

Atomi rétegleválasztással előállított fém-oxid hordozók a heterogén katalízisben

Doktori (Ph.D.) értekezés

Ballai Gergő

Témavezetők:

Dr. Sági András

Dr. Haspel Henrik

Környezettudományi Doktori Iskola



Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék

Természettudományi és Informatikai Kar

Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2026

1. Előzmények és célkitűzések

A katalízis a modern kémiai tudomány és ipar egyik alapvető pillére. Katalizátorok nélkül nem valósulhatnának meg azok a hatékony, energia- és anyagtakarékos folyamatok, amelyekre a vegyipar, a gyógyszeripar, az energetika és a környezetvédelmi technológiák épülnek. A heterogén katalízis különösen fontos szerepet játszik a fenntarthatóságban, hiszen hozzájárul a károsanyagkibocsátás csökkentéséhez, a tisztább energiaátalakításhoz és a szennyezőanyagok lebontásához. A hatékony katalizátorok fejlesztésének alapját azonban a reakciómechanizmusok és a katalizátorok szerkezetének mélyreható ismerete jelenti, amelyhez olyan előállítási módszerek szükségesek, amelyek atomnyi pontossággal teszik szabályozhatóvá a felületek összetételét és morfológiáját.

E célra az atomi rétegleválasztás (ALD) különösen ígéretes technika, mivel önkorlátozó felületi reakcióin alapulva ciklusonként akár egyetlen atomi réteg leválasztását is lehetővé teszi. Az ALD nagyfokú precizitást és reprodukálhatóságot biztosít a fém-oxid rétegek, nanorészecskék és kompozit struktúrák kialakításában, ami kulcsfontosságú a katalitikus aktivitás, stabilitás és szelektivitás finomhangolásához. Ez a módszer így nemcsak alapkutatási szempontból jelentős, hanem közvetlenül hozzájárulhat a fenntarthatóbb és hatékonyabb katalitikus rendszerek fejlesztéséhez is.

Disszertációm elkészítése során célul tűztük ki olyan heterogén katalizátorok előállítását és vizsgálatát, amelyek szerkezete, fém-oxid rétegvastagsága és nemesfém nanorészecske mérete ALD segítségével pontosan kontrollálható. Kutatásaink során a heterogén katalízis három fő ágában teszteltük az általunk előállított katalizátorokat. Ilyen az elektrokatalízis, ahol a metanol oxidációs reakció révén vizsgáltuk a Pt nanorészecskék mennyiségének és eloszlásának hatását, valamint a TiO_2 hordozórétegek szerepét az aktivitás és a katalizátor mérgezéssel való ellenállásának alakulásában. A fotokatalízis, amelyben ALD-vel bevont poliHIPE struktúrák segítségével tanulmányoztuk a fém-oxid rétegek növekedésének paraméterfüggését, illetve a biszfenol-A lebontásában mutatott aktivitásukat és stabilitásukat. Valamint a termikus katalízis, amely során az etanolbontási reakciót alkalmazva vizsgáltuk a Pt/ CeO_2 és Pt/ ZnO/CeO_2 rendszerekben a nanorészecskék növekedési viselkedését és a fém–hordozó kölcsönhatások szerepét a reakcióutak és a szelektivitás alakításában. Munkánk összességében arra irányult, hogy hozzájáruljak a katalitikus mechanizmusok jobb megértéséhez, valamint olyan precízen szabályozott, környezetbarát és gazdaságos katalizátorok fejlesztéséhez, amelyek alkalmasak a jövő fenntartható kémiai technológiáinak támogatására.

