

A DOKORI (Ph.D.) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

# **Réteges kettős hidroxidok alkalmazása az oxidatív stressz megelőzésére**

**Szerlauth Adél**

**Témavezető:**  
**Dr. Szilágyi István**  
Egyetemi docens



Kémia Doktori Iskola

MTA-SZTE „Lendület” Biokolloidok Kutatócsoport

Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék

Természettudományi és Informatikai Kar

Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2024

## **I. Bevezetés**

A reaktív oxigén származékok (ROS) (pl. szuperoxid anion ( $O_2^-$ ), hidroxilgyök ( $OH^\bullet$ ), hidrogén peroxid ( $H_2O_2$ )) normál fiziológias körülmények között számos biológiai folyamatban nélkülözhetetlenek. Fontos szerepük van a sejthalál szabályozásában, a sejtek differenciálódásában és az intracelluláris jelátviteli folyamatokban, azonban túltermelődésük komoly következményekkel járhat. Az élő szervezetek optimális működése során a felsorolt származékok a mitokondriális elektrontranszportlánc részeként vagy enzimkatalizált reakciókban keletkeznek, azonban külső tényezők (pl. UV-sugárzás, dohányzás, gyógyszerhatóanyagok bomlástermékei) tovább növelhetik koncentrációjukat, mely oxidatív stressz kialakulásához vezethet. Túltermelődésük, ezáltal az oxidatív stressz kialakulása ellen az élő szervezetek antioxidánsokkal védekeznek. Amennyiben ez a jól szabályozott egyensúly felborul, az oxidatív stressz számos komoly megbetegedés előidézője lehet. Az antioxidánsok olyan molekulák melyek képesek késleltetni vagy megakadályozni az oxidatív stressz kialakulását. Szerkezetüket tekintve lehetnek enzimátikusak, melyek meghatározott fehérjeszerkezettel bírnak, vagy molekulárisak, úgy, mint polifenolok, vitaminok vagy karotenoidok. Orvos-biológiai jelentőségük mellett számos ipari folyamatban fontos adalékanyagok, azonban mind molekuláris mind enzimátikus képviselői érzékenyek bizonyos környezeti tényezőkre (pl. pH, hőmérséklet, fény). Ennek eredményeként kinyerésük és tisztításuk jelentős költségekkel jár. Ezen problémák kiküszöbölésére vagy a tulajdonságok optimalizálására jelenthet megoldást az antioxidánsok különböző nanorészecskéken történő rögzítése, vagy enzimutánzó nanorészecskék előállításuk. Az utóbbi különösen ígéretes kutatási irány, amennyiben lehetséges a nano-mérettartományban történő előállításuk.

A réteges kettős hidroxidok (LDH-k) jelentős figyelemre tartanak számot, mint antioxidáns molekulák hordozói. Az LDH-k olyan brucitból ( $Mg(OH)_2$ ) származtatható szerkezettel rendelkeznek, melyek hidroxid rétegeinek pozitív töltését – amely a három értékű fémionok beépülésének a következménye – a rétegeközi anionok kompenzálják. Az ioninterkalált, réteges szerkezeti formáik mellett ismertek delaminált változataik (dLDH), melyek kutatása, a 2D anyagok rohamos fejlődésének köszönhetően, szintén népszerű az utóbbi évtizedekben. Pozitív tulajdonságainak (pl. hangolható szerkezet, anioncsere kapacitás, biokompatibilitás) köszönhetően számos kutatás foglalkozik az LDH-k/dLDH-k hordozóanyagként való felhasználásával különféle gyógyszerhatóanyagok, enzimek és antioxidánsok rögzítéséhez. A biomolekulák beépíthetők az LDH rétegei közé, vagy rögzíthetők a felületükön elektrosztatikus kölcsönhatások vagy kovalens kötések révén. A

biomolekulák rögzítése mellett, katalitikus aktivitású fémionok hidroxid rétegekbe való beépítésével szintén enzimatis aktivitású LDH-k állíthatók elő. Az utóbbi esetben előállított enzimatis aktivitású nanorészecskék az ún. nanozimek, melyek képesek az enzimek tulajdonságait lemásolni továbbá a természetes képviselőikhez képest nagyobb stabilitást biztosítani.

