

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Nitrogéntartalmú szerves szennyezők eltávolítása, valamint a reakciókörülmények hatásának vizsgálata heterogén fotokatalízis során

Náfrádi Máté

Környezettudományi Doktori Iskola

Témavezető: Dr. Alapi Tünde

Egyetemi adjunktus

Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi és Informatikai Kar

Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék



Szeged

2022

1. Bevezetés és rövid irodalmi áttekintés

Napjaink egyik jelentős környezeti problémája vizeink ember tevékenység következtében való elszennyeződése. Számos olyan szerves szennyező kerül a szennyvízbe, melyek hagyományos víztisztítási technológiákkal nem távolíthatók el megfelelő hatékonysággal, így a természetes vizekbe és az ivóvízbázisba kerülve beláthatatlan környezeti és egészségügyi károkat okozhatnak [1]. Kiegészítő víztisztítási eljárásként ezen kis koncentrációjú szennyezők eltávolítására használható nagyhatékonyságú oxidációs eljárások egyike a heterogén fotokatalízis, mely során megfelelő hullámhosszúságú fényrel megvilágított félvezető fotokatalizátorok felületén lejátszódó oxidáció és redukció következtében történik a szennyezők átalakulása [2]. Azonban még a sokat vizsgált TiO_2 és ZnO fotokatalizátorok esetén is gyakran nem ismert az átalakulás pontos mechanizmusa. A módszer fejlesztése érdekében szükséges a lejátszódó folyamatok részletes ismerete, a szerves anyagok átalakulásának vizsgálata.

Heterogén fotokatalízis során az átalakulási mechanizmus az átalakítandó vegyület kémiai szerkezete mellett függ annak adszorpcióra való hajlamától, valamint az alkalmazott fotokatalizátor jellemzőitől is [3,4]. A fotokatalízis során általánosan elfogadott tény az adszorpció szerepének kiemelt jelentősége, melyben a legtöbbet vizsgált TiO_2 egyes kristályfázisai (anatáz, rutil) között is jelentős különbségek mutatkoznak [4]. A kulcsfontosságú szerepet betöltő hidroxilgyökök ($^{\bullet}\text{OH}$) a katalizátor felületén képződik, azonban nem csak a katalizátor felületén, hanem oldatfázisba jutva is kifejtheti hatását [4,5]. A $^{\bullet}\text{OH}$ képződése, a katalizátor felületéről az oldatfázisba történő diffúziója valamint hozzájárulása a szerves anyagok átalakulásához a közvetlen töltésátmenet és egyéb reaktív részecskékkel való reakciók mellett, valamint az egyes paraméterek hatása ezen folyamatokra máig sokat kutatott téma [6]. A heterogén fotokatalízis hatékonyságát és az adott szerves vegyület átalakulásának reakciómechanizmusát számos paraméter befolyásolja, melyek közül a legfontosabbak a besugárzó fény intenzitása, a fotokatalizátor és a szervesanyag koncentrációja, a kettő közt kialakuló kapcsolat, valamint a katalizátor és a közeg fizikai-kémiai tulajdonságai [3], melyek jelentősen befolyásolhatják a félvezető felületén és az oldatfázisban lejátszódó folyamatokat.

Az eljárás valódi szennyvizek tisztítása során erősen hullámozó teljesítményt nyújt, melynek pontos okai máig vitatottak. A mátrix szerves és szervesetlen komponensei gyökfogóként viselkedhetnek, ugyanakkor befolyásolják a fotokatalizátor részecskék felületi tulajdonságait, és a különböző szervesetlen ionokból képződő szervesetlen gyökionok is jelentős hatással lehetnek a lejátszódó folyamatokra és az eljárás hatékonyságára [3,7].

A $^{\bullet}\text{OH}$ képződését és reakcióit gyakran vizsgálják a $^{\bullet}\text{OH}$ hatására képződő fluoreszcens termékek segítségével. Ilyen a munkánk során alkalmazott kumarin (COU) és 3-karboxikumarin (3CCA), melyek $^{\bullet}\text{OH}$ -kel való reakciója fluoreszcens 7-hidroxi-kumarint (7HO-COU) illetve 7-hidroxi-3-karboxikumarint (7HO-3CCA) eredményez. Mivel a COU nem, viszont a 3CCA jól adszorbeálódik a TiO_2 felületén, segítségükkel az adszorpciónak a célvegyületek átalakulásában [8], azok $^{\bullet}\text{OH}$ -kel való reakciójában, valamint az egyes vegyületekkel való kompetíciójában betöltött szerepe jól vizsgálható. Az adszorpció szerepének vizsgálatára TiO_2 esetén egy másik lehetőség a fluoridionok hozzáadása, melyek a felületi $-\text{OH}$ csoportokat lecserélve

jelentősen megváltoztatják a katalizátor felületi tulajdonságait. Fluorozott TiO_2 (TiO_2^{F}) esetén kedvezményezett a $\cdot\text{OH}$ oldatba kerülése, míg a felületen lejátszódó reakciók gátoltak [9].

A szerves szennyezők heterogén fotokatalitikus eltávolítása során legelterjedtebb, kereskedelmi forgalomban is kapható katalizátorok a TiO_2 és ZnO . Bár mindkét katalizátor esetén alapvetően a $\cdot\text{OH}$ -kel való reakciókhoz rendelhető a szerves vegyületek átalakulása, számos különbség van köztük. A két katalizátor hatékonyságának összehasonlítása a $\cdot\text{OH}$ képződése, valamint a különböző szerves ionok hatása és azok átalakulása, illetve egyes szerves szennyezők átalakulása szempontjából jelenleg hiánypótló a heterogén fotokatalízis területén.

A fotokatalizátorok gerjesztésére egyre elterjedtebbek az UV-A tartományban sugárzó LED fényforrások, melyek ma már jó elektromos hatékonysággal működnek, kedvező áron beszerezhetőek és alkalmasak a higanygőzlámpák (HGL) helyettesítésére heterogén fotokatalízis során [10]. Munkánk során a különböző hullámhosszon sugárzó LED-ek közül 365 nm-en sugárzó nagy intenzitású („High-Power”) LED ($\text{LED}_{365\text{nm}}$), valamint 398 nm-en sugárzó, könnyen beszerezhető, a köztudatban „UV-LED”-ként emlegetett ($\text{LED}_{398\text{nm}}$) LED fényforrásokat használtunk és hasonlítottunk össze különböző szerves vegyületek átalakítása során.

