

Magyar Kémikusok Egyesülete Csongrád Megyei Csoportja és a
Magyar Kémikusok Egyesülete rendezvénye



XLV. KÉMIAI ELŐADÓI NAPOK

Előadás összefoglalók

Szegedi Akadémiai Bizottság Székháza
Szeged, 2022. október 25-27.

Szerkesztették

Takács Dóra

Vargáné Árok Zsófia

SZTE TTIK Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék

ISBN 978-615-6018-15-1

TARTALOMJEGYZÉK

A MAGYAR KÉMIKUSOK EGYESÜLETE ÁLTAL NÍVÓDÍJJAL KITÜNTETETT DIPLOMADOLGOZATOK	4
ÁTTEKINTŐ PROGRAM / SHORT PROGRAM.....	5
RÉSZLETES PROGRAM / DETAILED PROGRAM.....	6
KÖZÖSSÉGI PROGRAMOK	10
SOCIAL PROGRAM.....	11
ABSZTRAKTFÜZET	12
PLENÁRIS ELŐADÁS I.....	13
NÍVÓDÍJAS ELŐADÁSOK SZEKCIÓJA I.....	15
NÍVÓDÍJAS ELŐADÁSOK SZEKCIÓJA II.	21
ANALITIKAI ÉS KÖRNYEZETI KÉMIA SZEKCIÓ.	28
PLENÁRIS ELŐADÁS II.	35
ANYAGTUDOMÁNY SZEKCIÓ.	37
SZERVES KÉMIA SZEKCIÓ I.	45
SZERVES KÉMIA SZEKCIÓ II.....	51
ENGLISH SESSION I.	57
ENGLISH SESSION II.....	63
A XLV. KÉMIAI ELŐADÓI NAPOK KONFERENCIA	
KIADVÁNYKÖTETÉBE BENYÚJTOTT KÖZLEMÉNYEK.....	69
UV/S ₂ O ₈ ²⁻ ÉS UV/VUV/S ₂ O ₈ ²⁻ HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA A TRIMETOPRIM ÁTALAKÍTÁSÁRA	70
PEROXO-DISZULFÁT ION (PDS) HATÁSA BIOI FOTOKATALIZÁTOROK AKTIVITÁSÁRA	77
SELECTIVE TRANSFORMATION OF NORBORNENE AND OXANORBORNENE B-AMINO ACID DERIVATIVES INTO NOVEL FUNCTIONALIZED AZAHETEROCYCLES VIA RING-REARRANGEMENT METATHESIS	84
SYNTHESIS OF NOVEL FLUOROPHORES	91
2022. ÉVI KÉMIAI ELŐADÓI NAPOKAT TÁMOGATTÁK	98

UV/S₂O₈²⁻ és UV/VUV/S₂O₈²⁻ hatékonyságának vizsgálata a trimetoprim átalakítására

Szirmai Adrienn, Farkas Luca, Alapi Tünde

Szegedi Tudományegyetem, Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék, Szeged, Dóm tér 7.

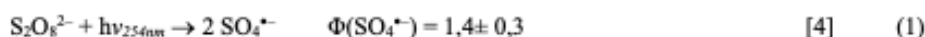
Absztrakt

Munkánk során egy antibakteriális gyógyszerhatóanyag, a trimetoprim (TRIM) átalakulását vizsgáltuk UV és UV/VUV fotolízissel, valamint azok peroxodiszulfát-ionnal (S₂O₈²⁻, PDS) való kombinációjára során. A kis intenzitású VUV fény jelenléte szignifikánsan növelte az átalakulás és a mineralizáció hatékonyságát a vízből képződő [•]OH-nek köszönhetően. A PDS UV fotolízise során SO₄^{•-} jön létre, ami jelentősen megnövelte mindkét eljárás hatékonyságát. A VUV fény additív hatása UV/VUV/PDS eljárásnál is megnyilvánul, azonban a PDS koncentráció növelésével a [•]OH hozzájárulása a TRIM átalakulásához és mineralizációjához csökken. Biológiailag tisztított kommunális szennyvíz, mint mátrix jelentősen csökkentette az eljárások hatékonyságát, amit a PDS koncentráció növelésével lehet ellensúlyozni. A szervetlen ionok (Cl⁻ és HCO₃⁻) hatását vizsgálva igazoltuk, hogy az azokból képződő gyökök szerepe nem elhanyagolható az átalakulás során.