Az enzimutánzó heterogén rendszerek felhasználása során a szerkezeti stabilitás mellett a diszperziók kolloidstabilitása is nagy fontossággal bír. Mind az ipari mind az orvosbiológiai felhasználások során kiemelt fontosságú a nanorészecske diszperziók nagy stabilitása, ugyanis a részecskék nem kívánt aggregációja az ipari folyamatok során az aktivitás csökkenéséhez és az eltarthatóság rövidüléséhez vezethet, míg orvos-biológiai körülmények között szintén komoly következményekkel járhat (pl. vérrögök kialakulása). A részecskék polielektrolitokkal történő funkcionálizálása javíthatja a kolloidstabilitást, továbbá hozzájárulhat a nanorészecskék sejtekbe való könnyebb bejutáshoz.

Összefoglalva, a heterogenizált antioxidáns rendszerek potenciálisan alkalmazhatók lehetnek mind orvos-biológiai, mind ipari folyamatokban, ahol a ROS, illetve a ROS által előidézett folyamatok elleni védelem fontos feladat. A természetes antioxidánsok negatív tulajdonságainak kiküszöbölésével ezek a formulált rendszerek ígéretes jelöltek a jövőbeni alkalmazásokban.

## II. Célkitűzés

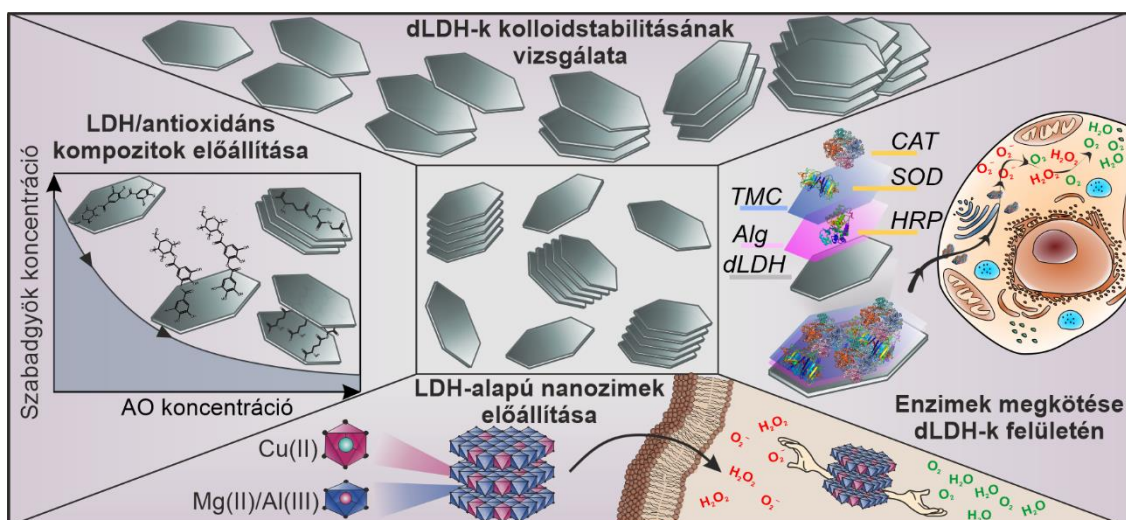
Doktori munkám elsődleges célja antioxidáns hatású nanokompozitok előállítása volt, LDH nanorészecskék és nanolapok felületének és szerkezetének módosításával. A célunk elérése érdekében több alpontot megfogalmaztunk:

Első lépésben célul tűztük ki delaminált LDH-k (dLDH-k) előállítását és a diszperzió kolloidstabilitásának vizsgálatát egyértékű ionok jelenlétében.

Második lépésben a korábban vizsgált dLDH-k felületének módosításával célunk volt polielektrolitok és antioxidáns enzimek (SOD, HRP, CAT) szekvenciális adszorpcióval történő rögzítése. Az enzimek felületen való rögzítésével, antioxidáns kaszkád létrehozása volt célunk, mely hatásosan tudja csökkenteni a ROS koncentrációt. Emellett, a polielektrolit rétegek adszorpciójával a részecskék kolloidstabilitásának hangolását továbbá az így előállított kompozitok sejtbe való bejutásának javítását tűztük ki célul.

Harmadik lépésben, LDH/antioxidáns kompozitok előállítását terveztük, különféle előállítási módszereket alkalmazva. A fázistiszta kompozitokkal célunk volt vizsgálni a szerkezet-antioxidáns aktivitás közötti kapcsolatot, melynek ismeretében maximalizálható lehet a kompozitok aktivitása.

Végül, egy LDH-alapú nanozim előállítását terveztük el, melyhez egy olyan szintézismódszer kidolgozása volt szükséges, melyben a  $Mg_3Al$  LDH-ban lévő kétértékű ionok egy részét vegyértékváltó fémionokra, mint pl.  $Cu(II)$  ionokra cseréljük.