2. Célkitűzés

Doktori munkám célja a heterogén fotokatalízis alaposabb megismerése volt, különös tekintettel az adszorpció jelentőségére a $\cdot\text{OH}$ -kel való reakciók szempontjából. E mellett vizsgálataim kiterjedtek a mátrix hatás, azon belül is a szervesetlen ionok hatásának tanulmányozására, valamint négy, nitrogéntartalmú szerves szennyező eltávolításának részletes vizsgálatára. Méréseimet higanygőzlámpák és különböző hullámhosszúságon sugárzó LED-ek alkalmazásával végeztem, így munkám során ezen fényforrások heterogén fotokatalízisben való alkalmazásának összehasonlítására is figyelmet fordítottam.

Az adszorpció jelentőségét a $\cdot\text{OH}$ -kel való reakciók szempontjából a TiO_2 felületén rosszul adszorbeálódó COU, és a jól adszorbeálódó 3CCA átalakulásán, valamint $\cdot\text{OH}$ -kel való reakciójuk során létrejövő fluoreszcens termékeik képződésén keresztül terveztem tanulmányozni. Mindkét vegyület esetén részletesen vizsgáltam a reakciókörülmények, gyökfogók, egyes szervesetlen ionok, valamint a felületet, és ezen keresztül az adszorpció mértékét is jelentősen befolyásoló fluoridionok hatását.

A továbbiakban COU segítségével terveztem összehasonlítani a TiO_2 és ZnO esetén a $\cdot\text{OH}$ képződés sebességét, valamint a gyökös és közvetlen töltésátmeneten alapuló reakciók hozzájárulását az átalakuláshoz kétféle, 365 nm-en és 398 nm-en sugárzó LED fényforrást alkalmazva. Vizsgáltam két neonikotinoid peszticid (IMIDA és THIA), és két szulfonamid antibiotikum (SMT és SMP) heterogén fotokatalitikus átalakulását. A reakciókörülmények hatásának vizsgálata mellett a mineralizáció, valamint a gyakorlati felhasználás szempontjából jelentős mátrixhatás és a mátrix jellemző szervesetlen komponensei hatásával is foglalkoztunk. A kétféle LED használata lehetőséget adott a hullámhosszúság hatásának vizsgálatára is.

A heterogén fotokatalízis során használt higanygőzlámpák alkalmazására az utóbbi években alternatívaként felmerülő UV-LED fényforrásokkal felszerelt fotoreaktorok tesztelése is célkitűzés volt. Összehasonlításukat a higanygőzlámpával működő reaktorral a $\cdot\text{OH}$ -képződés és a különböző modellszennyezők eltávolítása során az elektromos energiafelhasználás és kvantumhasznosítási tényezők alapján terveztük elvégezni. Eredményeink alapján arra a kérdésre kerestük a választ, hogy a kereskedelmi forgalomban könnyen elérhető LED fényforrások segítségével mennyire növelhető a TiO_2/UV és ZnO/UV módszer hatékonysága, illetve csökkenthető-e a működési költségek.

3. Kísérleti körülmények, felhasznált anyagok és analitikai módszerek

Impulzus és gamma-radiolízis

A COU és 3CCA reakciósebességi együtthatóinak meghatározása Tesla Linac LPR-4 lineáris elektrongyorsítóval való besugárzás során felvett tranziens UV-Vis abszorpciós spektrumok alapján történt [11]. A gamma radiolízis kísérleteket egy panorama-besugárzóban végeztük ⁶⁰Co sugárforrás segítségével végeztük. Méréseinket különböző oldott O₂ koncentráció, pH és gyökfogók, illetve gyöktranszferek mellett végeztük.

Fotokatalitikus kísérletek

Munkánk során kereskedelmi forgalomban kapható TiO₂ Aeroxid P25 (Acros Organics) és ZnO (Sigma Aldrich) fotokatalizátorokat használtunk. Fényforrásként 300 - 400 nm között sugárzó fluoreszcens higanygőzlámpát, valamint 365 nm-en és 398 nm-en sugárzó UV-LED fényforrásokat alkalmaztunk (1. táblázat), melyek fluxusának meghatározása vas-oxalát és Reinecke-són alapuló kémiai aktinometriával történt [12,13]. Méréseinket nagytisztaságú (MQ) vízben, Szegedről származó csapvíz illetve biológiailag tisztított szennyvíz mátrixban is elvégeztük.

1. Táblázat: Az alkalmazott UV-fényforrások főbb jellemzői

| | HGL | LED_{365nm} | LED_{398nm} |
|--------------------------------|--|--|--|
| Emissziós tartomány | 300 - 400 nm | 355 - 375 nm | 385 - 415 nm |
| Emissziós maximum | 365 nm | 365 nm | 398 nm |
| Fotonfluxus | $5,0 \times 10^{-6} \text{ mol}_{\text{foton}} \text{ s}^{-1}$ | $5,5 \times 10^{-6} \text{ mol}_{\text{foton}} \text{ s}^{-1}$ | $4,7 \times 10^{-6} \text{ mol}_{\text{foton}} \text{ s}^{-1}$ |
| Elektromos teljesítmény | 15 W | 6,6 W | 4,6 W |
| Elektromos hatékonyság | ~11% | 27% | 30 - 37% |

Alkalmazott analitikai módszerek

A COU és 3CCA koncentrációjának meghatározására, valamint a kezelt minták vizsgálatára UV-Vis spektroszkópiás méréseket végeztünk (Agilent 8453). A 7HO-COU és 7HO-3CCA koncentrációjának meghatározását fluoreszcens spektroszkópiával végeztük (Hitachi F-4500). A vizsgált szerves szennyezők koncentrációjának meghatározása HPLC elválasztást követő UV (DAD) detektálással történt (Agilent 1100, Lichrosphere 100 RP-18, 5 μm oszlop). A képződő szerves bomlástermékek meghatározását tömegspektrometrián, az előbbi HPLC készülékhez csatolt (Agilent LC/MSD VL) detektorral, az ionizációt a mérendő komponensektől függően atmoszférikus nyomású kémiai (APCI) vagy elektropray (ESI) ionizációval végeztük. A mintákat mérés előtt szilárd fázisú extrakcióval készítettük elő. A TOC méréshez Analytik Jena N/C 3100 analizátort használtunk. Az adszorbeálható klórtartalmú szerves vegyületek mennyiségét Analytik Jena multi X2500 készülékkel határoztuk meg, a mintaelőkészítés aktív szerves adszorpcióval (APU-2) történt. A kémiai oxigénigény, a H₂O₂ és a képződő szerves nitrogéntartalmú ionok

(NO₂, NO₃, NH₄⁺, CN) koncentrációjának meghatározására kolorimetriás küvettateszteket alkalmaztunk, a méréseket pedig Spectroquant® Multy és Hach DR2800 Vis-spektrofotométerekkel végeztük. A szervesanyagok bomlása során képződő szerves ionok koncentrációját ionkromatográffal mértük (Shimadzu Prominence LC-20AD, Shodex 5U-YS-50 és Shodex NI-424 5U oszlopokkal).