2. Kísérleti rész

A kísérleteink során a rétegeket és nanorészecskéket egy Beneq TFS-200 típusú ALD berendezéssel állítottuk elő. A Pt/CP és Pt/TiO₂/CP elektródokat AvCarb P75 szénpapír hordozó felületére választottuk le. A titánát leválasztásához TiCl₄ és H₂O, a platina nanorészecskékhez MeCpPtMe₃ és O₂ prekursorokat használtunk. Minden egyes ciklusnál 10 másodperces tartózkodási időt és 20 másodperces nitrogénöblítést alkalmaztunk. Az eljárás során először 25 ciklus titán-dioxidot, majd 20 ciklus platinaréteget növesztettünk, így létrehozva a Pt/TiO₂/CP kompozitot. Összehasonlításképp titánmentes, csak platínát tartalmazó Pt/CP elektródokat is előállítottunk. A felvitt katalizátor mennyiségét a szénpapír szintézis előtti és utáni tömegkülönbségéből számítottuk ki. A TiO₂-réteg borítottsága 0,019 mg·cm⁻², míg a Pt borítottság 0,277 mg·cm⁻² volt a titánmentes, és 0,116 mg·cm⁻² a TiO₂-vel bevont minták esetében. Véleményünk szerint a kisebb platinatartalom az oxidréteg magasabb felületi energiája okozza, ami finomabb szemcseeloszlást eredményezett. Referenciaként poliol módszerrel előállított, $4,4 \pm 0,7$ nm átmérőjű Pt nanorészecskéket cseppentettünk fel ugyanarra a hordozóra.

A kutatásaink második szakaszában fém-oxid/poliHIPE (PH) szerkezetek előállítása történt, amelyek 3D-ben összekapcsolt, nyitott pórusrendszert tartalmaztak. A szlovén kutatótársak olaj-víz-olaj (O/W/O) ülepedéspolimerizációval készítettek poliakrilamid (PAAM) gömböket. Az akrilamid vizes oldatába toluolt keverték, így létrehozva egy nagy belső fázisú emulziót (HIPE), majd a cseppeket meleg szilikon/paraffinolaj közegbe injektálták, ahol szabadgyökös polimerizációval megszilárdultak. A tisztított és szárított gömbök átlagos átmérője $1,5 \pm 0,5$ mm volt, porozitásuk megközelítette a 90%-ot. A mért sűrűségadatokból számított pórusszerkezet alapján a vázsűrűség 0,92 g·cm⁻³, a poliHIPE sűrűsége 0,09 g·cm⁻³ körül alakult. A mikroszerkezetet 10 ± 3 μm üreg- és 3 ± 1 μm összekötő nyílásméret jellemezte, a felszín felé nyitott pórusokkal.

Ezt követően a kapott PAAM-alapú PH gömböket ALD-módszerrel fém-oxid nanokompozitok előállítására használtuk. A TiO₂-, Al₂O₃- és ZnO-rétegeket a pórusfalak felületén található amidcsoportokhoz kapcsolódva növesztettük, a megfelelő prekursorok (TiCl₄/H₂O, TMA/H₂O és DEZ/H₂O) segítségével. A háromdimenziós, összekapcsolt pórusok kulcsfontosságúak voltak, mivel lehetővé tették a gáz halmazállapotú prekursorok szabad diffúzióját a teljes szerkezetben, ezáltal pontosan kontrollálhatóvá vált a rétegvastagság. A TiO₂-réteg növekedését négy különböző ciklusszám mellett (50, 100, 250 és 500 ciklus)

vizsgáltuk, a ciklusonkénti növekedés (GPC) és a morfológiai változások tanulmányozása érdekében.

A kutatásaink utolsó szakaszában Pt/CeO₂ és Pt/ZnO/CeO₂ katalizátorokat készítettünk szilíciumlapokra. A szubsztrátokat acetonos ultrahangos tisztítással előkezeltük, majd 10 mg·mL⁻¹ CeO₂ nanorészecske szuszpenziót vittünk fel rájuk forgatva bevonásos eljárással, négy részletben. A megszáritott mintákra ALD-vel ZnO rétegeket és Pt nanorészecskéket növesztettünk, 170 °C-on, illetve 300 °C-on. A ZnO előállításához DEZ/H₂O, a Pt-hoz MeCpPtMe₃/O₂ prekursorokat alkalmaztunk.