1. ábra: A célkitűzések sematikus összefoglalása

### **III. Kísérleti rész**

Az LDH, dLDH és réztartalmú LDH (CMA) mintákat az együttes lecsapás módszerével állítottuk elő. Az LDH/dLDH diszperziók hidrodinamikai sugarát dinamikus fényszórásmérésekkel (DLS), míg felületi töltésüket elektroforetikus fényszórásmérésekkel (ELS) vizsgáltuk.

Az LDH-k sikeres szintézisét porröntgen diffraktometriával (XRD) vizsgáltuk, amely módszer alkalmas volt az antioxidánsok rétegek közé épülésének igazolására is. A részecskék méretének és morfológiájának vizsgálatára szilárd fázisban atomerőmikroszkópiás (AFM), pásztázó elektronmikroszkópiás (SEM) és transzmissziós elektronmikroszkópiás (TEM) méréseket végeztünk. A dLDH-k fajlagos felületét N<sub>2</sub> szorpciós izotermák felvételével határoztuk meg a BET módszer segítségével. A CMA minták a korábban felsorolt eszközökön túl röntgen fotoelektron-spektroszkópiával (XPS) és fluoreszcencia élettartam (FLIM) mérésekkel is vizsgáltuk.

Tannint (TA) és glutationt (GSH) az együttes lecsapás módszerével (LDH/TA/c és LDH/GSH/c) és adszorpcióval (LDH/TA/a és LDH/GSH/a) rögzítettük LDH részecskéken. A három antioxidáns enzimet (torma-peroxidáz (HRP), szuperoxid-dizmutáz (SOD) és kataláz (CAT)) dLDH-k felületére rögzítettük szekvenciális adszorpció módszerével, mely során az enzimeket polielektrolit rétegekkel választottuk el egymástól (alginát (Alg-t) és trimetil-kitozánt (TMC-t)). Az elkészült hibridet a dLDHaHtSC rövidítéssel jelöltük.

Az antioxidánsok rögzítésének igazolására számos módszert alkalmaztunk. A TA és GSH rögzülését a hordozón infravörös spektroszkópiával (IR), Raman mikroszkópiás és ultraibolya-látható-közeli infravörös spektroszkópiás (UV-VIS-NIR) mérésekkel igazoltuk, míg mennyiségük megállapításához tömegspektrométerrel kapcsolt termogravimetriai (TG-MS) méréseket végeztünk. Az enzimek adszorpcióját kisszögű röntgenszórással (SAXS) vizsgáltuk.

A TA és GSH tartalmú minták gyökfogó képességét a 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH) teszttel igazoltuk, míg az enzimaktivitást a Fridovich-, kataláz-, és gvajakol teszttel vizsgáltuk. A részecskék aktivitását HeLa sejteken is vizsgáltuk. A citotoxicitás vizsgálatára apoptózis/nekrózis teszttel (APO/NECRO), míg az intracelluláris ROS koncentráció vizsgálatára fluoreszcens méréseket végeztünk. A sejtbe való bejutás és a sejtben belüli DNS kettős szál törésre gyakorolt hatásukat direkt sztochasztikus optikai rekonstrukciós mikroszkópiás (dSTORM) mérésekkel vizsgáltuk.

#### IV. Új tudományos eredmények

**T1. Megállapítottuk a dLDH részecskék sófüggő aggregációjának mechanizmusát vizes diszperziókban. A kísérleti körülményektől függően az eredeti réteges szerkezet kialakulását a részecskék kártyavár szerű aggregációja követte. [4]**

A dLDH nanolapok visszarétegződését egyértékű sók jelenlétében vizsgáltuk. A visszarétegződés folyamatát alacsony ionerősségek mellett és rövid időintervallumon végzett DLS és turbiditás mérésekkel igazoltuk. A réteges szerkezet a nanolapok lap-lap orientációban történő aggregációjának következtében alakult ki, mely nem befolyásolta az LDH-k átmérőjét, csak a részecskék magasságát. Mivel a DLS a részecskék legnagyobb dimenziójának detektálására a legérzékenyebb, különösen a nanolapok esetén, így a részecskék magasságában bekövetkező változás nem befolyásolta a mért részecskék méretet. Ezzel szemben a turbiditás mérések sokkal érzékenyebbek a nem gömb alakú részecskék méretére. Így a növekvő magasság jelentős változást okozott a turbidításban a kezdeti „átlátszó” dLDH diszperzióhoz képest.

