

Mechanokémiai úton előállított egyfémes (Cu, Ni), kétfémes (Cu/Sn, Ni/Sn) és háromfémes (Cu/Ni/Sn) nanorészecskék szerkezetét befolyásoló tényezők és néhány katalitikus alkalmazásuk

Musza Katalin

A doktori értekezés tézisei



Témavezető: Dr. Pálinkó István, egyetemi tanár

Környezettudományi Doktori Iskola

Szerves Kémiai Tanszék

Természettudományi és Informatikai Kar

Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2020

Mechanokémiai úton előállított egyféműs (Cu, Ni), kétféműs (Cu/Sn, Ni/Sn) és háromféműs (Cu/Ni/Sn) nanorészecskék szerkezetét befolyásoló tényezők és néhány katalitikus alkalmazásuk

Musza Katalin

A doktori értekezés tézisei



Témavezető: Dr. Pálinkó István, egyetemi tanár

Környezettudományi Doktori Iskola

Szerves Kémiai Tanszék

Természettudományi és Informatikai Kar

Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2020

1. Bevezetés, célkitűzések

A nanoszerkezetű anyagok felületén elhelyezkedő atomok tulajdonságai sokkal közelebb állnak a szabad atomokéihoz, mint a tömbi fázisban lévőkéhez. A nanoméret hatásai megmutatkoznak az anyag optikai, elektromos, mechanikai, kémiai, fiziko-kémiai, termikus és mágneses tulajdonságaiban.

A nanoszerkezetű anyagok tervezett előállítására elvben kétféle módon történhet. Ezek a *top-down* (fentről-lefelé) és a *bottom-up* (lentől-felfelé) közelítés. A *top-down* típusú előállítások esetében a nagyméretű, tömbi fázisú kiindulási anyagot valamilyen mechanikai, kémiai vagy fizikai módszer alkalmazásával nanoméretű objektumokká alakítjuk át, a *bottom-up* esetben atomi szintről kezdjük el az építkezést.

Az általában *top-down* módszerek közé sorolható mechanokémia elvben mindkét megközelítésre lehetőséget ad. A mechanokémia tárgykörébe tartozik minden olyan folyamat, amelynek során mechanikai energia közlésével érjük el a kívánt kémiai és/vagy fizikai-kémiai változást. Ez történhet úgy, hogy prekursorokból mechanikai energiaközlés segítségével új anyagokat állítunk elő, vagy már meglévő anyagok szerkezetét módosítjuk mechanikai aktiválás segítségével, és így állítunk elő új termékeket. A mechanokémiai folyamatok tipikus módszerei a nyírás, az összenyomás és az őrlés. A legalkalmasabb és leggyakrabban alkalmazott berendezések a különböző típusú malmok. Ebben rejlik az egyik nagy előnye is ezeknek a szintézismódszereknek, mivel a malmok az iparban is használatos eszközök, így a nanoszerkezetek ilyen módon történő előállítása könnyebben átültethető az ipari gyakorlatba.

A fém nanorészecskék egyik leggyakoribb alkalmazási területe a heterogén katalízis, ami a környezetkímélő technikák már bizonyított útja, hiszen a katalizátor és a reakcióelegy külön fázisban található, így a katalizátor egyszerűen visszanyerhető, és akár többször is felhasználható. A tudományos világ és az egyre környezettudatosabbá váló közvélemény nagy várokozással tekint a fém nanorészecskék kutatásának fejleményeire további területeken is, mint például a fosszilis energiahordozók kiváltása, a globális felmelegedés kezelése, az üvegházhatást eredményező gázok kontrollja, és a sort még hosszan folytathatnánk.

Doktori munkám során elsődleges feladatomban az volt, hogy egy- (Cu és Ni) és többfémes (Cu/Sn, Ni/Sn kétfémes és Cu/Ni/Sn háromfémes) nanorészecskéket állítsak elő egy oldószermentes, így környezetbarát módszerrel, az őrléssel. Célunk elsősorban az volt, hogy feltárjuk a szintézis során alkalmazott paraméterek (őrlési frekvencia, őrlési idő,

adalékanyagok minősége és mennyisége) hatását a képződő őrlemények minőségére (szerkezetére, morfológiájára, a részecskék méretére), hogy megállapítsuk az optimális kísérleti körülményeket, előre megjósolható méretű, összetételű és szerkezetű nanorészecskék előállítására.

