez, míg nagyobb koncentráció, ezáltal gyors reakció a kevésbé stabilis, de nagy porozitású, hasznos termék előállítását teszi lehetővé (5c ábra). Tehát kinetikai kontroll alkalmazásával előállíthatóak a különféle polimorfok jól kevert rendszerben is. Mindezen megfigyelések a ZIF-67 rendszer esetében is igazak voltak (kobalt(II)-ionok és 2-MeIm reakciója).

V. A ZIF-8 és ZIF-67 kristályok vékony folyadékrétegben és áramlásvezérelt körülmények között végrehajtott szintézise lehetővé teszi a különböző polimorfok egymástól térben elkülönült, mégis együttes képződését.

A ZIF-8 és ZIF-67 típusú fémorganikus térhálók áramlásvezérelt szintézise során 2-MeIm vizes oldatát áramoltattuk a két plexilap közé töltött cink(II)- vagy kobalt(II)-ionok oldatába. Az így kialakuló, radiális szimmetriával rendelkező csapadékmintázatok mikroszerkezetét a beáramlás helyétől különböző távolságokban vizsgáltuk SEM segítségével (a 6. ábrán szereplő számok a mintavétel helyét jelölik). Megmutattuk, hogy a ZIF-8 rendszer esetében változik a kristályok morfológiája a beömlőnyílástól távolodva, melynek hátterében a reaktor geometriája miatt megváltozott áramlási viszonyok állnak. A beáramlás helyéhez közel a termodinamikailag kevésbé stabil, de hasznos termék keletkezett (6a ábra, 1., 2. és 3. mintavételi helyek), míg a mintázat periferiáján a kisebb pórusméretű, de stabilabb termék volt jelen (6a ábra, 4. mintavételi hely). Ugyanezt a trendet figyeltük meg ZIF-67 kristályok esetén is, ahogy az a 6b ábrán látható. Ennek köszönhetően a különböző polimorfok egymástól független kinyerésére is lehetőség nyílik, amely az általunk alkalmazott áramlásvezérelt szintézis előnyét támasztja alá a jól kevert rendszerhez képest.



6. ábra. a) ZIF-8 és b) ZIF-67 csapadékmintázatok makroszerkezete, valamint a kristályok morfológiája a beáramlás helyétől különböző távolságokban. A számok a mintavétel helyét jelölik. $c_{Zn^{2+}} = c_{Co^{2+}} = 0,05 \text{ M}$, $c_{2-MeIm} = 1 \text{ M}$, $V = 5 \text{ ml}$, $Q = 0,5 \text{ ml/perc}$.

4. Publikációs lista

4.1. Az értekezés témakörében megjelent közlemények

1. K. Bene, **E. Balog**, G. Schuszter
Synthesis and composition modification of precipitate tubes in a confined flow reactor
Phys. Chem. Chem. Phys., **25**, 27293 (2023), IF₂₀₂₃ = 2,9
2. **E. Balog**, G. Varga, Á. Kukovecz, Á. Tóth, D. Horváth, I. Lagzi, G. Schuszter
Polymorph selection of zeolitic imidazolate frameworks via kinetic and thermodynamic control
Cryst. Growth Des., **22**, 4268–4276 (2022), IF₂₀₂₂ = 3,8
3. **E. Balog**, P. Papp, Á. Tóth, D. Horváth, G. Schuszter
The impact of reaction rate on the formation of flow-driven confined precipitate patterns
Phys. Chem. Chem. Phys., **22**, 13390–13397 (2020), IF₂₀₂₀ = 3,676
4. **E. Balog**, K. Bittmann, K. Schwarzenberger, K. Eckert, A. De Wit, G. Schuszter
Influence of microscopic precipitate structures on macroscopic pattern formation in reactive flows in a confined geometry
Phys. Chem. Chem. Phys., **21**, 2910–2918 (2019), IF₂₀₁₉ = 3,43

$$\sum \text{IF} = 13,806$$

4.2. Az értekezés témaköréhez nem kapcsolódó közlemények

1. A. Szerlauth, **E. Balog**, D. Takács, Sz. Sáringer, G. Varga, G. Schuszter, I. Szilágyi
Self-assembly of delaminated layered double hydroxide nanosheets for the recovery of lamellar structure
Colloids Interface Sci. Commun., **46**, 100564 (2022), IF₂₀₂₂ = 5,633
2. K.V. Bere, E. Nez, **E. Balog**, L. Janovák, D. Sebők, Á. Kukovecz, C. Roux, V. Pimienta, G. Schuszter
Enhancing the yield of calcium carbonate precipitation by obstacles in laminar flow in a confined geometry
Phys. Chem. Chem. Phys., **23**, 15515–15521 (2021), IF₂₀₂₁ = 3,945

$$\sum \text{IF} = 9,578$$

5. Előadások

Az értekezés témaköréhez kapcsolódó hazai előadások: **12** db.

Az értekezés témaköréhez kapcsolódó nemzetközi előadások: **4** db.

Az értekezés témaköréhez nem kapcsolódó előadások: **1** db.