A visszarétegződést követő aggregációt a hidrodinamikai sugárban bekövetkező meredek növekedés jelezte. Az eredmények jó egyezést mutattak a Derjaguin, Landau, Verwey és Overbeek (DLVO) elmélettel. Az elektrolit koncentráció növelésével az elektromos kettős réteg közti tasztítás csökkent, míg a részecskék között fellépő van der Waals erők dominánsná váltak, mely kártyavár szerű aggregátumok kialakulását eredményezte.

A rendszer kinetikájának leírására bevezettük a kritikus koagulációs idő (CCT) fogalmát. A CCT-ket a kártyavár szerű aggregátumok képződésének kiindulási időpontjánál határoztuk meg. A CCT értéke a kiindulási elektrolit koncentráció által beállított ionerősséggel arányosan változott, az elektrolit koncentráció növelésével a CCT-k csökkenő tendenciát mutattak. Az alkalmazott részecskekoncentrációk közti különbség miatt, a DLS és turbiditás mérésekkel megállapított CCT értékek között jelentős különbség volt megfigyelhető, azonban a tendenciában nem volt változás.

Az elektrolit hozzáadása után a részecskék magassága jelentősen növekedett az időben. A CCT elérése után, nagy aggregátumok képződtek, jelezve ezzel az LDH részecskék kártyavár szerű aggregációját. Az XRD mérések tovább igazolták a réteges szerkezet kialakulását. Míg a dLDH-k esetén amorf anyagra jellemző diffraktogramot kaptunk, a visszarétegződés után kristályos anyagra jellemző reflexiók jelentek meg, ezzel igazolva az LDH részecskék képződését.

A rendszer kolloidstabilitását DLS és turbiditás mérésekkel vizsgáltuk, melyekből megállapítva a kritikus koagulációs koncentrációkat (CCC), a koncentrációkülönbség ellenére jelentős egyezést kaptunk. Az eredmények mindkét esetben jól leírhatóak a DLVO elmélettel. Kezdetben a diszperzió stabil volt, míg a CCC után gyors aggregáció következett be, a diszperzió instabillá vált.

**T2. Sikeresen állítottunk elő ROS hatástalanítására alkalmas nanokompozit szekvenciális adszorpcióval a SOD, HRP és CAT enzimek együttes rögzítésével dLDH-k felületén. A kompozit, mindamellett, hogy nagy kolloidstabilitással bírt, jelentős antioxidáns aktivitással rendelkezett. Átjutva a sejtmembránon képes volt visszaállítani a normál ROS/antioxidáns egyensúlyt és nem mutatott citotoxicitást. [3]**

Három antioxidáns enzimet, HRP-t, SOD-t és CAT-t rögzítettünk szekvenciális adszorpció módszerével dLDH részecskék felületén, melyek polielektrolit rétegek választottak el egymástól. Kezdetben, kis polielektrolit koncentrációnál nem volt változás, azonban a polielektrolit koncentráció további növelésével a felület töltése jelentősen változott, míg egy adott dózis után a felület ellentétes töltésűvé vált. A magas felületi töltés miatt a diszperzió stabil volt, nem következett be aggregáció. Az enzimek rögzítése nem befolyásolta a felületi töltést, a diszperzió stabil maradt. A SAXS eredmények igazolták, hogy a polielektrolit és enzim adszorpció az elektronsűrűség fluktuáció emelkedését eredményezte, tehát a felület diffúzabbá vált.

A polielektrolit rétegek kolloidstabilitást biztosítottak a rendszernek. A sófüggő aggregációs mérések során a diszperzió alacsony elektrolit koncentrációnál stabil maradt, míg a CCC után destabilizálódott, gyors aggregáció következett be. Az eredmények jól leírhatóak a DLVO elmélettel.

A kompozit jelentős enzimaktivitással bírt, képes volt mind a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, mind a szuperoxid gyökkanionok semlegesítésére. A SOD megtartotta aktivitását a dLDH részecskéken való rögzítés után, továbbá a gyökök felének semlegesítéséhez szükséges koncentráció (IC<sub>50</sub>) nem változott jelentősen. A CAT magasabb H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bontó képességet mutatott rögzítés után, mely jelentős előrelépés a korábban CAT rögzítésével foglalkozó kutatások eredményeihez képest. A HRP szintén magasabb affinitással bírt a szubsztrát iránt rögzítés után, mely a pozitív töltésű dLDHaHtSC részecskék gvajakol felé kifejtett nagyobb vonzó erejének volt tulajdonítható.