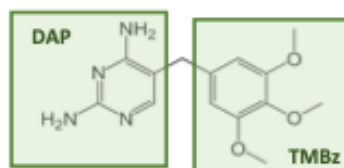
Bevezetés

Az antibiotikumok használata az emberi gyógyászat és az állattartás területén egyaránt nélkülözhetetlen. Az élő szervezetek azonban ezeket a vegyületeket nem hasznosítják maradéktalanul, azok változatlanul vagy metabolitjaik formájában az anyagcserével kiürülhetnek. Következésképpen a kommunális és állattartásból származó szennyvizek egyaránt tartalmaznak antibiotikumokat, melyeket hagyományos biológiai víztisztítással nem, vagy csak kis mértékben lehet eltávolítani. Az antibiotikumok környezetbe való kerülése antibiotikum rezisztens baktériumtörzsek kialakulásához vezet, amelyek évente több mint 700 000 ember halálát okozzák. Hatékony eltávolításuk kiegészítő kémiai víztisztítási eljárásokkal oldható meg, melyek alapvetően gyökgeneráláson alapulnak. Az elmúlt években a [•]OH mellett a szulfátgyökion (SO₄^{•-}) generálásán alapuló módszerek is elterjedté váltak.

A SO₄^{•-} generálásán alapuló UV/persulfát eljárásokat sokan az UV/H₂O₂ alternatívájaként tartják számon. SO₄^{•-} forrásként többnyire peroxodiszulfát (S₂O₈²⁻, PDS) sókat alkalmaznak. A PDS aktiválása megvalósítható többek közt UV fotolízissel, átmenetifémekkel, de akár egyszerű melegítéssel is [1]. A SO₄^{•-} elektródpotenciálját (E⁰ = 2,6 V) [2] csak kismértékben haladja meg a [•]OH-é (E⁰ = 2,9 V). Az általunk is használt PDS moláris abszorbanációjának értéke (20–22 M⁻¹ cm⁻¹) [3] a H₂O₂-éhoz hasonló érték, azonban a SO₄^{•-} képződésre vonatkozó kvantumhasznosítási tényező nagyobb, mint a [•]OH H₂O₂-ből képződésére vonatkozó (Φ([•]OH) = 1,0):



Munkánk során 254 nm-en (UV) valamint 254 nm és 185 nm-en (VUV) egyaránt sugárzó kisnyomású higanygőzlámpákat használva vizsgáltuk a trimetoprim (TRIM), egy antibakteriális hatású gyógyszer hatóanyag UV és UV/VUV fotolízisét PDS jelenlétében és anélkül. A TRIM perzisztens, biológiailag nehezen lebontható vegyület, amit mind a humán, mind az állatgyógyászatban nagy mennyiségben alkalmaznak. Jelenlétét már szennyvízben, ivóvízben és felszíni vizekben is kimutatták [5,6]. A TRIM szerkezetét tekintve egy metilénhíddal összekötött pirimidin-2,4-diamin (DAP) és egy 1,2,3-trimetoxibenzol gyűrűből (TMBz) áll, ahogyan azt az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: Trimetoprim szerkezeti képlete (TMBz: trimetoxi-benzol csoport; DAP: diamino-pirimidin csoport)

Kísérleti körülmények

A kísérletek során az oldatok elkészítéséhez nagy tisztaságú Milli-Q vizet használtunk, és minden esetben $1,0 \times 10^{-4}$ M kiindulási koncentrációjú TRIM oldatot kezeltünk. A PDS koncentrációját $5,0 \times 10^{-4}$ M – $2,0 \times 10^{-3}$ M tartományban változtattuk. A méréseim során kétféle, LightTech gyártmányú kisnyomású higanygőzlámpát használtunk, melyeknek elektromos teljesítménye (15 W) és geometriai paraméterei (307 mm hosszúság és 20 mm átmérő) megegyeztek, különbség csak a lámpabúra anyagában volt. A kvarc búrával rendelkező UV lámpa 254 nm, a nagy tisztaságú kvarc búrával rendelkező 254 és 185 nm (VUV) hullámhosszúságú fényt bocsátott ki. A 254 nm-es fotonok fluxusa mindkét lámpa esetén azonos volt, értéke $4,21 \times 10^{-6}$ mol_{foton} s⁻¹. A 185 nm-es VUV fotonok fluxusa egy nagyságrenddel kisebb, $4,90 \times 10^{-7}$ mol_{foton} s⁻¹. A fényforrások 50 mm belső átmérőjű üvegreaktorba merültek, így a fény optikai úthossza 15 mm volt. A vizsgálatok során minden esetben 400 mL oldatot kezeltünk.

