

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**A GYÓGYSZERMARADVÁNYOK ELTÁVILÍTÁSI  
HATÉKONYSÁGÁNAK FOKOZÁSA A  
SZENNYVÍZTISZTÍTÁS SORÁN KOMETABOLIZMUSSAL  
ÉS NAGYHATÉKONYSÁGÚ OXIDÁCIÓS ELJÁRÁSSAL  
(NAGYENERGIÁJÚ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁSSAL)**

**Bezsenyi Anikó**

*Témavezető:*

Dr. Takács Erzsébet, MTA doktora

**Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola**

**Óbudai Egyetem**

**Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.**

**HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Sugárkémiai Laboratórium**



Óbudai Egyetem



**HUN  
REN**



Energiatudományi  
Kutatóközpont

**2024**

## I. A kutatás előzményei

A szennyvíztisztítás technológiai lépéseit jelenleg három általánosan elterjedt fokozatba soroljuk. Az I. fokozat a mechanikai tisztítás, amelynek során elsősorban a durva, nem oldott szennyeződések távolítják el. A **II. fokozat a biológiai tisztítás**, amelynek során a megmaradó lebegő szerves anyagnak, valamint az **oldott és kolloidális szerves szennyezőknek a lebontása, biológiai transzformációja** zajlik. Ennek két alapvető formája a **szuszpendált (eleveniszapos)** és a **fixágyas („biofilmes”)** rendszer. A III. fokozat fizikai-kémiai, illetve biológiai utókezelési technológiák halmaza (Tchobanoglous et al. 2014). A **szerves mikroszennyezők** (antibiotikumok, növényvédő szerek, stb.) a hagyományos szennyvíztisztítási eljárásokkal nem, vagy csak részben távolíthatók el a szennyvízből. A **IV. fokozat (negyedleges tisztítás)** célja ezek koncentrációjának csökkentése. A gyors ütemben fejlődő nagyhatékonyságú oxidációs eljárások (**Advanced Oxidation Process, AOP**) ígéretes módszereket jelentenek, amelyek különböző in situ gyökgenerálási folyamatokon keresztül előállított **szabadgyökök, erős oxidálószer** segítségével roncsolják a szerves molekulákat, ezzel elősegítve degradációjukat. A gyakorlatban legelterjedtebb jelenleg az ózonos kezelés. Az AOP módszerekhez sorolhatók a nagyenergiájú ionizáló sugárzást (Co-60 gamma, vagy gyorsított elektronok) alkalmazó módszerek is (Wang et al. 2022).

A hagyományos, **metabolikus** biológiai lebomlási folyamat során a szerves molekulák a mikroorganizmusok számára **növekedési szubsztrátként** szolgálnak a sejtek növekedéséhez és a szaporodáshoz, másrészt ezek **indukálják az enzimek** anyagcsere folyamatait. A mikroszennyezők, így a **gyógyszermaradványok jelentős része nem képes egyedüli szén- vagy energiaforrásként, azaz növekedési szubsztrátként funkcionálni** (Tran et al. 2013). Az enzimek szubsztrátkötő helye gyakran „lötyög”, vagyis nem köti kémiai szorosan a szubsztrátot, így hasonló kémia karakterű vegyületeknek lehetősége nyílik arra, hogy alternatív szubsztrátként kötődjenek az enzimen. A **kometabolizmus** jelensége ezen alapul. Egy olyan véletlenszerű folyamat, amikor az enzim tulajdonképpen hibázik, elvétí a természetes szubsztrátját. **Az idegen szubsztrátot (koszubsztrát) hasznosítani nem tudja a sejt, de az enzim egy kémiai műveletet végrehajt rajta.** Ehhez a folyamathoz azonban valamilyen növekedési szubsztrát jelenléte elengedhetetlen, ami a hibát vétő enzim természetes szubsztrátja. Tehát a kometabolizmus olyan biotranszformációs folyamat, ahol az átalakított anyag sem energiatermelésre, sem sejtfelepítésre nem alkalmas (Hult és Berglund 2007).