A dSTORM mérések alátámasztották, hogy a kompozit képes volt átjutni a sejtmembránon, mely a polielektrolit réteg által okozott pozitív töltésnek volt köszönhető. Tovább, az APO/NECRO teszt bizonyította, hogy a kompozit nem citotoxikus a HeLa sejtekre

nézve. A nanokompozit sikeresen csökkentette a mesterségesen előidézett ROS termelődést és így megvédte a sejteket a ROS okozta károsodásoktól. A DNS kettősszál törések jelenlétét kimutató mérések tovább igazolták, hogy a dLDHaHtSC kompozit képes volt visszaállítani a normál ROS/antioxidáns arányt, megvédve ezzel a sejteket a DNS károsodástól.

**T3. A TA és GSH LDH-n való rögzítését követően bebizonyosodott, hogy egyértelmű kapcsolat áll fenn a szerkezet és az aktivitás között. A kompozitok szerkezeti stabilitást kölcsönöztek az antioxidáns molekuláknak és elősegítették, hogy az antioxidánsok hosszú távon is megtartsák aktivitásukat. [2]**

A TA és a GSH molekulát sikeresen rögzítettük a LDH-k rétegei között és a részecskék felületén, mely során az antioxidánsok orientációja a felületen szoros összefüggésben volt az alkalmazott szintézis módszerrel. A GSH beépült az LDH rétegei közé az együttes lecsapás módszerével végzett szintézis során, míg a felületen rögzült az adszorpciós módszer esetén. Ezzel ellentétben a TA mindkét esetben az LDH részecskék felületén rögzült.

A TA felülethez képest kialakult orientációja szoros összefüggésben volt az alkalmazott szintézis módszerrel; továbbá szerkezete nem sérült az együttes lecsapás során alkalmazott bázikus körülmények között. Az IR mérések kimutatták, hogy a TA az együttes lecsapás módszer alkalmazása esetén a felülettel párhuzamosan, míg adszorpciós módszer esetén arra merőlegesen rögzült.

A TA esetén a felületi orientáció jelentősen befolyásolta az antioxidáns gyökfogó képességét. A fenolos –OH csoportok könnyebben hozzáférhetőek voltak merőleges orientáció esetén. Ennek eredményeként, az LDH/TA/a magasabb aktivitással bírt, mint a szabad TA, míg párhuzamos rögzülés esetén az aktivitás jelentős mértékben csökkent. A GSH tartalmú minták esetén a rögzítés nem befolyásolta jelentősen a gyökfogó aktivitást, a kompozitok a szabad GSH-hoz hasonló aktivitással bírtak.

Az aktivitás mellett az antioxidánsok rögzítése szerkezeti stabilitásukat is befolyásolta. A szabad GSH jelentősen nagyobb aktivitással bírt 1 hónap elteltével, mint a rögzített molekula. A GSH esetén mért magasabb aktivitás a GSH bomlástermékeiből volt származtatható, míg a rögzített GSH megőrizte szerkezetét, így eredeti aktivitását is. Továbbá kijelenthető, hogy az LDH/TA/a többszöri felhasználás után is megőrizte aktivitását, mely kiterjesztheti ipari felhasználhatóságát.

**T4. Sikeresen állítottunk elő SOD és CAT enzimutánzó aktivitással bíró nanorészecskéket, az Mg<sub>3</sub>Al LDH szerkezetében megtalálható Mg(II) ionok Cu(II) ionokra való részleges cseréjével. A nanorészecskék jelentős enzimatis aktivitással**



**rendelkeztek, továbbá intracelluláris ROS és szuperoxid gyökfogó képességet is mutattak.**

**[1]**

Mg<sub>3</sub>Al LDH együttes lecsapás módszerével történő előállításakor lehetővé vált a Mg(II) ionok részleges cseréje Cu(II) ionokra, melyet számos mérési módszerrel igazoltunk. Az XRD által megállapított megnövekedett rétegtávolságok izomorf szubsztitúcióra utaltak, mely szerkezeti változást a Raman mérések során, az M-O-M rezgéshez tartozó sáv eltolódása is igazolt. Az XPS mérések szintén alátámasztották a szerkezetbe beépült –Cu(OH)<sub>2</sub>– egységek jelenlétét, továbbá az Al 2p kötési energiájában bekövetkező eltolódás is a Cu(II) ionok beépülése következtében megváltozott kémiai környezetre utalt. Az izomorf szubsztitúció a fluoreszcencia élettartamot is befolyásolta. A Cu(II) ionok beépülése változást idézett elő a felületi hibahelyekben és a felületi töltéssűrűségben, ezzel rövidebb fluoreszcencia élettartamot eredményezve.