Munkánk során egyrészt megvizsgáltuk a kísérleti paraméterek szisztematikus változtatásával azok hatását a termékek szerkezetére (méret, alak, összetétel), másrészt feltérképeztük különböző adalékanyagok – állandó őrlési paraméterek mellett – minőségének és mennyiségének hatását a képződő termékekre. Összefüggéseket kerestünk a részecskék aggregációja és az alkalmazott szintézisparaméterek között. A kapott egyfémű anyagokat katalizátorként alkalmaztuk Ullmann-típusú és Suzuki-Miyaura kapcsolási reakciókban.

2. Kísérleti rész

A nanorészecskéket főként mechanokémiai módszerrel állítottuk elő, amelyhez egy RETSCH MM 400 rázómalmost használtunk. Munkánk során optimalizáltuk az őrlési paramétereket, majd adott őrlési paraméterek alkalmazása mellett különböző minőségű és mennyiségű adalékanyagok jelenlétében végeztük el az egy- és többfémű nanorészecskék szintézisét.

A termékeket először minden esetben por-röntgendiffraktometriával (XRD) vizsgáltuk. Az XRD segítségével és a JCPDS adatbázis alkalmazásával azonosítottuk a termékeket alkotó fázisokat, megállapítottuk, hogy elemi fémeket kaptunk-e az őrlést követően, illetve többfémű rendszereknél azt, hogy fizikai keverék vagy valamilyen ötvözet keletkezett. Továbbá a Scherrer-egyenlet felhasználásával kiszámítottuk a megfelelő primer részecskeméreteket. Pásztázó elektronmikroszkópiával (SEM) tanulmányoztuk azt, hogy az őrlés hatására hogyan változott a termékek felszíne, morfológiája. Az energiadiszperzív röntgenspektrometriás analízis (EDX) segítségével nyert elemtérképek hasznos információt szolgáltatottak arról, hogy ötvözetet vagy különálló fázisokat alkottak-e a fémek az őrleményekben. A primer részecskék és a belőlük keletkező aggregátumok tanulmányozására transzmissziós elektronmikroszkópot (TEM) alkalmaztunk. A katalízis szempontjából fontos, hogy a katalizátor diszperzítási foka a lehető legnagyobb legyen, azonban a SEM és a TEM felvételeken is jól megfigyelhető volt, hogy részecskéink erősen aggregálódtak állapotúak. Ennek vizsgálatára dinamikus fényszórás mérést (DLS) alkalmaztunk, amelynek során megállapítottuk az aggregáció mértékét és a termékek

diszperzitását. A katalizátorként történő alkalmazásokhoz ezeket az eredményeket felhasználva választottuk ki azokat a kísérleti körülményeket, amelyek a legkisebb mértékű aggregációjú, azaz a legnagyobb fajlagos felületű fém nanorészecskék képződését eredményezték. Kiegészítő módszerként még infravörös spektroszkópiát is használtunk, valamint a BET módszert alkalmazva megmértük néhány minta fajlagos felületét is.

3. Új tudományos eredmények

1. Elsőként használtunk dimetil-szulfoxidot (DMSO-t) őrlési adalékanyagként Cu nanorészecskék mechanokémiai előállításához és mutattuk meg azt, hogy a DMSO kiváló stabilizálószer, amely hatékonyan képes megakadályozni a *cold welding* vagy van der Waals kölcsönhatások eredményeként létrejövő aggregációt.

Kimutattuk, hogy a DMSO adalékolás hatására a növekvő adalékanyag mennyiséggel a primer részecskeméret maximumgörbe szerint változik. Azt találtuk, hogy Cu_2O nanorészecskék is keletkeztek, mégpedig a legnagyobb primer részecskemérettel rendelkező nanorészecskék esetében a legnagyobb mértékben.

2. Az őrlés során a Cu nanorészecskék mellett Cu(I) ionok is keletkeztek, és az így kialakult Cu/ Cu_2O nanokompozit hatékonyan katalizálta jódbenzol és 1H-pirazol Ullmann-típusú kapcsolási reakcióját.