A denitrifikáló baktériumok által végzett **heterotróf kometabolizmus** jelentőségét nem tárták még fel teljes alaposággal. A denitrifikáló baktériumok funkcionális halmazába tartoznak a

**metilotróf baktériumok**, amelyek **metán-monooxygenáz (MMO) enzimének** jelentősége a kometabolizmusban más területeken igazolt (Márialigeti 2013). **A szennyvíztisztásban jelentőségüket még nem tárták fel. Továbbá a szennyvízkezelésben a kometabolizmus hatékonysága, illetve elterjedtsége (a gyógyszerek köre, amelyek esetében működik) sem tisztázott még.**

A kevésbé kutatott denitrifikációs kometabolizmus esetében elengedhetetlen a megfelelő mennyiségű, **könnyen hasznosítható szerves szubsztrát (rbKOI)** jelenléte, amely a szennyvíztisztító telepek jelentős hányadában nem áll rendelkezésre (Tardy et al. 2012). Az iszapkezelés részeként működő **sűrítési és víztelenítési lépéseknél** többféle **csurgalékvíz** keletkezik. Az anaerob közegben (pl. rothasztók) zajló hidrolízis során sok egyszerű szerves molekula (**illósavak, volatile fatty acids VFA**) képződik, amely **könnyen fogyasztható a denitrifikálók számára**. Ezek a savak nem közvetlenül az óriásmolekulák (fehérjék, cellulóz stb.) enzimikus bontásából származnak, hanem a lebontást végző biomassza anyagcseretermékei (savképződés). Nevezhetjük fermentációnak (erjedés) is a folyamatot. Az illósav frakció az rbKOI része, és olyan vegyületek alkotják, mint az **ecetsav, a propionsav, a vajsav, valeriánsav**. Általánosságban 2-6 szénatomszámú (**C2-C6**) molekulák (Yuan et al. 2011). **Nem kutatott terület a csurgalékvizek hasznosítása a kometabolizmus intenzifikálására.**

Az AOP működésük során szintén szolgáltatnak egyszerű szervesanyag forrást, így segíthetik a heterotróf kometabolizmust. A melléktermékek az alapvegyület szerkezetétől függően változnak: **aldehidek, alkoholok, karbonsavak/karboxilsavak, szervesetlen vegyületek** (Nawrocki et al. 2003). Az AOP hatása kettős. Egyrészt a gyógyszermolekulák szerkezetét megbontják, így megfelelő dózis alkalmazásával a molekulákat hozzáférhetővé teszik a mikroorganizmusok számára, lehetőséget adva a biotranszformációra (Taoufik et al. 2021, Takács et al. 2022). Emellett a kometabolizmushoz megfelelő rbKOI képződik az alkalmazásuk során. Az AOP hatása a biológiai bonthatóságra a kutatók egy szűk csoportja által vizsgált terület, de **az AOP kometabolizmust intenzifikáló hatásával még nem foglalkoznak.**

Káros melléktermékek is képződnek az AOP működése során. A legfontosabb talán a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, amelyből biotikus (kataláz enzim) és abiotikus bomlás során szabadul fel oxigén. Ez utóbbi az oxigénkoncentráció mérésén alapuló vizsgálatok eredményét meghamisítja (Lee et al. 2011). **A hibát, amelyet a hidrogén-peroxidból felszabaduló oxigén okozhat az eredményekben egyelőre csak KOI méréseknél kutatták, a BOI vizsgálatokra és légzésteztekre gyakorolt hatását még nem térképezték fel részletesen.**

## II. Célkitűzések

A kutatásaim során a szennyvíztisztításban a **kometabolizmus intenzifikálásának** lehetőségeit vizsgálom. Felmérem ennek a jelenségnek a **rövid és hosszútávú hatásait** a gyógyszermolekulák biotranszformációjában. A rövidtávú hatásokat **légzésteztek**, a hosszútávúakat **BOI mérések** segítségével vizsgálom.

A kometabolizmus nitrifikáló baktériumok esetében igazolt, és alaposan kutatott terület, ezért én a mikroorganizmusok másik nagy csoportjára, a szervesanyagfogyasztó baktériumokra (**heterotróf**) fókuszálok. Közülük kiemelten kezelem a szennyvíztisztításban kevésbé kutatott csoportot, a **metilotróf baktériumokat**, amelyek a külső forrásként metanollal táplált denitrifikáló rendszerekben jelennek meg nagyobb számban.