Ökotoxicitás mérése

Toxikus szerves szennyezők átalakítása során fontos az ökototoxicitás változásának követése, melynek meghatározását a *Vibrio Fischeri* baktériumfaj biolumineszcenciájának gátlásán alapuló LCK480 (Hach Lange) tesztekkel végeztük.

A fotokatalizátorok jellemzésére használt módszerek

A fotokatalizátor zéta-potenciálját és részecskeméretét dinamikus fényszórással határoztuk meg (Nano ZS, Malvern). A katalizátorok abszorbanciájának meghatározását diffúz reflektancia spektroszkópiával (Ocean Optics USB4000), a mért adatokból a tiltottsáv energiák számítását Tauc-ábrázolás és a Kubelka–Munk megközelítéssel végeztük. A fotokatalizátorok kristályfázisát, illetve azok összetételét röntgen-diffrakciós (Rigaku Miniflex II, Cu K α sugárforrás) mérésekkel határoztuk meg. Az alkalmazott fotokatalizátorok fajlagos felületének meghatározása N₂-adszorpciós/deszorpciós izotermák (BET) alapján történt (Quantachrome NOVA 2200). A pórusméret eloszlás meghatározást a BJH-módszer segítségével végeztük.

5. Doktori (PhD) értekezés tézisei

1. NaF hozzáadásával a TiO₂ felületén jól adszorbeálódó vegyületek deszorbeálthatóak, így a kezdeti reakciósebességek meghatározása egyértelművé tehető. Erős felületi komplexeket képző szubsztrátumok esetén azonban ez a módszer nem alkalmazható.

A NaF hozzáadásával a TiO₂ felületi hidroxilcsoportjai lecserélhetők fluoridcsoportokra (TiO₂^F), ezzel együtt az adszorpció viszonyok is megváltoznak. $1,0 \times 10^{-4}$ M kiindulási koncentráció és $1,0 \text{ g dm}^{-3}$ szuszpenzió töménység mellett a COU és 7HO-COU adszorpciója nem volt mérhető, míg a 3CCA 30%-a adszorbeálódott a TiO₂ felületén. A TiO₂^F felületén egyik vegyület sem adszorbeálódik mérhető mennyiségben, és $5,0 \times 10^{-3}$ M NaF hozzáadását követően a 3CCA és 7HO-3CCA közel 100%-a deszorbeálódik a TiO₂ felületéről. A NaF hozzáadása után meghatározott 3CCA kezdeti átalakulási sebesség közel ötszöröse, a 7HO-3CCA képződés sebessége közel háromszorosa a deszorpció nélkül (azaz NaF hozzáadása nélkül) meghatározott értékeknek. Ezzel az eljárással, azaz a mintavételt követő NaF hozzáadásával a kezdeti sebességek meghatározása egyértelműbbé tehető jól adszorbeálódó vegyületek esetén, mivel így a csupán adszorbeálódott anyagot nem kezeljük átalakultként. A gyengén adszorbeálódó (<1%) COU esetén nem volt mérhető hatása a NaF hozzáadásának. Erős felületi komplexet képező szerves anyagok (pl. EDTA, oxálsav) adszorpcióját azonban nem gátolja a F⁻, a felület fluorozása nem történik meg jelenlétükben.

Kapcsolódó publikáció:

M. Náfrádi, L. Farkas, T. Alapi, K. Hernádi, K. Kovács, L. Wojnárovits, E. Takács: *Application of coumarin and coumarin-3-carboxylic acid for the determination of hydroxyl radicals during different advanced oxidation processes*, Radiation Physics and Chemistry, 2020, 170, 108610 <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108610>.

2. A TiO₂ Aeroxid P25 használata esetén a szerves vegyületek adszorpciójának mértéke nem meghatározó azok átalakulási sebessége szempontjából, amennyiben az átalakulásban a 'OH-vel való reakció a domináns. Ugyanakkor több szerves vegyület együttes jelenléte esetén a 'OH-vel való reakciók közti kompetíció szempontjából meghatározó az adszorpció szerepe.

A szuszpenzió pH-jának növelése (pH>6), valamint $5,0 \times 10^{-3}$ M NaF hozzáadása gátolta a 3CCA adszorpcióját, ennek ellenére TiO₂^F besugárzása során az átalakulási és a hidroxilált termék képződési sebességének változása a TiO₂ alkalmazásakor mért értékekhez képest elhanyagolható volt. A kezdeti átalakulási sebességek arányát ($r_0^{\text{COU}} / r_0^{\text{3CCA}} = 1,39$) összehasonlítva a 'OH-el való reakciók sebességi együtthatóink arányával ($k^{\text{COU}} / k^{\text{3CCA}} = 1,40$) jó egyezést kapunk, ami alapján elhanyagolható mértékű adszorpció mellett a 'OH_{aq} szerepe a meghatározó. Az adszorpció mértékének növekedésével (pH<4) a felületi 'OH_{ads} és a közvetlen töltésátmenet hozzájárulása az átalakuláshoz egyaránt megnőhet. TiO₂ és TiO₂^F esetén különböző gyökfogókat (metanol, *t*-butanol, *p*-benzokinon, EDTA²⁻, oxálsav) alkalmazva

megállapítottuk, hogy több komponenset tartalmazó rendszerekben a $\cdot\text{OH}$ -ért való versengésben az adszorpció szerepe meghatározó. A TiO_2 felületén jól adszorbeálódó 3CCA esetén a nem adszorbeálódó gyökfogók még nagy feleslegben sem képesek az $\cdot\text{OH}$ -ért sikeresen versengeni. Ugyanakkor TiO_2^{F} szuszpenzióban nincs szignifikáns különbség a 3CCA és a COU viselkedése közt azonos gyökfogók jelenlétében.

Kapcsolódó publikáció:

M. Náfrádi, L. Farkas, T. Alapi, K. Hernádi, K. Kovács, L. Wojnárovits, E. Takács: *Application of coumarin and coumarin-3-carboxylic acid for the determination of hydroxyl radicals during different advanced oxidation processes*, Radiation Physics and Chemistry, 2020, 170, 108610 <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108610>.

3. Az imidakloprid és a tiakloprid heterogén fotokatalitikus átalakításában a $\cdot\text{OH}$ -kel való reakció a domináns, mely mellett az imidakloprid esetén szerepe van a közvetlen töltésátmenetnek is. TiO_2^{F} esetén a neonikotinoidok átalakulási sebessége szignifikánsan nem változik, de a termékeloszlás igen, valamint jelentősen lassul a mineralizáció.