Az előállított katalizátorokat többféle analitikai módszerrel jellemeztük. A szerkezetet és morfológiát transzmissziós és pásztázó elektronmikroszkópiával (TEM, SEM) vizsgáltuk. A TEM-méréseket FEI Tecnai G2 20 X-Twin készüléken, 200 kV gyorsítófeszültséggel végezték, a pormintákat alkoholos szuszpenzióból rézrácsra cseppentve, a tömbi mintákat pedig epoxiba ágyazva és ultramikrotómmal 20 nm vastag szeletekre vágva. A SEM vizsgálatokat Thermo Fisher Apreo C mikroszkóppal végeztük 10–20 kV-on, az elemösszetételt pedig egy Bruker Quantax EDS detektorral határoztuk meg. A kristályszerkezetet röntgendiffraktometriával (XRD) vizsgáltuk Rigaku Miniflex II, illetve Philips PW1830 diffraktométerrel Cu K α sugárzás mellett, amelyekből a primer krisztallitméretet, a Scherrer-egyenlettel számoltuk ki. A fémionok arányát induktív csatolású plazma tömegspektrometriával (ICP-MS) határoztuk meg Agilent 7900 készüléken, királyvizes feltárás után. A PAAM/fém-oxid kompozitok oxidtartalmát termogravimetriás (TG) vizsgálatral mértük, egy TA Instruments Q500 berendezéssel, 800 °C-ig hevítve.

A rétegezettség és a fém-oxid eloszlásának elemzésére röntgenfotoelektron-spektroszkópiát (XPS) alkalmaztunk. A méréseket Kratos Analytical XSAM800 és Supra+ készülékeken végeztük Mg K α illetve Al K α forrásokkal. A katalizátorok felületén lezajló reakciófolyamatokat in-situ diffúz reflexiós infravörös spektroszkópiával (DRIFTS) vizsgáltuk Bruker Invenio-R spektrométerrel, etanol adszorpciója és reakciója közben.

Az elektrokémiai vizsgálatok során a Pt/CP katalizátorainkat metanoxidációs reakcióban (MOR) teszteltük, egy háromelektrodos PTFE cellában, ACM Instruments Gill AC potenciosztáttal. Munkaelektrodként az ALD-vel bevont szénpapírokat, referenciaelektrodként Ag/AgCl elektródot, ellenelektrodként platinadrótot alkalmaztunk. A mérések 0–1,2 V (RHE) tartományban, 10 mV·s⁻¹ pásztázási sebességgel zajlottak 0,5 M H₂SO₄ és 0,5 M H₂SO₄ + 0,5 M metanol elektrolitban. Az elektrokémiai aktív felületet (ECSA) a hidrogénadszorpció

töltésből számítottuk ki, míg a katalizátor mérgezéssel szembeni toleranciáját az előre- és hátrapasztázási csúcsáramok arányából (i_f/i_b) határoztuk meg. A stabilitást 4000 másodperces kronoamperometriás méréssel értékeltük ki.

A fém-oxid/PH katalizátoraink fotokatalitikus aktivitását egy modellrendszerben vizsgáltuk, ahol a fotokatalitikus oxidációhoz biszfenol A-t tartalmazó vizes oldatot használtuk, 20 °C-on, légköri nyomáson, UV-A tartományban működő 150 W-os higanygőzlámpa megvilágítása alatt. A PH nanokompozit gyöngyöket (7 m/m% TiO_2) szuszpenzióba kevertük, majd a reakcióelegyből vett mintákat HPLC-vel elemeztük.

A gázfázisú etanolbontási vizsgálatokat rozsdamentes acél, fűthető batch reaktorban végeztük 573 K-on, 25 mbar etanolt tartalmazó etanol-nitrogén keverékben, amelyet egy pneumatikus pumpával keringettünk. A reakció során keletkező termékeket egy Agilent 6890N GC-be épített FID/TCD detektorokkal követtük. A konverziót és szelektivitást a szénmérleg alapján számítottuk ki.