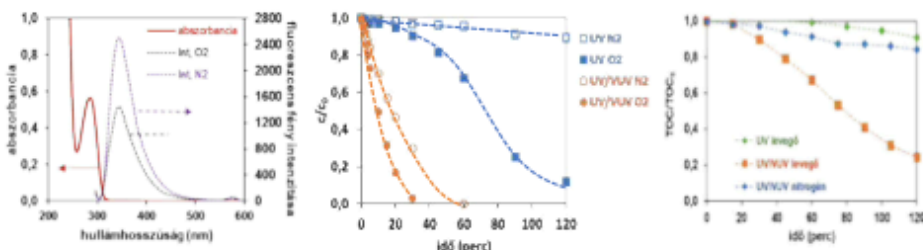
A TRIM koncentrációjának meghatározása folyadékkromatográfiásan történt (DAD detektor, Agilent 1100 típusú HPLC). A TRIM és bomlástermékei elválasztása Gemini 3u C6-phenyl 110A típusú kolonnán történt, 0,4 mL perc⁻¹ áramlási sebességgel, 10:90 arányú metanol:formiát-puffer (pH=3,7, 20 mM) eluent alkalmazva. A minták teljes szerves széntartalmát Analytik Jena által gyártott multi N/C 3100 típusú berendezéssel határoztuk meg. Az adszorbeálható klórtartalmú szerves vegyületek (AOX) mennyiségének meghatározása, APU-2 automata mintaelőkészítővel kiegészített Analytik Jena Multi X 2500 készülékkel történt. Mátrixként biológiailag kezelt kommunális szennyvizet használtunk, melynek vízanalitikai paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A mátrixhatás vizsgálatához használt vizek jellemző értékei

biológiailag tisztított lakossági szennyvíz	
pH	7,8
Vezetőképesség ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1258
KOI (mg L^{-1})	24,4
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg L^{-1})	< 0,4
NO_3^- (mg L^{-1})	3,37
Cl^- (mg L^{-1})	120
TOC (mg L^{-1})	6,9
HCO_3^- (mg L^{-1})	103,4

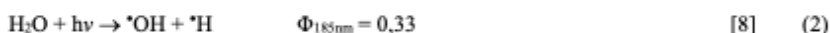
Eredmények és értékelésük

A TRIM moláris abszorpciája 254 nm -en $3418\text{ M}^{-1}\text{ cm}^{-1}$. Ennek ellenére az UV fotolízis a TRIM átalakítására nem alkalmas (2.b ábra). Oldott O_2 jelenlétében is csak 20 perces indukciós periódus után, feltehetően a gerjesztett állapotú TRIM és O_2 közti reakcióban képződő szingulett O_2 -nel ($^1\text{O}_2$) való reakciónak ($3,0 \times 10^6\text{ M}^{-1}\text{ s}^{-1}$ [7]) köszönhető. A $^1\text{O}_2$ képződését megerősíti az oldott O_2 -nek a fluoreszcens fényre való hatása.