A THIA-dal ellentétben az IMIDA O_2 -mentes TiO_2 szuszpenzióban, elhanyagolható adszorpciója ellenére is átalakul, ami a közvetlen töltésátmenet hozzájárulására utal. Ezt igazolja, hogy TiO_2^{F} esetén megváltozott a képződő termékek aránya, amit THIA esetén nem tapasztaltunk. A hozzáadott gyökfogók (metanol, *t*-butanol, *p*-benzokinon, EDTA^{2-} , oxálsav, Γ) inhibíciós hatása alapján valószínű, hogy a $\cdot\text{OH}_{\text{aq}}$ a fő reakciópartner mindkét neonikotinoid esetén, a közvetlen töltésátmenet hozzájárulása az IMIDA esetén TiO_2 szuszpenzióban sem domináns. $1,0 \times 10^{-4}$ M kiindulási koncentráció mellett TiO_2 esetén a szervesanyagtartalom közel 20%-a, míg TiO_2^{F} alkalmazásakor annak 40%-a nem volt eltávolítható heterogén fotokatalízissal, amit mindkét vegyületnél nehezen oxidálható termékek képződésével értelmeztünk. A felület fluorozása következtében megnőtt $\cdot\text{OH}$ -képződési sebesség nem eredményezett hatékonyabb mineralizációt, feltehetően a gátolt töltésátmenet miatt, melynek szerepe a köztitermékek átalakulásán keresztül a mineralizáció szempontjából is fontos.

Kapcsolódó publikációk:

G. Rózsa, **M. Náfrádi**, T. Alapi, K. Schrantz, L. Szabó, L. Wojnárovits, E. Takács, A. Tungler: *Photocatalytic, photolytic and radiolytic elimination of imidacloprid from aqueous solution: reaction mechanism, efficiency and economic considerations*; Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 250, 429–439 <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.01.065>

M. Náfrádi, T. Hlogyik, L. Farkas, T. Alapi: *Comparison of the heterogeneous photocatalysis of imidacloprid and thiachloprid – reaction mechanism, ecotoxicity, and the effect of matrices*; Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9, 106684 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106684>

4. Az imidakloprid fotokatalitikus átalakítása során az ökototoxicitás értékek növekedése feltehetően a $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ képződéséhez köthető.

A két neonikotinoid esetén a toxicitás jelentősen eltérő változását tapasztaltuk. A THIA esetén a *Vibrio Fischeri* ökototoxicitás teszttel meghatározott biolumineszcencia-inhibíció értéke a kezelés során gyorsan csökkent (50%-ról 20%-ra), míg IMIDA esetén nőtt (38%-ról 65%-ra). Ez feltehetően közvetetten a $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ képződéséhez (mely THIA esetén elhanyagolható), ezen keresztül pedig esetleg N-tartalmú gyökök/gyökionok reakcióihoz köthető.

Kapcsolódó publikáció:

M Náfrádi, T. Hlogyik, L. Farkas, T. Alapi: *Comparison of the heterogeneous photocatalysis of imidacloprid and thiacloprid – reaction mechanism, ecotoxicity, and the effect of matrices*; Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9, 106684 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106684>

5. A $\text{LED}_{365\text{nm}}$ esetén a fényintenzitás növelése jelentősen csökkenti a kumarin átalakulására és a $\cdot\text{OH}$ képződésére vonatkozó látszólagos fotonhasznosítást, és szükségtelenül megnöveli az elektromos energiafogyasztást. A $\text{LED}_{398\text{nm}}$ kedvező elektromos energiahasznosítása ellenére kevésbé hatékony a TiO_2 és a ZnO fotokatalizátorok gerjesztése szempontjából.

A LED fényforrások jelentősen nagyobb elektromos hatékonysággal rendelkeznek (~27 és 30-37%), mint a HGL (~11%). A 365 nm-en sugárzó LED kedvező alternatívája lehet a fluoreszcens higanyózlámpának. A $\text{LED}_{365\text{nm}}$ fényintenzitását szabályozva ($1,4 - 8,5 \times 10^{-5} \text{ mol}_{\text{foton}} \text{ s}^{-1} \text{ dm}^{-3}$) a COU heterogén fotokatalízise során az átalakulásra, valamint a $\cdot\text{OH}$ képződésére vonatkozó fotonhasznosítás a teljesítményt 20,8 W-ról 6,5 W-ra lecsökkentve ~2,5-szörösére nő. Az elektromos energiafogyasztás így jóval kedvezőbb a LED-eket alacsonyabb teljesítményen üzemeltetve. Módosítatlan TiO_2 és ZnO fotokatalizátorok esetén a $\text{LED}_{398\text{nm}}$ használata nem gazdaságos, annak nagy elektromos hatékonysága (30-37%) ellenére sem, a katalizátorok ezen a hullámhosszúságon való csekély abszorbanciája miatt. Ugyanakkor hatékony fényforrás lehet a módosított, jobb abszorpciós tulajdonságokkal rendelkező fotokatalizátorok esetén.

Kapcsolódó publikáció:

M. Náfrádi, G. Bencsik, Cs. Janáky, T. Alapi: *Impact of reaction parameters and water matrices on the removal of organic pollutants by TiO_2/LED and ZnO/LED heterogeneous photocatalysis using 365 and 398 nm radiation*; Nanomaterials 2022, 12(1), 5; <https://doi.org/10.3390/nano12010005>

6. Kumarin átalakulása esetén TiO_2 és ZnO között jelentős különbségeket tapasztaltunk a $\cdot\text{OH}$ képződési sebességében, valamint a közvetlen töltésátmenet relatív hozzájárulásában.

Az $r_0^{7\text{HO-COU}/r_0^{\text{COU}}}$ értékek $\text{LED}_{365\text{nm}}$ alkalmazásakor közel kétszer akkora TiO_2 (0,02) mint ZnO (0,01) esetén. Ez arra utal, hogy a $\cdot\text{OH}$ képződés hatékonysága és annak relatív hozzájárulása a COU átalakulásához TiO_2 esetén szignifikánsan nagyobb, míg ZnO -ot használva a közvetlen töltésátmenet relatív hozzájárulása számottevőbb. A két LED fényforrás esetén mért COU átalakulási sebességek jól

tükrözik, hogy a TiO_2 és a ZnO a 398 nm-es fotonok alig 20%-át nyeli el. A kisebb átalakulási sebességek ellenére a 7HO-COU hozama ($r_0^{\text{7HO-COU}}/r_0^{\text{COU}}$) jelentősen nagyobb a $\text{LED}_{398\text{nm}}$ (TiO_2 : 0,045; ZnO : 0,06), mint a $\text{LED}_{365\text{nm}}$ esetén (TiO_2 : 0,02; ZnO : 0,01).