A kezeletlen rézpor csekély katalitikus aktivitását már száraz őrléssel is jelentősen javítani lehetett, ennek további növekedését eredményezte az OAm és DMSO adalékanyagok jelenlétében végzett nedves őrlés. Különösen szembeötlő volt ez DMSO alkalmazása esetében. Ennek oka az, hogy DMSO jelenlétében a Cu nanorészecskék felületén számottevő mennyiségű (1 m/m%) Cu_2O is kialakul, az pedig szakmai körökben közismert, hogy Cu(I) ionok jelenlétében a Cu-katalizátorok hatékonysága jelentősen növekszik az Ullmann reakcióban.

3. Ni nanorészecskék $\text{Ni}(\text{OH})_2$ hidrazinos redukciójával történő előállítási technikáját elsőként ötvöztük mechanikai előkezeléssel, és kimutattuk, hogy az jelentős növekedést okozott a termék katalitikus aktivitásában.

Kimutattuk, hogy a $\text{Ni}(\text{OH})_2$ prekursor mechanokémiai előkezelése jelentős mértékben javítja a Ni nanorészecskék katalitikus aktivitását a kezeletlen prekursorból előállított

katalizátorhoz képest. DLS mérések és SEM felvételek alapján megállapítottuk, hogy az előkezelés az aggregátumok méretét nem befolyásolja, és a fajlagos felületet sem változtatja meg jelentősen. Így feltehető, hogy a megváltozott aktivitás oka a hibahelyek számának növekedése, amelyek a hidrazinos redukció lejátszódását követően is megmaradnak.

4. Sikeresen állítottunk elő Cu/Sn kétfémes nanorészecskéket mechanokémiai úton különböző folyékony és szilárd adalékanyagok hozzáadásával, és összefüggéseket állapítottunk meg az adalékanyag minősége és a képződött termék szerkezete között.

Nyolc különböző adalékanyag alkalmazása mellett XRD és SEM-EDX mérések alapján megállapítottuk, hogy a képződő termékek minősége (ötvözet vagy fizikai keverék) függ az adalékanyag minőségétől. NaCl és heptán adalékolása az adalékanyag mennyiségétől függetlenül Cu₆Sn₅ összetételű ötvözet (η-bronz) képződését eredményezte. Oleil-amin (OAm), polietilén-glikol (PEG) alkalmazása esetén, mennyiségüktől függetlenül, a Cu és Sn fizikai keveréke keletkezett. Polivinil-pirrolidinon (PVP), cetil-trimetil-ammónium-bromid (CTAB) és Na-dodecil-szulfát (SDS) jelenlétében, kisebb mennyiségek esetén csak a fenti ötvözet, az adalékanyag mennyiségének növelésével fizikai keverék és ötvözet, a legnagyobb mennyiségeknél tisztán a két fém fizikai keveréke képződött. Az etilén-glikol (EG) adalékolás hatására megfigyelhető viselkedés tendenciájában pont az ellenkezője a PVP, a CTAB ill. az SDS esetében tapasztaltakkal. Itt ugyanis kisebb mennyiségű EG jelenlétében fizikai keverék képződött, és a hozzáadott adalékanyag mennyiségének a növelésével az egyedi fémekre jellemző reflexiók eltűntek, új reflexiók jelentek meg, ötvözet keletkezett.

5. Kimutattuk, hogy az adalékanyagok mennyiségének megfelelő megválasztásával a nanorészecske aggregátumok méretét széles tartományban befolyásolni tudjuk.

DLS mérések alapján, szobahőmérsékleten szilárd halmazállapotú adalékanyagok (NaCl, PVP, CTAB, SDS) alkalmazása esetén, az adalékanyag mennyiségének növelése az aggregátumok méretét inkább csökkenti. Folyékony adalékanyagok esetében (OAm, EG, PEG, heptán) a fentivel ellenkező tendencia figyelhető meg. Ennek alapján arra következtettünk, hogy a termék aggregációjának mértékét elsősorban a szintézis során alkalmazott adalékanyag halmazállapota határozza meg, de legalábbis jelentősen befolyásolja.

6. Eddig nem ismert analógiákat és különbségeket mutattunk ki a Cu/Sn és a Ni/Sn kétfémes nanorészecskék mechanokémiai előállításakor képződő termékek adalékanyag függésében.