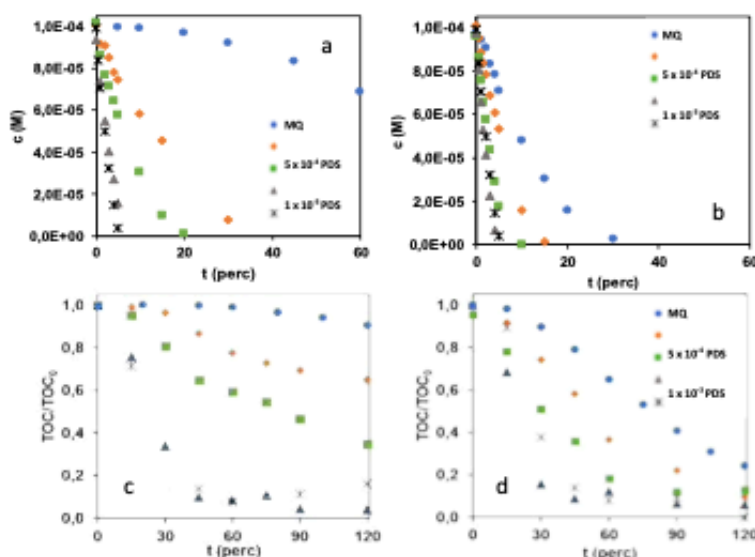
2. ábra: TRIM oldat abszorpciós és emissziós spektruma (a) (utóbbi 254 nm hullámhosszú gerjesztő fény esetén), valamint a TRIM ($1,0 \times 10^{-4}\text{ M}$) átalakulása (b) és mineralizációja (c) UV és UV/VUV fotolízis során

UV/VUV fotolízis esetén a VUV fotonokat a víz nyeli el, abból gyököket generál:



A gyökökkel való reakciók jelentősen hozzájárulnak a TRIM átalakulásához. Oldott O_2 jelenlétében a domináns reakció partner a $\cdot\text{OH}$, mivel a $\cdot\text{H}$ az oldott O_2 -nel reagálva kisebb reaktivitású és szelektív $\text{HO}_2\cdot/\text{O}_2\cdot^-$ képződéséhez vezet. Gyökös átalakulás során az oldott O_2 elreagál a szerves vegyületből képződő széncentrumú gyökökkel, így szerves peroxilgyökök képződésén keresztül új reakcióutat nyit meg az átalakuláshoz, valamint gátolja az anyavegyületté való visszaalakulást. Különösen nagy a hatása az oldott O_2 -nek UV/VUV fotolízis során a mineralizáció sebességére (2.c ábra). Az oldat TOC értéke oldott O_2 nélkül 120 perc alatt csupán 10%-kal csökken, míg levegővel átbuborékolatott oldatban 80%-kal (2.c ábra).

A PDS hozzáadása az UV és UV/VUV fotolízis hatékonyságát is jelentősen növelte a $\text{SO}_4^{\bullet-}$ képződésén keresztül (3. ábra). A PDS hatását $5,0 \times 10^{-4} \text{ M}$ – $3,0 \times 10^{-3} \text{ M}$ tartományban, azaz a TRIM-hez képest öttől harmincszoros PDS koncentráció felesleg mellett vizsgáltuk. A TRIM átalakulási sebessége a PDS koncentráció növelésével lineárisan nőtt UV és az UV/VUV fotolízis esetén egyaránt.



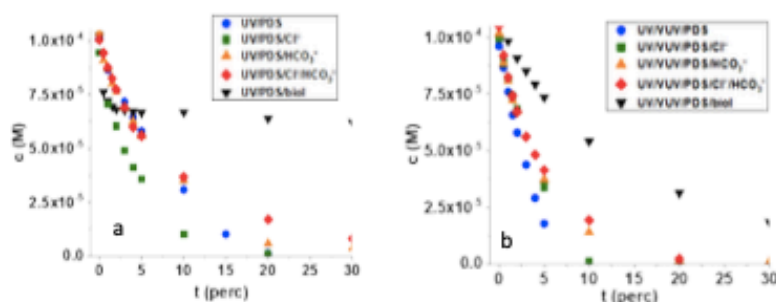
3. ábra: A TRIM koncentrációja (a, b) és a kezelt oldatok relatív TOC értéke (c, d) UV/PDS (a, c) és UV/VUV/PDS (b, d) esetén levegővel átbuborékolatott oldatokban

A TRIM-nek nem csak átalakulási sebességét, hanem mineralizációs sebességét is jelentősen megnövelte a PDS jelenléte, koncentrációtól függő mértékben (3. ábra). Az UV/VUV/PDS esetében a $\cdot\text{OH}$ és a $\text{SO}_4^{\bullet-}$ a szervesanyagok átalakulásához és mineralizációjához együttesen járulnak hozzá. A VUV fény additív hatása elsősorban kisebb PDS koncentrációknál ($< 2,0 \times 10^{-3} \text{ M}$) nyilvánult meg. A TRIM koncentrációjához képest húszszoros vagy annál nagyobb PDS koncentráció hozzáadásával már nincs különbség az UV/PDS és UV/VUV/PDS módszerek között, az alkalmazott fényforrástól függetlenül ~40 perc kezelés után a TOC teljesen elfogy (3.c és 3.d ábrák).