3. Új tudományos eredmények

T1. Igazoltuk, hogy az atomi rétegleválasztás módszerrel kötőanyag mentes Pt- és Pt/ TiO_2 -alapú elektrokatalizátorok állíthatók elő szénpapír hordozón, amelyek kiemelkedő elektrokatalitikus aktivitással rendelkeznek a metanoloxidációs reakcióban.

Megállapítottuk, hogy az atomi réteg leválasztás alkalmas módszer platina nanorészecskék jól elosztott előállítására szénpapír és titanát bevonatos szénpapír hordozón, ahol mind a platinát, mind a TiO_2 -t közvetlenül ALD segítségével választottuk le, mindezt bármilyen ragasztó vagy ionomer felhasználása nélkül. Vizsgáltuk az így előállított elektródok morfológiáját és kristályszerkezetét, és megállapítottuk az elektrokatalitikus tulajdonságaikat, valamint a metanol-oxidációs aktivitásukat ciklikus voltammetriás mérések segítségével.

Kimutattuk, hogy a TiO_2 bevonat jelenléte jelentős hatással van a platina leválasztási hatékonyságára, diszpergáltságára és katalitikus működésére, valamint csökkenti a CO-intermedierek okozta mérgezést, ami különösen fontos a DMFC-k anódreakcióiban. Az új katalizátor elektrokémiai aktív felülete tömegaktivitása egy nagyságrenddel meghaladta a hagyományos nedves kémiai módszerrel szintetizált referencia katalizátorét. Továbbá az i_f/i_b arány növekedése, 0,69-ről 0,78-ra jobb metanol-oxidációs tulajdonságokra enged következtetni. Emiatt és a kedvezőbb előállítási költségeik miatt az oxid hordozós platina

katalizátorok alternatívát jelenthetnek a jelenleg is használt Pt/Ru ötvözet katalizátorokkal szemben.

T2. Szabályozott rétegvastagságú fém-oxid/poliHIPE kompozitokat állítottunk elő atomi rétegleválasztásos módszerrel.

Elsőként mutattuk be, hogy a nagy fajlagos felületű akrilamid alapú poliHIPE (polymerized high internal phase emulsion) gyöngyök felületére ALD alkalmazásával, a pórusok teljes felületét beborító, nanométer pontossággal szabályozott vastagságú oxidrétegek (TiO_2 , ZnO , Al_2O_3) vihetők fel. Megfelelően alkalmazva, az ALD módszer lehetővé tette a fém-oxid bevonatok vastagságának pontos szabályozását a poliHIPE mátrix teljes felületén, lehetővé téve az oxid fázis teljes hozzáférhetőségét és így a reakciókban való felhasználóságát. A poliHIPE mátrixra felvitt oxidok mennyisége körülbelül 2-19 m/m% között van TiO_2 esetében, és körülbelül 26 és 16 m/m% ZnO és Al_2O_3 esetében.

T3. Igazoltuk az ALD-vel előállított fém-oxid/poliHIPE kompozitok fotokatalitikus aktivitását biszfenol A lebontásában.

Bebizonyítottuk, hogy az ALD-vel kialakított TiO_2 -poliHIPE kompozit fotokatalitikus aktivitása nagyságrenddel kedvezőbb a hagyományos Pickering-módszerrel készült kompozitokhoz képest. A biszfenol A (BPA) vizes közegben történő fotokatalitikus oxidációja során az ALD- TiO_2 kompozit, ugyanannyi idő alatt mintegy ~5-ször több BPA lebontására volt képes. Ez egyértelműen igazolja, hogy a homogén, folytonos oxidbevonat és az ebből fakadó jó hozzáférhetőség kulcsszerepet játszik a hatékony fotokatalitikus működésben.

T4. Platina/cink-oxid/cérium-oxid katalizátorokat állítottunk elő atomi rétegleválasztásos módszerrel.

ALD segítségével előállítottunk CeO_2/Pt és $\text{CeO}_2/\text{ZnO}/\text{Pt}$ katalizátorokat szilícium hordozón. TEM és ICP-MS vizsgálatokkal igazoltuk, hogy a leválasztott platina mennyisége és nanorészecskemérete szorosan összefügg az ALD ciklusszámmal és a hordozó felületi állapotával. XPS eredményeink kimutatták a Pt- CeO_2 és Pt- ZnO határfelületek kialakulását, és feltárták ezek hatását a Pt oxidációs állapotára és a $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ arányra.