A különböző adalékanyagok hatását tekintve a Ni/Sn rendszereknél is háromféle, a Cu/Sn rendszerrel sok tekintetben azonos viselkedést figyeltünk meg. OAm adalékanyag hatása a Cu/Sn és Ni/Sn rendszerre gyakorlatilag teljes mértékben megegyezik, Ni és Sn fizikai keveréke képződik. PVP, CTAB, SDS és EG jelenlétében mind fizikai keverék, mind ötvözet képződése megfigyelhető volt a Ni/Sn rendszerben is, de a képződött ötvözet nem egyetlen kitüntetett fázis, hanem feltehetően különböző, Ni_xSn_y ötvözetek különböző arányú keveréke. NaCl és heptán adalékanyag jelenlétében a bemért komponensek teljes mértékben Ni_xSn_y összetételű ötvözetek keverékeivé alakultak át.

7. Megállapítottuk, hogy a Cu/Ni/Sn háromfémű rendszerek esetében az adalékanyagok hatása a termékek összetételére a kétfémes rendszereknél megfigyelt mintázatokat követi, kivéve azt, hogy az alkalmazott körülmények között az η -bronz preferáltan képződik, míg Ni_xSn_y ötvözetek képződése egyik rendszerben sem figyelhető meg.

A tiszta fémfázisok a PEG és az OAm hatására a Cu/Ni/Sn háromfémű rendszerekben is elkülönültek maradtak az őrlést követően. SDS, EG, PVP és CTAB jelenlétében kapott háromfémű termékeknel az őrlés során a Cu_6Sn_5 ötvözet, vagyis az η -bronz részleges képződését figyeltük meg; ennek relatív mértéke $SDS > EG > PVP > CTAB$ irányban nőtt. Az ötvözet képződésében részt nem vevő alkotók elemi állapotban, fizikai keverékként maradtak vissza a termékben. A Ni/Sn kétfémes rendszerben megfigyelt Ni_xSn_y ötvözetek képződésére ezeknek az adalékanyagoknak a jelenlétében semmiféle jel nem mutatott. NaCl és heptán jelenlétében kapott háromfémű termékekben a Sn és Cu gyakorlatilag teljes mértékben Cu_6Sn_5 -té, η -bronzzá alakult át, a Ni különálló fázisként maradt a termékben. Az adott kísérleti körülmények között tehát a NaCl és a heptán az η -bronz preferált képződését eredményezi.

4. Az eredmények gyakorlati és környezettudományi vonatkozásai

A fém nanorészecskék széles körű katalitikus felhasználása közismert. Munkánk során elsődleges célunk egy- és többfémű nanorészecskék előállítása volt a későbbi katalitikus felhasználás reményében. A heterogén katalízis bizonyítottan környezetkímélő technika,

hiszen a homogén katalízissal szemben, ahol a katalizátor eltávolítása meglehetősen problematikus (sokszor nagy mennyiségű oldószer kerül a katalizátorral együtt a környezetbe), a katalizátor egyszerűen eltávolítható (a katalizátor külön fázisban van, valamint ha van is kioldódás, a katalizátor akkor is legfeljebb nyomnyi mennyiségben kerül a környezetbe), és többször felhasználható.

A nanoszerkezetek előállítása az előállítás típusától függően sokszor környezetvédelmi szempontból aggályokat vethet fel, pl. a nagy oldószerigény, a nemkívánatos melléktermékek képződése vagy a keletkező hulladékok kezelésének problémája miatt. Az általunk alkalmazott mechanokémiai eljárás egyszerűen kivitelezhető, viszonylag kicsi beruházásigényű, gyakorlatilag oldószermentes és kivételesen jó atomhatékonyságú szintézismódszer, ezért környezetvédelmi szempontból előnyös a különböző fémes nanoszerkezetek mind laboratóriumi, mind pedig ipari léptékű előállítására.

5. Tudományos közlemények, konferenciamegjelenések listája

5.1 Az értekezés anyagához kapcsolódó, referált folyóiratban megjelent publikációk

1. **Musza K.**, Szabados M., Ádám A. A., Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Pálinkó I.: Mechanochemically modified hydrazine reduction method for the synthesis of nickel nanoparticles and their catalytic activities in the Suzuki-Miyaura cross-coupling reaction, *Reaction Kinetics Mechanisms and Catalysis* **126**, 857–868 (2019).