A Cu(II) ionok beépítésével kataláz és szuperoxid dizmutáz aktivitással bíró nanozimeket állítottunk elő. A szabad enzimhez képest a nanozim aktivitása alacsonyabb, azonban a CMA minták jelentős SOD aktivitással bírtak, továbbá kataláz aktivitásuknak köszönhetően képesek voltak a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bontására is.

A réztartalmú nanorészecskék ROS semlegesítő hatását intracelluláris körülmények között is vizsgáltuk. Első lépésben a citotoxicitás vizsgálatok kimutatták, hogy a nanorészecskék nem mutatnak toxikus hatást a sejtekre. CMA-val való kezelés után az apoptotikus/nekrotikus sejtek mennyisége elhanyagolható volt az élő sejtekhez képest. A CMA-val történő előkezelést követően mind a ROS, mind a szuperoxid gyökkanionok koncentrációja csökkent a sejtekben, tehát a nanorészecskék képesek voltak gátolni az élőszervezetekre káros molekulák képződését.

## **V. Gyakorlati alkalmazások**

A dLDH részecskék kolloidstabilitásának részletes tanulmányozása fontos információkat biztosított a dLDH nanolapok visszarétegződésének folyamatáról. A visszarétegződés folyamatáról kapott információk fontos eredmények a különböző környezetkárosító hatások csökkentése szempontjából, ugyanis számos szennyező (pl. arzenit, arzenát, nitrát) eltávolítható az LDH rétegei közé történő beépítéssel.

Az LDH-alapú antioxidáns nanokompozitok potenciálisan felválthatják a jelenleg használt drága és érzékeny molekuláris antioxidánsokat a különböző ipari és orvos-biológiai területeken. A nagy stabilitással bíró LDH/GSH és LDH/TA kompozitok alkalmasak lehetnek például kozmetikumokban és csomagolóanyagokban, ahol az öregedésgátló és élettartam növelő tulajdonságok kritikus szempontok az antioxidánsokkal szemben.

A három enzimet tartalmazó dLDHaHtSC hatékony ROS semlegesítőként lehet alkalmazható orvos-biológiai folyamatokban, melyet szuperoxid gyökkanion és H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> semlegesítő hatásában nyilvánul meg. Hatékony kezelés lehet a napjainkban egyre elterjedtebb gyulladásoz bélbetegség kezelésére.

A CMA nanorészecskék stabil diszperziója szintén alkalmazható lehet különféle orvos-biológiai területeken, melyeknél az antioxidáns hatás gyorsíthatja a gyógyulási folyamatot. Ilyen kezelés lehet például az implantátumokon kialakított antioxidáns réteg vagy a sebkezelés gyorsítására alkalmazott antioxidáns kezelések.

Összefoglalva szükség van az új ROS hatástalanító anyagok fejlesztésére mind ipari mind orvos-biológiai felhasználás szempontjából. Így a disszertációban bemutatott antioxidánst tartalmazó rendszerek jelentős érdeklődésre tarthatnak számot mind ipari mind akadémiai körökben.

## VI. Tudományos közlemények listája

MTMT ID: 10073920

### Az értekezés témaköréhez tartozó publikációk

---

- Adél Szerlauth**, Tamara Madácsy, Gergely Ferenc Samu, Péter Bíró, Miklós Erdélyi, Gábor Varga, Zhi Ping Xu, József Maléth, István Szilágyi  
*Reduction of intracellular oxidative stress with copper incorporated layered double hydroxide*  
Chemical Communications 60 (2024) 1325  
DOI: 10.1039/D3CC05762C  
Független hivatkozások: 0  
SJR indikátor: Q1  
IF: 4,9
- Adél Szerlauth**, Zsuzsanna D. Kónya, Gréta Papp, Zoltán Kónya, Ákos Kukovecz, Márton Szabados, Gábor Varga, István Szilágyi  
*Molecular orientation rules the efficiency of immobilized antioxidants*  
Journal of Colloid and Interface Science 632 (2023) 260  
DOI: 10.1016/j.jcis.2022.11.056  
Független hivatkozások: 2  
SJR indikátor: Q1  
IF: 9,9
- Adél Szerlauth**, Árpád Varga, Tamara Madácsy, Dániel Sebők, Sahra Bashiri, Mariusz Skwarczynski, Istvan Toth, József Maléth, István Szilágyi  
*Confinement of Triple-Enzyme-Involved Antioxidant Cascade in Two-Dimensional Nanostructure*  
ACS Materials Letters 5 (2023) 565  
DOI: 10.1021/acsmaterialslett.2c00580  
Független hivatkozások: 2  
SJR indikátor: Q1  
IF: 11,4
- Adél Szerlauth**, Edina Balog, Dóra Takács, Szilárd Sáringer, Gábor Varga, Gábor Schusztter, István Szilágyi  
*Self-assembly of delaminated layered double hydroxide nanosheets for the recovery of lamellar structure*  
Colloid and Interface Science Communications 46 (2022) 100564  
DOI: 10.1016/j.colcom.2021.100564  
Független hivatkozások: 4  
SJR indikátor: Q1  
IF: 4,5