T5. Feltártuk a cink-oxid rétegvastagság szerepét a platina leválasztásában és növekedési mechanizmusában.

Megállapítottuk, hogy a nem folytonos cink-oxid bevonatok (3–5 ciklus) gátolják a platina felületi nukleációját. A ZnO kis szigetei elfoglalják azokat az oxigénhiányos hibahelyeket, amelyeken a platina prekursor elsőként adszorbeálódna. 10 ciklus felett azonban a ZnO réteg folytonosabbá válik, így a platina újra nagyobb mennyiségben választható le. Eredményeink újszerű magyarázatot adnak a Pt és ZnO konkurens nukleációjára CeO₂ felületen, és új információkkal szolgálnak a nanorészecske növekedés mechanizmusáról.

T6. Feltártuk a Pt/ZnO/CeO₂ határfelületek katalitikus szerepét az etanolbontási reakció mechanizmusában.

Az 573 K hőmérsékleten végzett etanolbontási kísérletekkel bizonyítottuk, hogy a ZnO rétegvastagsága döntően meghatározza a Pt–ZnO–CeO₂ határfelületek kialakulását és azok katalitikus viselkedését. Alacsony ZnO borítottság mellett (3–5 ciklus) a hármass határfelület kialakulása több mint kétszeresére növelte az etanolkonverziót és fokozta a C₁ termékek (pl. CH₄, CO) szelektivitását. Magas ZnO borítottság (30 ciklus) esetén a felületet már túlnyomórészt Pt/ZnO határfelületek uralták, amelyek gyengítették a C–C kötés hasítási képességet, és lecsökkentették a CH₄ és CO képződését. Az in-situ DRIFTS vizsgálatok kimutatták, hogy Pt–ZnO felületeken az acetát intermedierek képződése gátolt, miközben az aldehid intermedierek váltak dominánsá. Ezek az eredmények egyértelműen igazolják, hogy a precízen szabályozott határfelületek döntő szerepet játszanak az etanolbontási reakció útvonalainak és szelektivitásának meghatározásában.

4. Summary:

In my doctoral research, we developed and characterised heterogeneous catalytic systems in which metal oxides and noble metals were precisely deposited by atomic layer deposition (ALD). Our goal was to demonstrate how ALD's exceptional controllability enables the design of catalysts with tailored nanostructures and interfaces, resulting in improved activity, selectivity, and stability in electrochemical, photocatalytic, and thermal reactions.

First, we fabricated Pt based electrocatalysts on porous carbon paper for methanol oxidation. Using ALD, we deposited both TiO_2 layers and Pt nanoparticles uniformly across the carbon substrate. Structural analyses (TEM, SEM, XRD) confirmed highly homogeneous Pt dispersion and strong adhesion. Electrochemical testing showed enhanced methanol oxidation activity and improved CO tolerance due to the metal oxide layer. The catalysts also retained their performance over repeated cycling, demonstrating that ALD can produce durable, binder-free electrocatalysts directly on conductive supports.

Next, through international collaboration, oxide/polymer hybrid photocatalysts by coating polyHIPE templates with conformal TiO_2 , ZnO , and Al_2O_3 layers, were developed. Microscopy and XPS depth profiling verified complete oxide coverage within the porous network. These hierarchical materials combined high surface areas with enhanced light absorption and showed substantially faster bisphenol A degradation under UV irradiation compared to similar catalysts prepared by the Pickering method.

Finally, we studied thermocatalytic ethanol decomposition over ALD-grown Pt/ CeO_2 and Pt/ ZnO/CeO_2 systems. We established that Pt growth follows altered nucleation and aggregation in the presence of ZnO layer over the CeO_2 's surface. XPS revealed that ZnO deposition partially reduced Ce^{4+} to Ce^{3+} and strengthened metal-support interactions, strongly affecting catalytic behavior. Pt/ CeO_2 catalysts with optimized cycle numbers showed the highest conversion rates, while intermediate ZnO coverages further enhanced ethanol conversion and product selectivity. These findings underline the importance of atomic-scale interface engineering in tuning reaction pathways and improving catalytic efficiency.