A **heterotróf kometabolizmus**hoz szubsztrátként főként egyszerű szerves vegyületeket (szerves savak, alkoholok) használok. A szennyvíztisztító rendszer különböző pontjain képződő **csurgalékvizek jelentős VFA tartalmuknak** köszönhetően megfelelő támogatói lehetnek a kometabolizmusnak, ezért több csurgaléktípus (centrifuga csurgalék, gravitációs sűrítő csurgalék), valamint az ugyancsak jelentős VFA-tartalmú előülepített szennyvíz kometabolizmusra gyakorolt hatását tervezem tesztelni. A csurgalékvizeknél és az előülepített szennyvíznél ezek desztillátumát használom, amely csak illósav komponenseket tartalmaz.

14 gyógyszervegyületen keresztül felmérem a **kometabolizmus elterjedtségét** (a gyógyszerek köre, amelyek esetében működik) a szennyvíztisztításban, illetve a **kometabolizmus hatékonyságát** diklofenák esetében (metilotróf biofilm).

Az **AOP hatását a biológiai bonthatóságra** több olyan gyógyszer esetében vizsgálom, amelyek hiányoztak a szakirodalomból (oxacillin, kloxacillin, tetraciklin és klórtetraciklin). A modellezéshez 0,5; 1; 2; 4 kGy dózisével  $\gamma$ -radiolízist használok. Az **AOP kometabolizmust intenzifikáló hatását** szulfametoxazol és diklofenák (koszubsztrátok) esetében tesztelem, többféle szubsztrát adagolása (ecetsav, metanol, etilén-glikol) mellett. Tervezem az AOP alkalmazása során képződő **hidrogén-peroxid BOI vizsgálatokra és a légzésteztekre gyakorolt hatásának felmérését**, hiszen jelentősen befolyásolhatják a vizsgálatok eredményét.

### III. Vizsgálati módszerek

A kometabolizmus, illetve a  $\gamma$ -radiolízissel modellezett AOP rövidtávú hatásait a gyógyszerek biológiai transzformációjára légzéstesztekkel vizsgáltam. A hosszútávú hatásokat 5 napos biokémiai oxigénigény (BOI<sub>5</sub>) vizsgálatokkal ellenőriztem. A légzéstesztek és BOI-vizsgálatok során bekövetkező mennyiségi változást az oltóanyag biomasszában az összes heterotróf baktériumszám meghatározásával (MSZ EN ISO 6222:2000) követtem.

A  $\gamma$ -radiolízis kísérleteket az Izotóp Intézet Kft. tulajdonában lévő SLL-01 típusjelzésű, panoráma típusú, 1,8 PBq aktivitású Co<sup>60</sup>  $\gamma$ -sugárforrással végeztem, 0,1 mM-os gyógyszeroldatokkal, 0,5; 1; 2; 4 kGy dózist alkalmazva, szobahőmérsékleten. A kezelés során képződő hidrogén-peroxidot mangán(IV)-oxid (MnO<sub>2</sub>) segítségével távolítottam el.

A biológiai vizsgálatok (BOI, légzéstesztek) kiegészítéseként, az eredmények részletes elemzéséhez különböző biológiai, fizikai és kémiai paramétereket használtam. A szerves anyag tartalom minőségi és mennyiségi változását a  $\gamma$ -radiolízis hatására **kémiai oxigénigény vizsgálattal (KOI, MSZ ISO 6060:1991)** és LiquiTOC (Elementar) elemanalizátorral végzett **teljes szerves széntartalom (Total Organic Carbon, TOC)** méréssel követtem. A vizsgálatok során oltóanyagként használt eleveniszap és biofilm megfelelő koncentrációjának beállításához **összes lebegőanyag tartalom (MSZ 260-3:1973)** méréseket használtam. Az oltóanyagok közösség szerkezetét **mikroszkópos analízissel (Zeiss Jena mikroszkóp)** mértem fel. A gyógyszerkoncentrációk nyomon követésére **nagyhatékonyságú folyadékkromatográfiát (HPLC)** használtam, a méréseket a Bálint Analitika Mérnöki Kutató és Szolgáltató Kft. végezte. A csurgalékvizek és az előülepített szennyvíz VFA koncentrációját és összetételét **gázkromatográfia (GC, Agilent 6890N típusú készülék)** segítségével mértem fel.

A **minireaktoros kísérleteknél** 1000 mL főzőpoharakban állítottam össze a méréssorozatot. Az **antibiotikum-rezisztencia változását a  $\gamma$ -radiolízis hatására agar-diffúziós teszttel** vizsgáltam, amelyhez a *Staphylococcus aureus* törzs (B.01755) a Mezőgazdasági és Ipari Mikroorganizmusok Nemzeti Gyűjteményéből (NCAIM) származott.