### Az értekezés témaköréhez nem kapcsolódó publikációk

---

1. **Adél Szerlauth**, Szilárd Varga, István Szilágyi

*Molecular antioxidants maintain synergistic radical scavenging activity upon co-immobilization on clay nanoplatelets*

ACS Biomaterials Science & Engineering 9 (2023) 5622

DOI: 10.1021/acsbmaterials.3c00909

SJR indikátor: Q1

Független hivatkozások: 0

IF: 5,7

2. Ibolya Zita Papp, **Adél Szerlauth**, Tímea Szűcs, Péter Bélteky, Juan Fernando Gomez Perez, Zoltán Kónya, Ákos Kukovecz

*Fabrication and characterization of a bifunctional zincoxide/multiwalled carbon nanotube/poly (3, 4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate composite thin film*

Thin Solid Films 778 (2023) 139908

DOI: 10.1016/j.tsf.2023.139908

SJR indikátor: Q2

Független hivatkozások: 0

IF: 2,1

3. Bojana Katana, Kata Panna Kókai, Szilárd Sáringer, **Adél Szerlauth**, Dóra Takács, István Szilágyi

*The Influence of Solvents and Colloidal Particles on the Efficiency of Molecular Antioxidants*

Antioxidants 12 (2022) 99

DOI: 10.3390/antiox12010099

SJR indikátor: Q1

Független hivatkozások: 3

IF: 7,0

4. Marko Pavlovic, **Adél Szerlauth**, Szabolcs Muráth, Gábor Varga, István Szilágyi

*Surface modification of two-dimensional layered double hydroxide nanoparticles with biopolymers for biomedical applications*

Advanced Drug Delivery Reviews 191 (2022) 114590

DOI: 10.1016/j.addr.2022.114590

SJR indikátor: Q1

Független hivatkozások: 20

IF: 16,1

5. Nizar B Alsharif, Gergely F Samu, Szilárd Sáringer, **Adél Szerlauth**, Dóra Takács, Viktoria Hornok, Imre Dékány, István Szilágyi

*Antioxidant colloids via heteroaggregation of cerium oxide nanoparticles and latex beads*

Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 216 (2022) 112531

DOI: 10.1016/j.colsurfb.2022.112531

SJR indikátor: Q1

Független hivatkozások: 5

IF: 5,8

6. **Adél Szerlauth**, Lilla Szalma, Szabolcs Muráth, Szilárd Sáringer, Gábor Varga, Li Li, István Szilágyi

*Nanoclay-based sensor composites for the facile detection of molecular antioxidants*

---

Szegedi Tudományegyetem

Analyst 147 (2022) 1367

DOI: 10.1039/D1AN02352G

Független hivatkozások: 6

SJR indikátor: Q1

IF: 4,2

7. Bojana Katana, Dóra Takács, **Adél Szerlauth**, Szilárd Sáringer, Gábor Varga, Andrej Jamnik, Felix D Bobbink, Paul J Dyson, István Szilágyi

*Aggregation of halloysite nanotubes in the presence of multivalent ions and ionic liquids*

Langmuir 37 (2021) 11869

DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c01949

Független hivatkozások: 7

SJR indikátor: Q1

IF: 4,331

8. Dóra Takács, Bojana Katana, **Adél Szerlauth**, Dániel Sebők, Matija Tomsic, István Szilágyi

*Influence of adsorption of ionic liquid constituents on the stability of layered double hydroxide colloids*

Soft Matter 17 (2021) 9116

DOI: 10.1039/D1SM01074C

Független hivatkozások: 4

SJR indikátor: Q1

IF: 4,046

9. Szabolcs Muráth, **Adél Szerlauth**, Dániel Sebők, István Szilágyi

*Layered double hydroxide nanoparticles to overcome the hydrophobicity of ellagic acid: An antioxidant hybrid material*