5. A doktori értekezés alapját képző közlemények

1. Binder-Free Construction of a Methanol Tolerant Pt/TiO₂/Carbon Paper Anode by Atomic Layer Deposition

Gergő Ballai, Tamás Gyenes, Henrik Haspel, Livia Vásárhelyi, Imre Szent, Dániel Sebők, Zoltán Kónya and Ákos Kukovecz

Catalysts 11.2 (2021): 154.

<https://doi.org/10.3390/catal11020154>

IF: 4,0

2. Highly Porous Polymer Beads Coated with Nanometer-Thick Metal Oxide Films for Photocatalytic Oxidation of Bisphenol A

Gergő Ballai, Tomaž Kotnik, Matjaž Finsgar, Albin Pintar, Zoltán Kónya, András Sági, and Sebastijan Kovacič

ACS Applied Nano Materials 6.21 (2023): 20089-20098.

<https://doi.org/10.1021/acsanm.3c03891>

IF: 5,5

3. Interface Engineering of Pt–ZnO–CeO₂ by Atomic Layer Deposition for Advanced Applications

Anastasiia Efremova, Gergő Ballai, Ákos Szamosvölgyi, Imre Szent, Bence Kutus, János Kiss, András Sági, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya

Materials & Design (2026) közlésre elfogadva

IF: 7,9

6. A doktori értekezéshez kapcsolódó konferencia részvételek

1. Fotokatalizátor Előállítását Atomi Rétegleválasztásos Módszerrel

Ballai Gergő

Kémiai Előadói Napok (KEN), magyar nyelvű előadás, Szeged, 2021. Október 26-27.

2. Szén-dioxid Elektrokémiai Redukciója Redukált Réz- és Réz-cink-oxid Katalizátorokon

Ballai Gergő, Gyenes Tamás, Haspel Henrik, Kukovecz Ákos, Kónya Zoltán

A Magyar Tudományos Akadémia Analitikai és Környezeti Kémiai Bizottságának 10. Környezetkémiai Szimpóziuma, magyar nyelvű előadás, Siófok, 2022. szeptember 29-30.

3. Methanol Oxidation Catalyst by Atomic Layer Deposition

Gergő Ballai, Tamás Gyenes, Henrik Haspel, Livia Vásárhelyi, Imre Szent, Dániel Sebők, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya

27th International Symposium on Analytical and Environmental Problems, angol nyelvű előadás, Szeged, November 22-23, 2021

4. Preparation of Photocatalysts by Atomic Layer Deposition.

Ballai Gergő, Kedves Zsolt, Pap Zsolt, Sági András, Sebastijan Kovacic, Kukovecz Ákos, Kónya Zoltán

27th International Symposium on Analytical and Environmental Problems, angol nyelvű poszter, Szeged, November 22-23, 2021

7. Egyéb közlemények

1. Co₄N/nitrogen-doped graphene: a non-noble metal oxygen reduction electrocatalyst for alkaline fuel cells

Tamás Varga, Gergő Ballai, Livia Vásárhelyi, Henrik Haspel, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya

Applied Catalysis B: Environmental 237 (2018): 826-834

<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.06.054>

IF: 21,1

2. One step synthesis of chlorine-free Pt/Nitrogen-doped graphene composite for oxygen reduction reaction

Tamás Varga, Ágnes Tímea Varga, Gergő Ballai, Henrik Haspel, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya

Carbon 133 (2018): 90–100.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.020>

IF: 11,6

3. Noble-metal-free iron nitride/nitrogen-doped graphene composite for the oxygen reduction reaction

Tamas Varga, Livia Vasárhelyi, Gergő Ballai, Henrik Haspel, Albert Oszkó, Ákos Kukovecz, and Zoltan Kónya