A kísérleteket a következő gyógyszerekkel végeztem: eritromicin, oxacillin, trimethoprim, piperacillin, kloxacillin, oxitetraciklin, klórtetraciklin, doxiciklin, szulfametoxazol, diclofenák, ibuprofen, klofibrinsav, karbamazepin. Szubsztrátként (GS = growth substrate) a következő egyszerű szerves vegyületeket alkalmaztam: metanol, etanol, hangyasav, ecetsav, propionsav, vajsav, valeriánsav, kapronsav, tejsav, etilén-glikol.

## **IV. Új tudományos eredmények**

**1. Kimutattam, hogy a légzésteraztekben használt mikroorganizmusok száma ( $10^4$  CFU  $\text{cm}^{-3}$ ) körülbelül két nagyságrenddel haladja meg a BOI<sub>5</sub> mérés kezdeti mikroorganizmus számát ( $10^2$  CFU  $\text{cm}^{-3}$ ), és ez a 3 órás vizsgálat során nem változik jelentősen. Ezzel ellentétben az ötnapos BOI mérés végén a mikroorganizmusok száma négy nagyságrenddel nagyobb ( $10^6$  CFU  $\text{cm}^{-3}$ ) a kiindulási állapoténál.**

A légzésteraztek kiindulási baktériumszáma (a 22 °C-on növő heterotróf aerob baktériumok száma)  $6,4 \times 10^4$  CFU  $\text{cm}^{-3}$  (72000 / 54000/ 66000  $\text{cm}^{-3}$ ; szórás 11,7%) nagyságrendet képvisel, amely a 3 órás vizsgálatok alatt kimutathatóan nem változott  $6,5 \times 10^4$  CFU  $\text{cm}^{-3}$  (69000 / 71000/ 56000  $\text{cm}^{-3}$ ; szórás 10,2%). A BOI<sub>5</sub> vizsgálatok kiindulási baktériumszáma  $6,4 \times 10^2$  CFU  $\text{cm}^{-3}$  (650 / 690 / 580  $\text{cm}^{-3}$ ; szórás: 7,1%). Az 5 napos tesztek során a baktériumok felszaporodtak az elfogyasztott tápanyagon és  $4,3 \times 10^6$  CFU  $\text{cm}^{-3}$  ( $3,1 \times 10^6$  /  $3,9 \times 10^6$  /  $5,9 \times 10^6$   $\text{cm}^{-3}$ ; szórás: 27,4%) összcsírásszámmal zárul a vizsgálat. (1. közlemény)

**2. Kimutattam, hogy a  $\gamma$ -radiolízis során képződő  $\text{H}_2\text{O}_2$  a toxicitásán és a felszabaduló oxigénen keresztül torzítja a BOI-értékeket.**

$\text{H}_2\text{O}_2$  kétféleképpen torzítja a BOI értéket. Egyrészt a toxikus vegyület megnöveli a toleránsabb baktériumcsoportok növekedéséhez szükséges adaptációs időt. Másrészt a BOI érték maximuma csökken, mert a hidrogén-peroxidból felszabaduló oxigén negatív hibát eredményez, mivel az  $\text{O}_2$ -fogyasztás ellen hat. (2. közlemény)

**3. Igazoltam, hogy az eleveniszapos technológiában a heterotróf kometabolizmus jelentősen hozzájárul a szulfamethoxazol (SMX) és diklofenák (DCF) biológiai lebontáshoz.**

Az értékelés alapja a kometabolikus légzés és a szubsztrátlégzés hányadosa, amely 1-nél nagyobb érték esetén a kometabolizmus működését igazolja. Ez a hányados az alkalmazott szubsztráttól függően szulfamethoxazolnál 2,41 – 10,75 és diklofenák esetében 1,29 – 18,22 közötti érték volt. (3. közlemény)

**4. Igazoltam, hogy a kometabolizmus hatékonysága szulfamethoxazol és diklofenák (mint kosubsztrát) esetében a szubsztrát típusától függ**

A kometabolikus légzés és a szubsztrátlégzés hányadosa az alkalmazott szubsztráttól függően változott. Szulfamethoxazol kosubsztráttal végzett kísérletek során ez a hányados a következőképpen alakult: valeriánsav (10,75) > ecetsav (9,95) > vajsav (7,01) > kapronsav