Kapcsolódó publikáció:

M. Náfrádi, G. Bencsik, Cs. Janáky, T. Alapi: *Impact of reaction parameters and water matrices on the removal of organic pollutants by TiO_2/LED and ZnO/LED heterogeneous photocatalysis using 365 and 398 nm radiation*; *Nanomaterials* 2022, 12(1), 5; <https://doi.org/10.3390/nano12010005>

7. A Cl^- és a HCO_3^- , valamint két enyhe mátrix (csapvíz és biológiailag kezelt kommunális szennyvíz) hatását vizsgálva a TiO_2 jóval érzékenyebb a szerves ionokra és a mátrixok alkotóira, mint a ZnO .

TiO_2 esetén a Cl^- hatása a COU átalakulására és a 7HO-COU képződésére elhanyagolható volt, míg ZnO esetén enyhe pozitív hatást figyeltünk meg. A HCO_3^- nagymértékű inhibícióját (50-75% reakciósebesség csökkenés) TiO_2 esetén a $\cdot\text{OH}$ -kel való reakció mellett annak h_{VB}^+ -kal való reakciójával értelmeztünk. Utóbbi során a HCO_3^- CO_3^{2-} -ná alakul, mely a $\cdot\text{OH}$ -nél kisebb mértékben járul hozzá a COU átalakulásához. ZnO esetén jóval kisebb hatása volt a HCO_3^- -nak (20-30% reakciósebesség csökkenés), mivel annak h_{VB}^+ -kal való reakciója kevésbé kedvezményezett. Mindezt megerősítette a HCO_3^- mineralizációra gyakorolt hatása. ZnO esetén a két mátrix hatása jól értelmezhető a két anion együttes hatása alapján, ám TiO_2 esetén sokkal nagyobb mértékű inhibíciót tapasztaltunk (80-90% reakciósebesség csökkenés), mint ami a szerves ionok hatása alapján várható.

Kapcsolódó publikációk:

M. Náfrádi, G. Bencsik, Cs. Janáky, T. Alapi: *Impact of reaction parameters and water matrices on the removal of organic pollutants by TiO_2/LED and ZnO/LED heterogeneous photocatalysis using 365 and 398 nm radiation*; *Nanomaterials* 2022, 12(1), 5; <https://doi.org/10.3390/nano12010005>

8. A TiO_2 és a ZnO hatékonysága különbözhet heteroatomos (nitrogén-, kéntartalmú) szerves szennyezők átalakítása és mineralizációja szempontjából, különösen HCO_3^- jelenlétében.

A szulfonamidok átalakulása ZnO szuszpenzióban feltehetően a közvetlen töltésátmenet hozzájárulása miatt gyorsabb volt, míg a neoinotinoidoknál nem volt jelentős különbség a TiO_2 és ZnO alkalmazása közt. A TiO_2 minden esetben hatékonyabb volt a mineralizáció szempontjából; a kiindulási TOC értéket 20%-ára, míg a ZnO csak 40%-ára csökkentette 120 perc megvilágítás során. A HCO_3^- inhibíciós hatása nagymértékben függ a belőle képződő CO_3^{2-} és a szerves vegyület közti reakció sebességi állandójától, így szulfonamidok és neoinotinoidok esetén a HCO_3^- hatása kevésbé érvényesül, mint a COU átalakítása során.

Kapcsolódó publikációk:

M. Náfrádi, G. Bencsik, Cs. Janáky, T. Alapi: *Impact of reaction parameters and water matrices on the removal of organic pollutants by TiO_2/LED and ZnO/LED heterogeneous photocatalysis using 365 and 398 nm radiation*; *Nanomaterials* 2022, 12(1), 5; <https://doi.org/10.3390/nano12010005>

M. Náfrádi, L. Farkas, G. Bencsik, G. Kozma, K. Hernádi, T. Alapi: *Wavelength dependence of the transformation mechanism of sulfonamides using different LED light sources and TiO₂ and ZnO photocatalysts*, Materials, 2022, 16(1), 49; <https://doi.org/10.3390/ma15010049>

9. A szulfametoxipiridazin 398 nm hullámhosszúságú fotonokkal megvilágított TiO₂ Aeroxid P25 szuszpenzióban feltehetően közvetlen energiaátadással alakul át

A 398 nm-es LED-ek és TiO₂ Aeroxid P25 alkalmazása esetén az SMP átalakulására vonatkozó kvantumhasznosítási tényező értéke 0,0158, míg LED_{365nm} alkalmazása során ez az érték csupán 0,0061, a katalizátor jobb gerjeszthetősége ellenére. A 365 nm-es besugárzásnál tapasztalt hidroxiláció helyett 398 nm esetén az SMP elsősorban SO₂-eliminációval alakul át. ZnO használata során nem tapasztalható ez a jelenség; a 398 nm-es megvilágítás mellett mért kvantumhasznosítási tényező (0,0009) egy nagyságrenddel kisebb, mint a 365 nm-es megvilágítás mellett mért érték (0,0085). Az SMP átalakulása TiO₂ Aeroxid P25 és LED_{398nm} alkalmazása során O₂-mentes szuszpenzióban is megtörtént, és rendkívül érzékeny a metanol és a HCO₃⁻ jelenlétére (90% fölötti inhibíció), ami nem értelmezhető kizárólag ezen vegyületek [•]OH-vel és h_{νB}⁺-kal való reakciói alapján. Irodalmi adatokkal összehasonlítva eredményeinket valószínű, hogy az átalakulás a gerjesztett állapotú fotokatalizátor és az SMP közti közvetlen energiaátadással történik.

Kapcsolódó publikációk:

M. Náfrádi, L. Farkas, G. Bencsik, G. Kozma, K. Hernádi, T. Alapi: *Wavelength dependence of the transformation mechanism of sulfonamides using different LED light sources and TiO₂ and ZnO photocatalysts*, Materials, 2022, 16(1), 49; <https://doi.org/10.3390/ma15010049>