ACS Omega 4.1 (2019): 130-139.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02646>

IF: 4,3

4. Wetting and evaporation on a carbon cloth type gas diffusion layer for passive direct alcohol fuel cells

Krisztina Anita Nagy, Ildikó Y Tóth, Gergő Ballai, Ágnes Timea Varga, Imre Szenti, Dániel Sebők, Judit Kopniczky, Béla Hopp, Ákos Kukovecz

Journal of Molecular Liquids (2020) 304, 112698

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112698>

IF: 5,1

5. Stability of boron nitride nanosphere dispersions in the presence of polyelectrolytes

Livia Vásárhelyi, Tímea Hegedűs, Szilárd Sáringer, Gergő Ballai, István Szilágyi, Zoltán Kónya

Langmuir (2021) 37 (17), 5399-5407

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00656>

IF: 3,9

6. Exploration of Li-ion batteries during a Long-Term heat endurance test using 3D temporal microcomputed tomography investigation

Gergő Ballai, Milán Attila Sörös, Livia Vásárhelyi, Imre Szent, Róbert Kun, Bálint Hartmann, Dániel Sebők, Ferenc Farkas, Aqib Zahoor, Guozhu Mao, András Sápi, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya

Energy Technology 11(8) (2023): e2300207.

<https://doi.org/10.1002/ente.202300207>.

IF: 3,6

7. Hungarian and Indonesian rice husk as bioadsorbents for binary biosorption of cationic dyes from aqueous solutions: A factorial design analysis

Hadid Sukmana, Gergő Ballai, Tamás Gyulavári, Erzsébet Illés, Gábor Kozma, Zoltán Kónya, Cecilia Hodúr

Heliyon 9(6) (2023): e17154.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17154>

IF: 3,6

8. Comparative study of adsorption of methylene blue and basic red 9 using rice husks of different origins

Hadid Sukmana, Etelka Tombácz, Gergő Ballai, Gábor Kozma, Zoltán Kónya, Cecilia Hodúr

Recycling (2023) 8 (5), 74

<https://doi.org/10.3390/recycling8050074>

IF: 4,6

9. Preparation, characterization and in vitro evaluation of the antimicrobial and antitumor activity of MnOx nanoparticles

Andrea Rónavári, Altantuya Ochirkhuyag, Nóra Igaz, Bettina Szerencsés, Gergő Ballai, Ildikó Huliák, Csenge Bocz, Ákos Kovács, Ilona Pfeiffer, Mónika Kiricsi, Zoltán Kónya

Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 688 (2024): 133528.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133528>

IF: 5,4

10. Zeolite supported zinc oxide nanoparticles composite: Synthesis, characterization, and photocatalytic activity for methylene blue dye degradation

Onur Kabadayi, Esra Altintig, Gergő Ballai

Desalination and Water Treatment (2024) 319, 100433

<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100433>

IF: 1,0

11. Femtosecond laser darkened copper surfaces: Characterization for possible application as laser beam blocker

Béla Hopp, Márton Sámi, Tamás Gera, Judit Budai, Gergő Ballai, Lázár Tóth, János Bohus, Gábor Gulyás, Tamás Szörényi, Tamás Smausz

Surfaces and Interfaces (2024) 51, 104745

<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.104745>

IF: 6,3

12. The effect of boron doping on the physicochemical properties and photocatalytic applications of strontium titanate

Áron Ágoston, Péter Sándor Lehoczky, Lilla Balassa, Ye Li, Ruping Liu, Gergő Ballai, Ákos Szamosvölgyi, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya, Zsolt Pap

Ceramics International 51(15) (2025): 20033–20041.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.02.168>

IF: 5,6

13. Investigation of mortars from historical monuments of North-East Poland and assessment of compatibility between historic and restoration mortars

Joanna Misiewicz, Lidia Kwiatkowska, Robert Wójcik, Gergő Ballai

Construction and Building Materials 474 (2025): 141075.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141075>.