(4,90) > etanol (4,87) > etilén-glikol (3,68) > tejsav (3,39) > metanol (3,29) > propionsav (2,87) > hangyasav (2,41). Diklofenák esetében: hangyasav (18,22) > ecetsav (7,35) > etilén-glikol (6,43) > propionsav (4,31) > valeriansav (2,67) > tejsav (2,54) > kapronsav (2,05) > vajsav (1,97) > etanol (1,82) > metanol (1,29) (3. közlemény)

**5. Igazoltam, hogy kloxacillin, oxacillin, tetraciklin, klórtetracilin és diklofenák esetében a biológiai bonthatósága AOP kezelés (nagyenergiájú ionozáló sugárzás, radiolízis) hatására nagymértékben javul**

Minden gyógyszernél jelentős légzésintenzitás (Oxygen Uptake Rate, OUR) növekedést értünk el már 0,5 kGy dózis alkalmazásával (kloxacillin (CLX): 0,33; oxacillin (OXA): 0,24; tetraciklin (TCN): 0,25; klórtetraciklin (CTC): 0,24 mg O<sub>2</sub> dm<sup>-3</sup> óra<sup>-1</sup>), majd a dózissal együtt növekedett az oxigénfogyasztás sebesség (OUR) értéke és 4 kGy értéknél érte el a maximumot (CLX: 0,70; OXA: 0,53; TCN: 0,44; CTC: 0,69 mg O<sub>2</sub> dm<sup>-3</sup> óra<sup>-1</sup>). DCF esetében a 0,5 kGy dózis nem, csak az 1 kGy jelentett változást: 0,14 mg O<sub>2</sub> dm<sup>-3</sup> óra<sup>-1</sup> oxigénfogyasztás növekedést mértünk. (3., 4. és 5. közlemény)

**6. Kimutattam, hogy a szulfametoxazol és a diklofenák biológiai bonthatósága radiolízis és kometabolizmus együttes alkalmazásakor hatékonyabb, mint amikor két módszert külön-külön alkalmazunk.**

A kometabolizmus hatékonyságát a besugárzás fokozza. A besugárzás nélküli mintához viszonyított OUR (oxygen uptake rate) növekmény 0,5 kGy dózis esetében ecetsav, etilén-glikol, metanol sorrendben; SMX: 0,42 (840%) – 0,88 - 2,24 mg O<sub>2</sub> dm<sup>-3</sup> óra<sup>-1</sup>; DCF: 0,20 – 1,37 – 0,60 mg O<sub>2</sub> dm<sup>-3</sup> óra<sup>-1</sup>). SMX esetében metanol mellett nem szignifikáns a növekmény, tehát a besugárzás nem minden esetben fokozta a kometabolizmus hatékonyságát. (3. közlemény)

## V. Az eredmények hasznosítási lehetősége

A kutatásaink során igazoltuk, hogy a kometabolizmus valószínűleg nagyon elterjedt jelenség a szennyvíztisztítási technológiában. Ez a jelenség fokozható belső forrásokkal, önmagában a szennyvízzel (mechanikailag tisztított) is, és a különböző eredetű csurgalékvizekkel. A külső forrásként adagolt egyszerű szerves vegyületek (pl. metanol) ugyancsak hatékony eszközei az intenzifikálásnak. Az AOP-k modellezésére gyakran használt  $\gamma$ -radiolízis mind a gyógyszermolekulák biológiai lebontását, mind a kometabolizmus hatékonyságát növelte. Tehát metabolikus és kometabolikus útvonalon is segítette a gyógyszerek biotranszformációját. A módszer gyakorlati alkalmazása jelentősen csökkentené a szennyvíztelepek gyógyszer hatóanyag kibocsátását, emellett a baktériumokat is elpusztítaná.

Biológiailag csupán néhány mikroszennyező, illetve gyógyszermolekula bontható csak metabolikusan, azaz oly módon, hogy az anyagcserében valóban felhasználható (energia formájában, vagy szénként beépülve). Ez ritka jelenség, nem jellemző a szennyvíztisztító rendszerek mikroorganizmus-közösségére. Azonban a gyógyszerek többségének molekulaszervezete valószínűleg véletlenszerű enzimreakciók (kometabolizmus) segítségével hozzáférhető. Ez ugyan csak részleges oxidációt jelent, és nem a molekula teljes lebontását, mégis elindulhat ezeknek a bonyolult szerkezetű molekuláknak a biológiai átalakulása.