IF₂₀₁₉: 1,520

2. **Musza K.**, Szabados M., Ádám A. A., Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Pálinkó I.: Ball milling of copper powder under dry and surfactant-assisted conditions – on the way towards Cu/Cu₂O nanocatalyst, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **19**, 389-394 (2019).

IF₂₀₁₉: 1,134

5.2 Az értekezés anyagához kapcsolódó, konferenciakiadványban megjelent publikációk

1. **Musza, K.**, Szabados, M., Ádám, A.A., Sipos, P., Pálinkó, I.: Preparation of Cu-Sn bimetallic nanoparticles *via* ball milling – the effect of various additives on the structure, *Progressive Trends in Coordination, Bioinorganic and Applied Inorganic Chemistry*, (Melnik, M., Segl'a, P., Tatarko, M.), ISBN 978-80-8208-014-1, Slovak Chemical Society, 2019, pp. 50–57.

2. Lantos, Sz., **Musza, K.**, Szabados, M., Ádám, A., Pásztor, T., Sipos, P., Pálinkó, I.: Ni(OH)₂ hidrazinos redukciójával előállított Ni nanorészecskék jellemzése és katalitikus aktivitása, *Kémiai Előadói Napok, Program és előadásösszefoglalók*, ISBN 978-963-9970-95-3, pp. 87–90 (2018).

3. **Musza, K.**, Ádám, A.A., Szabados, M., Sipos, P., Pálinkó, I.: The effect of the experimental parameters on the formation of Cu/Cu₂O nanoparticles, *Recent Developments in Coordination, Bioinorganic and Applied Inorganic Chemistry*, (Segľa, P., Tatarko, M.), ISBN 978-80-89597-65-9, Press of Slovak University of Technology, Bratislava, 2017, pp. 93–97.

5.3 Az értekezés anyagához nem kapcsolódó publikációk

1. Ádám A.A., Szabados M., Varga G., Papp Á., **Musza K.**, Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Pálinkó, I.: Ultrasound-assisted hydrazine reduction method for the preparation of nickel nanoparticles, physicochemical characterization and catalytic application in Suzuki-Miyaura cross-coupling reaction, *Nanomaterials* **10**, 632:1–18 (2020).
IF₂₀₁₉: 4,324

2. Ádám A.A., Szabados M., **Musza K.**, Béteky P., Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Pálinkó I.: Effect of medium and nickel salt source in the synthesis and catalytic performance of nano-sized nickel in the Suzuki-Miyaura cross-coupling reaction, *Reaction Kinetics Mechanisms and Catalysis* **126**, 841–855 (2019).
IF₂₀₁₉: 1,520

3. Ádám A.A., Szabados M., Polyákovics Á., **Musza K.**, Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Pálinkó I.: The synthesis and use of nano nickel catalysts, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **19**, 453–458 (2019).
IF₂₀₁₉: 1,134

5.4 Az értekezés anyagához nem kapcsolódó, konferenciakiadványban megjelent publikációk

1. Polyákovics Á., Ádám A.A., Szabados M., **Musza K.**, Peintler G., Sipos P., Pálinkó I.: Méretkontrollált Ni nanorészecskék előállítása és jellemzése, *XL. Kémiai Előadói Napok, Előadás összefoglalók*, 2017, ISBN 978-963-9970-83-0, pp. 243–247.

2. Ádám, A.A., **Musza, K.**, Szabados, M., Sipos, P., Pálinkó, I.: Synthesis and characterization of nickel nanoparticles, *Recent Developments in Coordination, Bioinorganic and Applied Inorganic Chemistry*, (Segľa, P., Tatarko, M.), ISBN 978-80-89597-65-9, Press of Slovak University of Technology, Bratislava, 2017, pp. 7–13.