A TRIM közvetlen UV fotolízise elhanyagolható UV/PDS eljárás esetén (2.b ábra) annak ellenére, hogy a különböző PDS koncentrációk alkalmazásakor a fotonok közel 75%-át a TRIM, míg koncentrációjától függően, de legfeljebb azok 27%-át nyeli el PDS. Míg az UV fotonok az oldatban a $\text{SO}_4^{\bullet-}$ képződését biztosítják, a 185 nm-es VUV fotonokat az UV/VUV/PDS esetében is elsősorban a víz nyeli el és valószínűleg a $\cdot\text{OH}$ képződésén keresztül fejtik ki hatásukat. A TRIM a PDS UV fotolízise hatására képződő $\text{SO}_4^{\bullet-}$ -nal közel fele akkora sebességi állandóval ($3,88 \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [9]) reagál, mint a $\cdot\text{OH}$ -kel ($8,66 \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [7]). Azonban a $\text{SO}_4^{\bullet-}$ képződésének (1) sebessége a nagyobb 254 nm-es fotonfluxus és kvantumhasznosítási tényező miatt, annak kis moláris abszorbanciája ellenére is

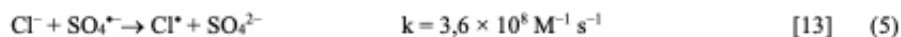
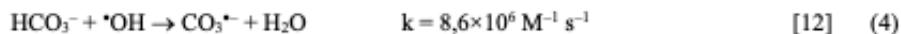
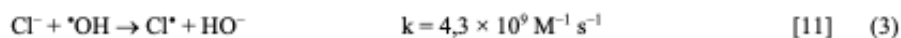
jelentősen meghaladja a $\cdot\text{OH}$ képződés sebességét, melyet alapvetően a 185 nm-es VUV fotonok UV fotonoknál egy nagyságrenddel kisebb fluxusa és a víz VUV fotolízisének (2) kvantumhasznosítási tényezője határoz meg. A $\cdot\text{OH}$ és $\text{SO}_4^{\cdot-}$ szerepének vizsgálatához tercier-butanol (t-BuOH) gyökfogót alkalmaztunk. A t-BuOH a $\cdot\text{OH}$ -kel ($6,0 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$) [10]) három nagyságrenddel nagyobb sebességi együtthatóval reagál, mint a $\text{SO}_4^{\cdot-}$ -kel ($4,0 \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [10]), ezért elsősorban a $\cdot\text{OH}$ -fogóként viselkedik PDS jelenlétében is. Az UV/VUV fotolízis során a gyökfogó 74%-kal csökkentette az átalakulási sebességet, ami a $\cdot\text{OH}$ domináns szerepét igazolja (2. táblázat). UV/VUV/PDS módszer esetén 1,0 mM PDS koncentráció mellett a t-BuOH hatása jóval kisebb, csupán 15% volt, mely azt mutatja, hogy a $\text{SO}_4^{\cdot-}$ a domináns reakciópartner és emellett a $\cdot\text{OH}$ relatív hozzájárulása jóval kisebb.

A víztisztítási eljárások gyakorlatban való alkalmazásának szempontjából fontos a mátrix hatásának vizsgálata, melyhez biológiailag tisztított kommunális szennyvizet (1. Táblázat) használtunk. A biológiailag tisztított szennyvíz jelentős mértékben csökkentette a TRIM átalakulási sebességét (4. ábra). UV/PDS esetén, $1,0 \times 10^{-3} \text{ M}$ PDS koncentrációnál az átalakulás néhány perc után leállt és csupán 30%-os átalakulás volt elérhető (4.a ábra). UV/VUV/PDS módszerrel a TRIM átalakulás ugyan nem áll le, de jelentősen lassul (4.b ábra). Azaz a VUV fény additív hatása a mátrix negatív hatását is képes részben kompenzálni. A mátrixban jelenlévő szerves és szervetlen anyagok különböző mértékben befolyásolhatják a módszer hatékonyságát. A szerves vegyületek mellett a szervetlen ionok is gyökfogóként viselkedhetnek, ezáltal az átalakulási sebességet csökkenthetik, viszont a belőlük képződő gyökök és gyökionok pozitív hatással is lehetnek az átalakulásra. A mátrixban legnagyobb koncentrációban jelenlévő Cl^- és a HCO_3^- hatását külön-külön és együttesen is vizsgáltuk annak érdekében, hogy a mátrix hatást értelmezzük. Az Cl^- és a HCO_3^- koncentrációja megegyezett a biológiailag tisztított szennyvízben mért koncentrációjukkal, azaz $3,43 \times 10^{-3} \text{ M}$ Cl^- és $8,62 \times 10^{-3} \text{ M}$ HCO_3^- koncentrációt használtunk.