Így komoly beruházások nélkül is tudunk tenni a mikroszennyezők eltávolításáért, ha a kometabolizmusban közreműködő baktériumcsoportokat (pl. nitrifikálók, metilotrófok) képesek vagyunk megdolgoztatni. Minél többször végzi el ugyanazt a folyamatot egy enzim, annál nagyobb a véletlenszerű reakciók (kometabolizmus) valószínűsége. A nitrifikáló baktériumokat hosszú tartózkodási idővel, a denitrifikációban is jeleskedő metilotróf baktériumokat pedig metanoladagolással vehetjük rá a kometabolizmusra. Az eleveniszap általánosságban is képes erre egyszerű szerves savakban gazdag vizek (előülepített szennyvíz, csurgalékvizek) hasznosításával.

A nagyhatékonyságú oxidációs eljárások bevezetése több szempontból kedvező lehet a megemelkedett költségek ellenére is. A biológiailag nem vagy nehezen bontható szerves molekulák szerkezetét képesek megbontani, roncsolni az alkalmazott dózistól függő mértékben. A képződő egyszerű szerves és szervesetlen molekulák már hasznosíthatók a baktériumok számára, mindemellett a kometabolizmust is segítik, mert hajtómotorként szolgálnak olyan enzimek működéséhez, amelyek véletlenszerűen megváltoztathatják a gyógyszermolekulák szerkezetét.



## VI. Irodalmi hivatkozások listája

- Hult, K., & Berglund, P. (2007). Enzyme promiscuity: mechanism and applications. *Trends in Biotechnology*, 25(5), 231–238.
- Lee, E., Lee, H., Kim, Y. K., Sohn, K., & Lee, K. (2011). Hydrogen peroxide interference in chemical oxygen demand during ozone based advanced oxidation of anaerobically digested livestock wastewater. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8, 381-388.
- Márialigeti, K. (szerk), Borsodi, A., Felföldi T., Jáger, K., Makk, J., Romsics, Cs., Tóth, E., Bánfi, R., & Pohner, Zs. (2013). Bevezetés a prokarióták világába. ELTE pp. 7, 22, 58, 68-69, 75, 84-84, 108, 127-161, 204-206, 236-238, 288
- Nawrocki, J., Świetlik, J., Raczyk-Stanisławiak, U., Dąbrowska, A., Biłozor, S., & Ilecki, W. (2003). Influence of Ozonation Conditions on Aldehyde and Carboxylic Acid. *Ozone Science & Engineering*, 25, 53-62.
- Takács, E., Wang, J., Chu, L., Tóth, T., Kovács, K., Bezsenyi, A., Szabó, L., Homlok, R., & Wojnárovits, L. (2022). Elimination of oxacillin, its toxicity and antibacterial activity by using ionizing radiation. *Chemosphere*, 286, 131467.
- Taoufik, N., Boumya, W., Achak, M., Sillanpää, M., & Barka, N. (2021). Comparative overview of advanced oxidation processes and biological approaches for the removal pharmaceuticals. *Journal of Environmental Management*, 288, 112404.
- Tardy, G. M., Bakos, V., & Jobbágy, A. (2012). Conditions and technologies of biological wastewater treatment in Hungary. *Water Science and Technology*, 65(9), 1676–1683.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). *Wastewater engineering: treatment and resources recovery*. Metcalf and Eddy Inc. pp. 848-860, 1661-1667, 1486-1497, 1567-1593
- Tran, N. H., Urase, T., Ngo, H. H., Hu, J., & Ong, S. L. (2013). Insight into metabolic and cometabolic activities of autotrophic and heterotrophic microorganisms in the biodegradation of emerging trace organic contaminants. *Bioresource Technology*, 146, 721–731.
- Wang, S., Wang, J., Chen, C., He, S., Hu, J., & Zhang, Y., (2022). First full-scale application of electron beam technology for treating dyeing wastewater (30,000 m<sup>3</sup>/d) in China. *Radiation Physics and Chemistry* 196, 110136
- Yuan, Q., Sparling, R., & Oleszkiewicz, J. A. (2011). VFA generation from waste activated sludge: Effect of temperature and mixing. *Chemosphere*, 82(4), 603-607.

## VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

1) Wojnárovits, L., Homlok, R., Kovács, K., Bezsényi, A., & Takács, E. (2023). Ionizing radiation induced removal of ofloxacin, abatement of its toxicity and antibacterial activity in various water matrices. *Applied Sciences*, 13(12), 7211.