5.1. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó előadások

1. **E. Papp-Balog**, Á. Tóth, G. Schusztter

A reakció és az anyagtranszport relatív sebességének hatása csapadékképző reakciók termékeinek mikro- és makroszerkezetére

Ph.D. értekezés alapjául szolgáló eredmények előzetes bemutatása, MTA Reakciókinetika és Fotokémiai Munkabizottsága, 2023. október 26–27., Mátrafüred, Magyarország

2. **E. Balog**, G. Schusztter

Fémorganikus szilárd térhálók képződésének kinetikai vizsgálata és áramlásvezérelt szintézise vékony folyadékrétegben

Kémiai Intézeti ÚNKP konferencia, 2023. június 29., Szeged, Magyarország (online)

3. **E. Balog**, K. Bene, Á. Tóth, G. Schusztter

Synthesis and composition modification of precipitate tubes in a confined flow reactor

Japanese–Hungarian Workshop on Reaction Kinetics, Nonlinear and Material Science, 2023. március 14., Budapest, Magyarország

4. **E. Balog**, G. Varga, Á. Kukovecz, Á. Tóth, D. Horváth, I. Lagzi, G. Schusztter

ZIF fémorganikus térhálók különböző polimorfjainak előállításának termodinamikai és kinetikai szabályozással

MTA Reakciókinetika és Fotokémiai Munkabizottsága, 2022. október 27–28., Mátrafüred, Magyarország

5. **E. Balog**, P. Papp, Á. Tóth, D. Horváth, G. Schusztter

The impact of reaction rate on the formation of flow-driven confined precipitate patterns

COST Chemobrionics Pisa Annual Meeting, 2022. szeptember 05–07., Pisa, Olaszország

6. **E. Balog**, P. Papp, Á. Tóth, D. Horváth, G. Schusztter

The impact of reaction rate on the formation of flow-driven confined precipitate patterns

Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems (Gordon Research Seminar), 2022. július 16–17., Easton, MA, Amerikai Egyesült Államok

7. **E. Balog**, P. Papp, Á. Tóth, D. Horváth, G. Schusztter

A reakciósebesség hatása a vékony folyadékrétegben kialakuló áramlásvezérelt csapadékmintázatokra

MTA Reakciókinetikai és Fotokémiai Munkabizottsága, 2021. október 21–22., Mátrafüred, Magyarország

8. **E. Balog**, G. Varga, Á. Kukovecz, Á. Tóth, D. Horváth, I. Lagzi, G. Schusztter
A ZIF-8 fémorganikus térháló képződésének kinetikai vizsgálata és áramlásvezérelt szintézise vékony folyadékrétegben
Kárpát-medencei Nyári Egyetem, 2021. július 06–10., Budapest, Magyarország (online)
9. **E. Balog**, R. Zahorán, I. Lagzi, G. Schusztter
The kinetics of zeolitic imidazolate framework (ZIF-8) formation and synthesis in confined flow reactor
2nd International Conference on Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis, 2021. május 20–22., Budapest, Magyarország (online)
10. **E. Balog**, R. Zahorán, P. Papp, D. Horváth, I. Lagzi, G. Schusztter
A ZIF-8 fémorganikus hálózat képződésének kinetikai vizsgálata és áramlásvezérelt szintézise vékony folyadékrétegben
MTA Reakciókinetikai és Fotokémiai Munkabizottsága, 2020. november 06., Magyarország (online)
11. **E. Balog**, G. Schusztter
Áramlásvezérelt csapadékképződés vékony folyadékrétegben
Kémiai Intézeti ÚNK konferencia, 2020. július 17., Szeged, Magyarország (online)
12. **E. Balog**, G. Schusztter
Áramlásvezérelt csapadékképződés vékony folyadékrétegben
MTA Reakciókinetikai és Fotokémiai Munkabizottsága, 2019. november 07–08., Mátrafüred, Magyarország
13. **E. Balog**, G. Schusztter
Áramlásvezérelt csapadékképződés vékony folyadékrétegben
XLII. Kémiai Előadói Napok, 2019. október 28–30., Szeged, Magyarország
14. **E. Balog**, G. Schusztter
Áramlásvezérelt csapadékképződés vékony folyadékrétegben
Országos Tudományos Diákköri Konferencia, 2019. március 21–23., Budapest, Magyarország
15. **E. Balog**, G. Schusztter
Áramlásvezérelt csapadékképződés vékony folyadékrétegben
Tudományos Diákköri Konferencia, 2018. november 22., Szeged, Magyarország

16. **E. Balog**, G. Schusztter

Áramlásvezérelt csapadékképződés vékony folyadékrétegben

XLI. Kémiai Előadói Napok, 2018. október 15–17., Szeged, Magyarország

5.2. Az értekezés témaköréhez nem kapcsolódó előadások

1. **E. Balog**, K. Bene, G. Schusztter

Kompozit fémorganikus hálózatok előállítása és képződésének kinetikai vizsgálata

Kémiai Intézeti ÚNKP konferencia, 2024. június 13., Szeged, Magyarország (online)

6. Poszter prezentáció

Az értekezés témaköréhez kapcsolódó nemzetközi poszter prezentáció: 3 db.

6.1. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó poszter prezentáció

1. **E. Balog**, P. Papp, Á. Tóth, D. Horváth, G. Schusztter

The impact of reaction rate on the formation of flow-driven confined precipitate patterns

COST Chemobrionics Pisa Annual Meeting, 2022. szeptember 05–07., Pisa, Olaszország

2. **E. Balog**, P. Papp, Á. Tóth, D. Horváth, G. Schusztter

The impact of reaction rate on the formation of flow-driven confined precipitate patterns

Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems (Gordon Research Conference), 2022. július 17–22., Easton, MA, Amerikai Egyesült Államok

3. **E. Balog**, P. Papp, Á. Tóth, D. Horváth, G. Schusztter

The impact of reaction rate on the formation of flow-driven confined precipitate patterns

Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems (Gordon Research Seminar), 2022. július 16–17., Easton, MA, Amerikai Egyesült Államok

MTMT azonosító: 10074154