Antioxidants 9 (2020) 153

DOI: 10.3390/antiox9020153

Független hivatkozások: 15

SJR indikátor: Q2

IF: 6,313

10. **Adél Szerlauth**, Szabolcs Muráth, István Szilágyi

*Layered double hydroxide-based antioxidant dispersions with high colloidal and functional stability*

Soft Matter 16 (2020) 10518

DOI: 10.1039/D0SM01531H

Független hivatkozások: 9

SJR indikátor: Q1

IF: 3,679

11. **Adél Szerlauth**, Szabolcs Muráth, Sándor Viski, István Szilágyi

*Radical scavenging activity of plant extracts from improved processing*

Heliyon 5 (2019) e02763

DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02763

Független hivatkozások: 24

SJR indikátor: Q1

IF: —

12. Szilárd Sáringer, Rita Achieng Akula, **Adél Szerlauth**, István Szilágyi

*Papain adsorption on latex particles: charging, aggregation, and enzymatic activity*

Journal of Physical Chemistry B 123 (2019) 9984

DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b08799

SJR indikátor: Q1

Független hivatkozások: 12

IF: 2,857

---

### Tudományometriai adatok

---

Összes referált közlemény: 16	az értekezéshez kapcsolódóan: 4
Összesített impakt faktor: 92,826	az értekezéshez kapcsolódóan: 30,700
Összesített független hivatkozás: 113	az értekezéshez kapcsolódóan: 8

---

### Konferencia megjelenések az értekezés témakörében

---

1. **Adél Szerlauth**, Árpád Varga, Tamara Madácsy, József Maléth, István Szilágyi (előadás)  
*Confinement of triple enzyme cascade in layered double hydroxide-based nanocomposites to prevent oxidative stress*  
96<sup>th</sup> ACS Colloid and Surface Science Symposium (2022) Golden, Colorado, USA
2. **Adél Szerlauth**, Árpád Varga, Tamara Madácsy, József Maléth, István Szilágyi (előadás)  
*Immobilization of antioxidant enzymes on layered double hydroxide nanosheets to prevent oxidative stress*  
18<sup>th</sup> European Student Colloid Conference (2022) Szeged, Magyarország
3. **Adél Szerlauth**, Edina Balog, Dóra Takács, Szilárd Sáringi, Gábor Varga, Gábor Schusztér, István Szilágyi (előadás)  
*Aggregation study on restacking ability of layered double hydroxide nanosheets*  
The 33<sup>rd</sup> Australian Colloid and Surface Science Student Conference (2022) Mawson Lakes, Ausztrália (online)
4. **Adél Szerlauth**, Edina Balog, Dóra Takács, Szilárd Sáringi, Gábor Varga, Gábor Schusztér, István Szilágyi (előadás)  
*Aggregation study on the recovery of the lamellar structure of layered double hydroxides*  
35<sup>th</sup> Conference of the European Colloid & Interface Society (2021) Athen, Görögország (online)

---

### Konferencia megjelenések az értekezés témakörétől eltérő témakörben

---

1. **Adél Szerlauth**, Szilárd Varga, István Szilágyi (poszter)  
*Heterogenization of synergistic antioxidants on 2D nanoparticles*  
12<sup>th</sup> International Colloids Conference (2023) Palma de Mallorca, Spanyolország
2. **Adél Szerlauth**, Adél Anna Ádám, Gábor Varga, István Szilágyi (poszter)  
*Layered double hydroxide-based hybrid colloids for catalytic transfer hydrogenation*  
11<sup>th</sup> International Colloids Conference (2022) Lisszabon, Portugália

3. **Adél Szerlauth**, Szabolcs Muráth, István Szilágyi (poszter)  
*Design of an efficient antioxidant composite of high functional and colloidal stability*  
Geneva Colloids (2021) online
4. **Adél Szerlauth**, Lilla Szalma, Szabolcs Muráth, István Szilágyi (előadás, társszerző)  
*Paper-based antioxidant detection using the CUPRAC assay*  
ACS Spring meeting (2021) online
5. **Adél Szerlauth**, Szabolcs Muráth, Dániel Sebők, István Szilágyi (előadás)  
*Ellagsav alapú réteges kettős hidroxid hibridek antioxidáns aktivitása*  
XLII. Kémiai Előadói Napok (2019) Szeged, Magyarország