5.5 Az értekezés anyagához kapcsolódó konferenciamegjelenések

1. **Musza K.**, Szabados M., Ádám A.A., Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P. Pálinkó I.: Preparation of Cu-Sn bimetallic nanoparticles *via* ball milling – the effect of various additives on the structure, *XXVII. International Conference on Coordination and Bioinorganic Chemistry*, Smolenice, Szlovákia (előadás), 2019.
2. Lantos Sz., **Musza K.**, Szabados M., Ádám A.A., Pásztor T., Sipos P., Pálinkó I.: Ni(OH)₂ hidrazinos redukciójával előállított Ni nanorészecskék jellemzése és katalitikus aktivitása, *XLI. Kémiai Előadói Napok*, Szeged, Magyarország (előadás), 2018.
3. **Musza K.**, Szabados M., Ádám A.A., Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P. Pálinkó I.: Mechanochemically modified hydrazine reduction method for the synthesis of nickel nanoparticles and their catalytic activity, *1st International Conference on Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, Budapest, Magyarország (előadás), 2018.
4. **Musza K.**, Szabados M., Ádám A.A., Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P. Pálinkó I.: Preparation, characterization and catalytic activity of Cu-Sn bimetallic nanopowder synthesised *via* mechanical milling, *1st International Conference on Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, Budapest, Magyarország (poszter), 2018.
5. **Musza K.**, Ádám A.A., Szabados M., Sipos P., Pálinkó I.: The effect of the experimental parameters on the formation of Cu/Cu₂O nanoparticles, *XXVI. International Conference on Coordination and Bioinorganic Chemistry*, Smolenice, Szlovákia (előadás), 2017.

5.6 Az értekezés anyagához nem kapcsolódó konferenciamegjelenések

1. Ádám A.A., Papp Á., Szabados M., **Musza K.**, Sipos P., Pálinkó I.: Synthesis and characterization of LDH-supported Ni, Cu or NiCu nanoparticles, *XXVII. International Conference on Coordination and Bioinorganic Chemistry*, Smolenice, Szlovákia (előadás), 2019.
2. Ádám A.A., Papp Á., Szabados M., **Musza K.**, Sipos P., Pálinkó I.: Al(OH)₃ hordozóra felvitt Ni, Cu és NiCu nanorészecskék előállítása és jellemzése, *I.FKF Szimpózium*, Debrecen, Magyarország (előadás), 2019.
3. Ádám A.A., Szabados M., **Musza K.**, Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Pálinkó I.: Synthesis of nickel nanocatalysts by ultrasound irradiation under different conditions, *14th Pannonian International Symposium on Catalysis*, Starý Smokovec, Szlovákia (előadás), 2018.
4. Ádám A.A., Szabados M., **Musza K.**, Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Pálinkó I.: Effect of medium and nickel salt source in the synthesis of nano-sized nickel catalysts, *1st International Conference on Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, Budapest, Magyarország (előadás), 2018.

5. Ádám A.A., Szabados M., **Musza K.**, Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Pálinkó I.: Application of ultrasound irradiation in the syntheses of nickel nanocatalysts, *1st International Conference on Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, Budapest, Magyarország (poszter), 2018.
6. Ádám A.A., **Musza K.**, Szabados M., Papp Á., Sipos P., Pálinkó I.: Hydrazine reduction method for preparing copper-nickel bimetallic nanoparticles, *2nd Young Researchers' International Conference on Chemistry and Chemical Engineering*, Budapest, Magyarország (előadás), 2018.
7. Polyákovics Á., Ádám A.A., Szabados M., **Musza K.**, Peintler G., Sipos P., Pálinkó I.: Méretkontrollált Ni nanorészecskék előállítása és jellemzése, *XL. Kémiai Előadói Napok*, Szeged, Magyarország (előadás), 2017.
8. Szabados M., **Musza K.**, Pásztor T., Sipos P., Pálinkó I.: Nikkel nanorészecskék előállítása különféle alkoholokat tartalmazó közegben, *Vegyészkonferencia, Hajdúszoboszló, Magyarország (poszter)*, 2017.
9. Ádám A.A., **Musza K.**, Szabados M., Sipos P., Pálinkó I.: Synthesis and characterization of nickel nanoparticles, *XXVI. International Conference on Coordination and Bioinorganic Chemistry*, Smolenice, Szlovákia (előadás), 2017.

Összes referált közlemény: 5, ebből az értekezéshez kapcsolódik: 2

Összesített impakt faktor: 9,632, ebből az értekezéshez kapcsolódik: 2,654