6. Irodalomjegyzék

- [1] J.C.G. Sousa, A.R. Ribeiro, M.O. Barbosa, M.F.R. Pereira, A.M.T. Silva, A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines, *J. Hazard. Mater.* 344 (2018) 146–162. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.058>.
- [2] A.O. Ibadon, P. Fitzpatrick, Heterogeneous photocatalysis: Recent advances and applications, *Catalysts*. 3 (2013) 189–218. <https://doi.org/10.3390/catal3010189>.
- [3] U.I. Gaya, Heterogeneous photocatalysis using inorganic semiconductor solids, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7775-0>.
- [4] Y. Nosaka, A.Y. Nosaka, Generation and Detection of Reactive Oxygen Species in Photocatalysis, *Chem. Rev.* 117 (2017) 11302–11336. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00161>.
- [5] J.Y. Hwang, G. hee Moon, B. Kim, T. Tachikawa, T. Majima, S. Hong, K. Cho, W. Kim, W. Choi, Crystal phase-dependent generation of mobile OH radicals on TiO₂: Revisiting the photocatalytic oxidation mechanism of anatase and rutile, *Appl. Catal. B Environ.* 286 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.119905>.
- [6] Y. Nosaka, A. Nosaka, Understanding Hydroxyl Radical (\bullet OH) Generation Processes in Photocatalysis, *ACS Energy Lett.* 1 (2016) 356–359. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.6b00174>.
- [7] A.R. Lado Ribeiro, N.F.F. Moreira, G. Li Puma, A.M.T. Silva, Impact of water matrix on the removal of micropollutants by advanced oxidation technologies, *Chem. Eng. J.* 363 (2019) 155–173. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.080>.
- [8] Y. Nosaka, M. Nishikawa, A.Y. Nosaka, Spectroscopic investigation of the mechanism of photocatalysis, *Molecules*. 19 (2014) 18248–18267. <https://doi.org/10.3390/molecules191118248>.
- [9] H. Park, W. Choi, Effects of TiO₂ Surface Fluorination on Photocatalytic Reactions and Photoelectrochemical Behaviors, *J. Phys. Chem. B.* 108 (2004) 4086–4093. <https://doi.org/10.1021/jp036735i>.
- [10] O. Tokode, R. Prabhu, L.A. Lawton, P.K.J. Robertson, UV LED Sources for Heterogeneous Photocatalysis, *Handb. Environ. Chem.* 35 (2015) 159–179. https://doi.org/10.1007/698_2014_306.
- [11] G. Földiák, P. Hargittai, L. Kaszanyiczki, L. Wojnárovits, A computer controlled pulse radiolysis laboratory, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Artic.* 125 (1988) 19–28. <https://doi.org/10.1007/BF02041745>.
- [12] R. Radjagobalou, J.F. Blanco, V. Dias da Silva Freitas, C. Supplis, F. Gros, O. Dechy-Cabaret, K. Loubière, A revised experimental protocol for implementing the actinometry method with the Reinecke's salt, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 382 (2019) 111934. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.111934>.
- [13] C.G. Hatchard, C.A. Parker, A new sensitive chemical actinometer - II. Potassium ferrioxalate as a standard chemical actinometer, *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* 235 (1956) 518–536. <https://doi.org/10.1098/rspa.1956.0102>.

7. Tudományos közlemények

MTMT-azonosító: 10061642

Dolgozat témájához kapcsolódó, nemzetközi folyóiratban megjelent publikációk

1. **M. Náfrádi**, L. Farkas, G. Bencsik, G. Kozma, K. Hernádi, T. Alapi: *Wavelength dependence of the transformation mechanism of sulfonamides using different LED light sources and TiO₂ and ZnO photocatalysts*, *Materials*, 2022, 16(1), 49; <https://doi.org/10.3390/ma15010049>
IF = 3,623 Q2
2. **M. Náfrádi**, G. Bencsik, Cs. Janáky, T. Alapi: *Impact of reaction parameters and water matrices on the removal of organic pollutants by TiO₂/LED and ZnO/LED heterogeneous photocatalysis using 365 and 398 nm radiation*, *Nanomaterials* 2022, 12(1), 5; <https://doi.org/10.3390/nano12010005>
IF = 5,076 Q1
3. **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, L. Farkas, T. Alapi: *Comparison of the heterogeneous photocatalysis of imidacloprid and thiacloprid – reaction mechanism, ecotoxicity, and the effect of matrices*, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9, 106684 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106684>
IF=5,909 Q1
4. **M. Náfrádi**, L. Farkas, T. Alapi, K. Hernádi, K. Kovács, L. Wojnárovits, E. Takács: *Application of coumarin and coumarin-3-carboxylic acid for the determination of hydroxyl radicals during different advanced oxidation processes*, *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 170, 108610 <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108610>.
IF=2,226 Q2
5. G. Rózsa, **M. Náfrádi**, T. Alapi, K. Schrantz, L. Szabó, L. Wojnárovits, E. Takács, A. Tungler: *Photocatalytic, photolytic and radiolytic elimination of imidacloprid from aqueous solution: reaction mechanism, efficiency and economic considerations*, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 250, 429–439 <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.01.065>
IF=16,683

SIF: 33,517

Dolgozat témájához kapcsolódó teljes terjedelmű konferenciakiadványok

1. **M. Náfrádi**, T. Alapi: *Effect of irradiation wavelength on the heterogeneous photocatalytic removal of organic pollutants using TiO₂ and ZnO*; 7th International Symposium on Analytical and Environmental Problems (ISAEF 2021), Szeged, 11. 22–23, 2021 (ISBN 978–963–306–835–9)
2. **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, L. Farkas, T. Alapi: *Application of high power UV LEDs in heterogeneous photocatalysis – 26th International Symposium on Analytical and Environmental Problems*, Szeged, 2020. 11. 23–24. (ISBN 978–963–306–771–0, 67–71.)
3. **M. Náfrádi**, G. Farkas, B. Vas, T. Alapi: *Heterogeneous photocatalysis of sulfonamides using TiO₂ and ZnO photocatalysts with mercury-vapor and led light sources – 26th International Symposium on Analytical and Environmental Problems*, Szeged, 2020. 11.23–24. (ISBN 978–963–306–771–0, 384–388.)
4. **M. Náfrádi**, L. Wojnárovits, E. Takács, T. Alapi: *Determination of hydroxyl radicals using coumarin and coumarin-3-carboxylic acid during gamma radiolysis and heterogeneous photocatalysis – 25th International Symposium on Analytical and Environmental Problems*, Szeged, 2019.10.7–8. (ISBN 978–963–306–702–4, 23–27.)
5. T. Hlogyik, **M. Náfrádi**, T. Alapi: *Heterogeneous photocatalysis of imidacloprid – effect of reaction parameters, mineralization and matrices – 25th International Symposium on Analytical and Environmental Problems*, Szeged, 2019.10.7–8. (ISBN 978–963–306–702–4, 321–325.)