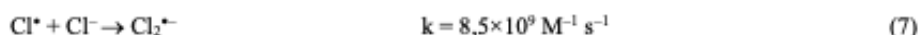


4. ábra: Cl^- és HCO_3^- , valamint biológiailag tisztított kommunális szennyvíz hatása a TRIM átalakulására UV/PDS (a) és UV/VUV/PDS (b) eljárásoknál ($1,0 \times 10^{-3} \text{ M}$ PDS)

A Cl^- és HCO_3^- hatása azonban elhanyagolható volt a biológiailag tisztított szennyvíz hatásához képest, annak ellenére, hogy mindkettő elreagál a $\cdot\text{OH}$ -kel és $\text{SO}_4^{\cdot-}$ -al:



A Cl^- gyökfogyó kapacitása az adott koncentrációban $\cdot\text{OH}$ -re és $\text{SO}_4^{\cdot-}$ -ra vonatkozóan is 80% körüli. Azonban semleges pH-n és megfelelően nagy Cl^- koncentráció mellett a $\text{Cl}^\cdot$ további átalakulása $\cdot\text{OH}$ képződéséhez vezet [15]:



Valószínűleg ezzel értelmezhető, hogy UV/PDS esetén a Cl^- hatása a TRIM átalakulására és mineralizációjára is enyhén pozitív (4. ábra). A HCO_3^- esetén az abból képződő $\text{CO}_3^{\cdot-}$ is hozzájárulhat a TRIM átalakulásához ($1,3 \times 10^7 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [16]), azonban sokkal kisebb mértékben, mint a $\cdot\text{OH}$ vagy a $\text{SO}_4^{\cdot-}$.

2. táblázat: A biológiailag kezelt szennyvíz, mint mátrix hatása a TRIM ($1,0 \times 10^{-4} \text{ M}$) átalakulási sebességére UV/VUV fotolízis, UV/PDS és UV/VUV/PDS eljárásoknál

	UV		UV/VUV	
	$r_0 (\times 10^{-7} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1})$	r_0/r_0^{ref}	$r_0 (\times 10^{-7} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1})$	r_0/r_0^{ref}
Milli-Q	-	-	$0,82 \pm 0,13$	-
biológiailag kezelt szennyvíz	-	-	$0,44 \pm 0,04$	0,52
Milli-Q, $1,0 \times 10^{-3} \text{ M PDS}$	$1,49 \pm 0,32$	-	$3,38 \pm 0,07$	-
biológiailag kezelt szennyvíz $1,0 \times 10^{-3} \text{ M PDS}$	az átalakulás megáll	-	$1,13 \pm 0,09$	0,33
Milli-Q, $2,0 \times 10^{-3} \text{ M PDS}$	$2,98 \pm 0,21$	-	$5,27 \pm 0,12$	-
biológiailag kezelt szennyvíz $2,0 \times 10^{-3} \text{ M PDS}$	$1,97 \pm 0,21$	0,66	$3,00 \pm 0,059$	0,57

Megduplázva a PDS koncentrációját ($2,0 \times 10^{-3} \text{ M}$) a TRIM mineralizációs és átalakulási sebessége is megközelítette az $1,0 \times 10^{-3} \text{ M PDS}$ mellett, Milli-Q vízben mért értékeket, ami jól mutatja, hogy az oxidálószer koncentrációjának alkalmas megválasztásával még tisztított szennyvízben is hatékony átalakulás érhető el. A szükséges PDS koncentrációt a mátrix vízanalitikai paraméterei határozzák meg.