IF: 8,0

14. Core/shell BCN@Cu heterostructures via electroless deposition for interface-tailored electroactive materials

Arvin Taghizadeh Tabrizi, Gergő Ballai, Anastasiia Efremova, Ákos Szamosvölgyi, Dorina Gabriella Dobó, Henrik Haspel, Robert Vajtai, Zoltán Kónya

Nanoscale 17 (2025): 23948–23957.

<https://doi.org/10.1039/D5NR02308D>

IF: 5,1

15. Operando micro-computed tomography reveals temperature-dependent electrolyte movement dynamics in commercial NCR18650BD Li-ion cells.

Dániel Sebők, Zuzana Stravová, Gergő Ballai, Ádám Tóth, Sándor J. Papp, Tomáš Zikmund, Jozef Kaiser, Andrej Slávik, Ákos Kukovecz

Journal of Energy Storage 136 (2025): 118589.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118589>

IF: 9,8

16. Influence of Pr Content on Structural Evolution of Doped Ceria-Based High-Entropy Oxides

Dalibor Tatar, Jakov Babić, Stjepan Šarić, Jelena Kojčinović, Petra Šušak, Anamarija Stanković, Laura Milišić, Andraž Mavrič, Cora Deák, Gergő Ballai, Imre Szenti, Ákos Kukovecz and Igor Djerdj

Molecules (2026): 31(4), 598

<https://doi.org/10.3390/molecules31040598>

IF: 4,6

17. Designed Pt Promoted 3D Mesoporous Co₃O₄ Catalyst in CO₂ Hydrogenation

András Sági, Gyula Halasi, András Grósz, János Kiss, Albert Kéri, Gergő Ballai, Gábor Galbács, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya

Journal of Nanoscience and Nanotechnology (2019): 19(1), 436-441

<https://doi.org/10.1166/jnn.2019.15779>

IF: 1,1

18. Characterization of Bricks from Baroque Monuments in Northeastern Poland: A Comparative Study of Hygric Behavior and Microstructural Properties for Restoration Applications

Joanna Misiewicz, Maria Tunkiewicz, Gergő Ballai, Ákos Kukovecz

Materials (2025): 18(13), 3023

<https://doi.org/10.3390/ma18133023>

IF: 3,2

8. Egyéb konferencia előadások

1. Electrocatalytic activity of Co4N/nitrogen-doped graphene composites in the oxygen reduction reaction

Gergő Ballai, Tamás Varga, Livia Vásárhelyi, Henrik Haspel, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya

8th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience („Siwan8”), angol nyelvű poszter Szeged, 2018. október 7-10.

2. Oxygen reduction activity of cobalt nitride on nitrogen-doped graphene

Gergő Ballai, Tamás Varga, Henrik Haspel, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya

23rd International Symposium on Analytical and Environmental Problems, angol nyelvű poszter, Szeged, 2017. október 9-10.

9. Tudománymetrikai adatok

Összes referált közlemény: 21 ebből az értekezéshez kapcsolódik: 3

Összesített impakt faktor: 114,5 ebből az értekezéshez kapcsolódik: 9,5

Összes független hivatkozás: 315 ebből az értekezéshez kapcsolódik: 7

MTMT azonosító: 10066778

Nyilatkozat a jelölt eredményekhez való hozzájárulásáról

Alulírott Dr. Szent Imre kijelentem, hogy a Ballai Gergő doktorjelölt értekezésében felhasznált eredmények a jelölt saját tudományos munkáját és hozzájárulását tükrözik a disszertáció alapjául szolgáló *Interface engineering of Pt–ZnO–CeO₂ by atomic layer deposition for advanced applications* (Materials & Design, 2026) című közleményben.

Kijelentem továbbá, hogy a hivatkozott publikációban a jelölt tudományos hozzájárulása meghatározó jelentőségű volt, és hozzájárulok ahhoz, hogy az abban szereplő eredményeket a doktorjelölt a doktori értekezésében és annak tézisfüzetében felhasználja.

Szeged, 2026.03.11.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'S' followed by a horizontal line and a small flourish.

Aláírás