6. T. Hlogyik, **M. Náfrádi**, A. Rampal, S. Garg, K. Hernádi, T. Alapi: *Heterogeneous photocatalysis of Imidacloprid – the effect of reaction parameters – 24th International Symposium on Analytical and Environmental Problems*, Szeged, 2018.10. 8–9. (ISBN 978–963–306–623–2, 290–294.)
7. **M. Náfrádi**, D. Kiss, T. Alapi: *Heterogeneous photocatalysis of coumarin and 3–carboxycoumarinic acid–effect of NaF and methanol on the transformation rate and formation rate of hydroxylated products – 24th International Symposium on Analytical and Environmental Problems*, Szeged, 2018. 10. 8–9. (ISBN 978–963–306–623–2, 53–57.)
8. **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, T. Alapi: *UV–power LED alkalmazása heterogén fotokatalízis során – reaktortervezés, építés és tesztelés – XLIII. Kémiai előadói napok*, Szeged, 2020. október 27–28. (ISBN 978–615–6018–04–5, 24–30. oldal)
9. **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, T. Alapi: *Neonikotinoid tartalmú vizek heterogén fotokatalitikus kezelése – XLII. Kémiai előadói napok*, Szeged, 2019. október 28–30. (ISBN 978–615–6018–01–4, 97–103.)

Dolgozat témájához kapcsolódó konferencia előadások és poszter bemutatók

1. T. Alapi, L. Farkas, **M. Náfrádi**: *Application of Various Advanced Oxidation Processes for Elimination of Sulfonamides from Aqueous Solution: Reaction Mechanism, Efficiency, Toxicity and Economic Considerations – The 5th International Conference on New Photocatalytic Materials for Environment, Energy and Sustainability, The 6th International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (NPM–5/PAOT–6)*, Szeged, 05. 24–27, 2021 (ISBN 978–963–306–789–5)
2. **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, T. Alapi: *Comparison of the Efficiency of Different Light Sources for the Generation of Hydroxyl Radicals using TiO₂ and ZnO Photocatalysts – The 5th International Conference on New Photocatalytic Materials for Environment, Energy and Sustainability, The 6th International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (NPM–5/PAOT–6)*, Szeged, 05. 24–27, 2021 (ISBN 978–963–306–789–5)
3. **M. Náfrádi**, L. Farkas, G. Farkas, B. Vas, T. Alapi: *Transformation of Sulfamethazine and Sulfamethoxyypyridazine using TiO₂ And ZnO Photocatalysts Irradiated with Mercury–Vapor and UV–LED Light Sources – The 5th International Conference on New Photocatalytic Materials for Environment, Energy and Sustainability, The 6th International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (NPM–5/PAOT–6)*, Szeged, 05. 24–27, 2021 (ISBN 978–963–306–789–5, 105.)
4. **M. Náfrádi**, T. Alapi: *Hydroxyl radical formation and removal efficiency of sulfonamide antibiotics from real water matrices using UV–LED irradiated TiO₂ and ZnO photocatalysts – The 2nd International Conference on UV LED Technologies & Applications*, Berlin (Germany) April 19 – 20, 2021
5. T. Alapi, **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, G. Farkas: *Heterogeneous Photocatalysis of Sulfonamides Using TiO₂ and ZnO Photocatalysts – Application of Various Light Sources – 5th International Conference on Catalysis and Chemical Engineering*, Virtual conference, 2021, February 22–26
6. **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, B. Vas, G. Farkas, T. Alapi: *Comparison of the efficiency of mercury vapor lamp and LED light sources in the case of heterogeneous photocatalysis of sulfonamides – 9th Interdisciplinary Doctoral Conference (IDK 2020)*, Pécs, 2020.11.27–28. (ISBN 978–963–429–582–2, 352. oldal)
7. **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, L. Farkas, T. Alapi, K. Hernádi, L. Wojnárovits, E. Takács: *Application of Coumarin and Coumarin–3–Carboxylic Acid for the determination of hydroxyl radical during different advanced oxidation processes – 14th Tihany Symposium on Radiation Chemistry*, Siófok, 2019. május 25–30.
8. T. Alapi, **M. Náfrádi**, G. Rózsa, K. Schrantz, T. Hlogyik, L. Farkas, L. Wojnárovits, E. Takács, K. Hernádi: *Photocatalytic, photolytic and radiolytic elimination of pesticides from aqueous solution:*

reaction mechanism, efficiency, matrix effect and economic considerations – The 25th International Conference on Advanced Oxidation Technologies for Treatment of Water, Air and Soil, Antwerpen, 2019. 04. 23–25.

9. Farkas G., **Náfrádi M.**, Alapi T.: *Szulfametazin tartalmú vizek kezelése higanygőz és UV-LED fényforrásokkal besugárzott TiO₂ és ZnO fotokatalizátorokkal* – XIV. Szent-Györgyi Albert Konferencia, Szeged, 2021. április 16–17.
10. **Náfrádi M.**, Hlogyik T., Alapi T.: *Reakciókörülmények hatása az imidakloprid és a tiakloprid heterogén fotokatalitikus átalakítására* – 8. Környeztkémiai Szimpózium, Siófok, 2019. október 10–11.

Könyvfejezet

1. **M. Náfrádi**, G. Veréb, D. Scheres Firak, T. Alapi: *Photocatalysis: Introduction, Mechanism, and Effective Parameters*. In: Garg S., Chandra A. (eds) *Green Photocatalytic Semiconductors. Green Chemistry and Sustainable Technology*. Springer, Cham. (2022) https://doi.org/10.1007/978-3-030-77371-7_1

Dolgozat témájához szorosan nem kapcsolódó, nemzetközi folyóiratban megjelent publikációk