A TRIM meglehetősen reaktív a klórtartalmú gyökökkel, így többek között a $\text{Cl}_2^{\cdot-}$ -al ($2,0 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$), $\text{ClO}^\cdot$ ($2,1 \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$) és a $\text{Cl}^\cdot$ -kel is reagál, utóbbira meglepően nagy $2,1 \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ sebességi állandót javasoltak. Ez alapján Cl^- jelenlétében, képződhetnek klórtartalmú vegyületek, így megmértük

a kezelt oldat AOX értékét 90 perc kezelés után. Az AOX érték elsősorban a PDS jelenlétében, UV/VUV fotolízis során nőtt meg; 90 perces kezelésnél értéke $40 \mu\text{g dm}^{-3}$ volt. Azonban HCO_3^- jelenlétében ez közel harmadára csökkent, ami feltehetően a HCO_3^- és $\text{Cl}^\bullet$ közti reakciónak ($2,4 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [17]) tulajdonítható, mely csökkenti a szerves vegyületekkel reagáló $\text{Cl}^\bullet$ koncentrációját.

Összefoglalás

Eredményeink alapján az UV/PDS és UV/VUV/PDS eljárások igen hatékonyak a szerves szennyezők átalakítása és mineralizációja szempontjából. A VUV fény additív hatásának mértéke függ az alkalmazott PDS koncentrációtól és a kezelendő víz szervesanyag és szervetlen ion koncentrációjától. A szervetlen ionok és a szulfát gyökion közti összetett reakciók viszont mindenképpen kiemelt figyelmet érdemelnek a gyökkészlet megváltoztatása és a lejátszódó reakciók szelektivitása és összetettsége miatt.

- [1] Y-q. Gao, N-y. Gao, Y. Deng, Y-q. Yang, Y. Ma: Chemical Engineering Journal, **2012** (195-196), 248-253.
- [2] Q. Yang, H. Choi, Y. Chen, D. D. Dionysiou: Applied Catalysis B: Environmental, **2008** (77), 300-307.
- [3] G. Mark, M. N. Schuchmann, H. P. Schuchmann, C. Sonntag: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, **1990** (55), 157-168.
- [4] H. Hermann: Physical Chemistry Chemical Physics, **2007** (9), 3925-3964
- [5] K. D. Brown, J. Kulis, B. Thomson, T. H. Chapman, D. B. Mawhinney: Science of the Total Environment, **2006** (366), 772-783
- [6] K. G. Karthikeyan, M. T. Meyer: Science of the Total Environment, **2006** (361), 196-207.
- [7] X. Luo, Z. Zheng, J. Greaves, W. J. Cooper, W. Song: Water Research, **2012** (46), 1327-1336.
- [8] N. Getoff, G. O. Schenck: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, **1968** (8), 167-178.
- [9] Y. Luo, R. Su, H. Yao: Environmental Science and Pollution Research **28**, **2021**, 62572-62582.
- [10] H. Li, Y. Yang, X. Li, X. Fan, N. Wang: Journal of Environmental Chemical Engineering, **2021** (9)
- [11] G. G. Jayson, B. J. Parsons, A. J. Swallow: Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases, **1973** (69), 1597-1607.
- [12] C. Duca, G. Imoberdorf, M. Mohseni: Journal of Environmental Science and Health, **2017** (52), 1-9.
- [13] Z. Zuo, Y. Katsumura, K. Ueda, K. Ishigure: Journal of the Chemical Society Faraday Transactions, **1997**, 1885-1891.
- [14] G. V. Buxton, G. A. Salmon, N. D. Wood: Proceedings of the 5th European Symposium on Physico-Chemical Behaviour of Atmospheric Pollutants, **1989**, 245-250.
- [15] J. De Laat, M. I. Stefan, IWA Publishing, **2017**, 383-424
- [16] B. A. Wols, D. J. H. Harmsen, E. F. Beerendonk, C. H. M. Hofman-Caris: Chemical Engineering Journal, **2014** (255), 334-343.
- [17] G. V. Buxton, M. Bydder, G. A. Salmon, J. E. Williams: Physical Chemistry Chemical Physics, **2000** (2), 237-245.

A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-22-3-SZTE-398 számú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs alapról finanszírozott szakmai támogatásával készült. A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) FK132742 számú OTKA pályázatának anyagi támogatásával történt.