1. D. Scheres Firak, L. Farkas, **M. Náfrádi**, T. Alapi: *Degradation of chlorinated and hydroxylated intermediates in UVA/CIO₂ systems: A chlorine-based advanced oxidation process investigation*, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(3), 107554; <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107554> IF=5,909 Q1
2. **M. Náfrádi**, K. Hernádi, Z. Kónya, T. Alapi: *Investigation of the efficiency of BiOI/BiOCl composite photocatalysts using UV, cool and warm white LED light sources – photon efficiency, toxicity, reusability, matrix effect, and energy consumption*; Chemosphere, 2021, 280, 130636 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130636> IF=5,778 Q1
3. N. Finčur, P. Sfirloagă, P. Putnik, V. Despotović, M. Lazarević, M. Uzelac, B. Abramović, P. Vlazan, C. Ianăși, T. Alapi, **M. Náfrádi**, I. Maksimović, M. Putnik–Delić, D. Šojić Merkulov: *Removal of Emerging Pollutants from Water using Environmentally Friendly Processes: Photocatalysts Preparation, Characterization, Intermediates Identification and Toxicity Assessment*; Nanomaterials, 2021, 11(1), 215 <https://doi.org/10.3390/nano11010215> IF=4,324 Q1
4. D. Šojić Merkulov, M. Lazarević, A. Djordjevic, **M. Náfrádi**, T. Alapi, P. Putnik, Z. Rakočević, M. Novaković, B. Miljević, Sz. Bognár, B. Abramović: *Potential of TiO₂ with Various Au Nanoparticles for Catalyzing Mesotrione Removal from Wastewaters under Sunlight*; Nanomaterials, 2020, 10, 1591 <https://doi.org/10.3390/nano10081591> IF=5,076 Q1
5. G. Rózsa, Á. Fazekas, **M. Náfrádi**, T. Alapi, K. Schrantz, E. Takács, L. Wojnárovits, T. Oppenländer: *Transformation of atrazine by photolysis and radiolysis: kinetic parameters, intermediates and economic consideration*; Environmental science and pollution research, 2019, 26: 23 pp. 23268–23278., 11 p. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05599-9> IF=3,056 Q2
6. J. Farkas, **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, B. C. Pravda, K. Schrantz, K. Hernádi, T. Alapi: *Comparison of advanced oxidation processes in the decomposition of diuron and monuron – efficiency, intermediates, electrical energy per order and the effect of various matrices*, Environmental Science: Water Research & Technology, 2018, 4, 13–45 <https://doi.org/10.1039/C8EW00202A> IF=3,635 Q1
7. G. Simon, T. Gyulavári, K. Hernádi, M. Molnár, Zs. Pap, G. Veréb, K. Schrantz, **M. Náfrádi**, T. Alapi: *Photocatalytic ozonation of monuron over suspended and immobilized TiO₂–study of transformation, mineralization and economic feasibility*, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2018, 356, 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.01.025> IF=3,350 Q2

ΣIF: 31,128

Dolgozat témájához szorosan nem kapcsolódó konferenciakiadványok:

1. T. Alapi, **M. Náfrádi**, T. Hlogyik, K. Hernádi: *BiOI/BiOCl Composite Photocatalysts – Synthesis, Characterization, and Application for the Elimination of Organic Pollutants using Various LED Light Sources* – The 5th International Conference on New Photocatalytic Materials for Environment, Energy and Sustainability, The 6th International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (NPM-5/PAOT-6), Szeged, 05. 24–27, 2021 (ISBN 978-963-306-789-5)
2. G. Kozma, K. Lipták, **M. Náfrádi**, T. Alapi, Á. Kukovecz, Z. Kónya: *One Step Mechanochemical Synthesis of ZnO Nanoparticles as Perovskite Substrate* – The 5th International Conference on New Photocatalytic Materials for Environment, Energy and Sustainability, The 6th International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (NPM-5/PAOT-6), Szeged, 05. 24–27, 2021 (ISBN 978-963-306-789-5)
3. L. Farkas, D. Scheres Firak, **M. Náfrádi**, T. Alapi: *Application of Coumarin to Determine and Compare the Rate of Hydroxyl Radical Formation in Aqueous Solutions Irradiated with 172 and 185 nm VUV Light* – The 5th International Conference on New Photocatalytic Materials for Environment, Energy and Sustainability, The 6th International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (NPM-5/PAOT-6), Szeged, 05. 24–27, 2021 (ISBN 978-963-306-789-5)
4. L. Farkas, A. Čovic, **M. Náfrádi**, T. Alapi: *Removal of Two pharmaceuticals, 5-Fluorouracil and Trimethoprim from Aqueous Media with UV, UV/VUV and VUV Photolysis* – The 5th International Conference on New Photocatalytic Materials for Environment, Energy and Sustainability, The 6th International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (NPM-5/PAOT-6), Szeged, 05. 24–27, 2021 (ISBN 978-963-306-789-5)
5. T. Alapi, L. Farkas, **M. Náfrádi**, G. Peintler: *Comparison of Xe-Excimer (172 nm) and Low-Pressure Mercury Vapor Lamps (185/254 nm) In Terms of Radical Generation Rate, Removal of Hazardous Organic Matter and Matrix* – The 5th International Conference on New Photocatalytic Materials for Environment, Energy and Sustainability, The 6th International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (NPM-5/PAOT-6), Szeged, 05. 24–27, 2021 (ISBN 978-963-306-789-5)
6. **M. Náfrádi**, T. Alapi, Z. Kónya, K. Hernádi, Á. Szamosvölgyi: *Investigation of the efficiency of BiOI/BiOCl composite photocatalysts using UV, cool and warm white LED light sources – photon efficiency, toxicity, reusability, matrix effect, and energy consumption* – 2nd International Conference on Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis 20–22 May 2021 Budapest, Hungary online event, (ISBN 978-963-454-694-8, 55–56.)
7. **M. Náfrádi**, K. Hernádi, T. Alapi: *Synthesis of bismuth-oxyhalide composite photocatalysts, and their application using UV and visible LED light sources* – International Conference on Energy, Environment and Storage of Energy (ICEESEN 2020), Kayseri (Turkey) 19–21 November 2020 ISBN 978-625-409-147-6, 567–573.)
8. T. Hlogyik, **M. Náfrádi**, K. Hernádi, T. Alapi: *BiOCl/BiOI composite photocatalysts – investigation of their efficiency using UV and visible LED light sources* – 26th International Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, 2020. 11.23–24. (ISBN 978-963-306-771-0, 389–393.)
9. L. Farkas, **M. Náfrádi**, A. Čovic, T. Alapi: *Transformation of sulfadimethoxine and trimethoprim in vuv radiated aqueous solutions* – 26th International Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, 2020. 11. 23–24. (ISBN 978-963-306-771-0, 394–398.l)
10. L. Farkas, **M. Náfrádi**, T. Alapi: *Effect of flow breakers on the vuv photolysis of aqueous solution of coumarin* – 25th International Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, 2019.10.7–8. (ISBN 978-963-306-702-4, 307–311.)

11. Farkas L., I. Monzini, **Náfrádi M.**, Fuderer D., Alapi T. – *Szulfametazin vizes oldatának kezelése uv, uv/vuv fotolízissel, ózonos kezeléssel és uv/ózon kombinációjával* – XLII. Kémiai előadói napok, Szeged, 2019. október 28–30. (ISBN 978–963–306–702–4, 35–41. oldal)
12. Farkas L., Monzini I., **Náfrádi M.**, Fuderer D., Alapi T.: *Szulfametazin vizes oldatának kezelése UV, UV/VUV fotolízissel, ózonos kezeléssel, és UV/ózon kombinációjával* – 8. Környezetkémiai Szimpózium, Siófok, 2019. 10. 10–11.
13. **Náfrádi M.**, Bartus Pravda C., Alapi T.: *Mátrix hatás vizsgálata fenilurea peszticidek heterogén fotokatalitikus átalakítására – reakcióközeg, huminsavak és szervesetlen ionok* – Tavasz Szél, Győr, 2018. május 04–06.