<https://doi.org/10.3390/app13127211>

IF: 4.5 (Q1)                      Hivatkozások száma: 2 (független: 0)

2) Bezsényi, A., Sági, G., Makó, M., Wojnárovits, L., & Takács, E. (2021). The effect of hydrogen peroxide on the biochemical oxygen demand (BOD) values measured during ionizing radiation treatment of wastewater. *Radiation Physics and Chemistry*, 189, 109773. doi:10.1016/j.radphyschem.2021.109773

IF: 2.776 (Q2)                      Hivatkozások száma: 12 (független: 9)

3) Bezsényi, A., Sági, G., Makó, M., Palkó, G., Tóth, T., Wojnárovits, L., & Takács, E. (2020). The effect of combined cometabolism and gamma irradiation treatment on the biodegradability of diclofenac and sulfamethoxazole. *Radiation Physics and Chemistry*, 170, 108642. doi:10.1016/j.radphyschem.2019.108642

IF: 2,851 (Q2)                      Hivatkozások száma: 16 (független: 13)

4) Takács, E., Wang, J., Chu, L., Tóth, T., Kovács, K., Bezsényi, A., Szabó, L., Homlok, R. & Wojnárovits, L. (2022). Elimination of oxacillin, its toxicity and antibacterial activity by using ionizing radiation. *Chemosphere*, 286, 131467.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131467>

IF: 8,8                                      Hivatkozások száma: 16 (független: 10)

5) Wojnárovits, L., Wang, J., Chu, L., Tóth, T., Kovács, K., Bezsényi, A., Szabó, L., Homlok, R., Takács, E., Matrix effect on the hydroxyl radical induced degradation of  $\beta$ -lactam and tetracycline type antibiotics. *Radiation Physics and Chemistry* 193 (2022) 109980. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.109980>

IF: 2,776 (Q2)                      Hivatkozások száma: 11 (független: 6)

## VIII. További tudományos közlemények

- 6) Kovács, K., Tegze, A., **Bezsényi, A.**, & Wojnárovits, L. (2023). Hydroxyl radical induced degradation of the  $\beta$ -blocker Nadolol and comparison with Propranolol. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 110330. doi: 10.1016/j.jece.2023.110330
- 7) Diószegi, M. B., Rékási, M., Szécsy, O., **Bezsényi, A.**, Nagy-Mezei, C., & Paukó, A. (2023). Mikrohullámú előkezelés hatása a biogázhozamra szennyvíziszap anaerob rothasztása során modellkísérletben. *Biztonságtudományi Szemle*, 5(2), 59-67.
- 8) **Bezsényi A.**, Gyarmati, I., Nagy-Mezei, Cs., Golyán, A.P., Kardos, L., Makó, M. (2023). A biofilmek és a komposzt lebontási folyamatainak (biodegradáció) modellezése. *MASZESZ Hírcsatorna* 2023/3. 38-52. **VITÁLIS SÁNDOR SZAKIRODALMI NÍVÓDÍJ (MHT)**
- 9) **Bezsényi A.**, Nagy-Mezei, Cs., Makó, M. (2023). A rothasztók anaerob lebontási folyamatainak (biodegradáció) modellezése. *MASZESZ Hírcsatorna* 2023/2. 5-20. **VITÁLIS SÁNDOR SZAKIRODALMI NÍVÓDÍJ (Magyar Hidrológiai Társaság)**
- 10) **Bezsényi A.**, Nagy-Mezei, Cs., Makó, M. (2023). Az aerob lebontási folyamatok (biodegradáció) modellezése a vízvonalon. *MASZESZ Hírcsatorna* 2023/1. 5-19. **VITÁLIS SÁNDOR SZAKIRODALMI NÍVÓDÍJ (Magyar Hidrológiai Társaság)**
- 11) Nagy-Mezei, C., **Bezsényi, A.**, Gyarmati, I., & Kardos, L. (2022). A szennyvíziszap nehézfém-tartalma és csökkentésének módszerei. *Journal of Central European Green Innovation*, 10(Suppl 1), 211-223.
- 12) Kardos, L., Erőss, A., Nagy-Mezei, C., **Bezsényi, A.**, Chen, H., & Silva, L. R. B. (2022). A kommunális szennyvíziszap vermikomposztálásának összefoglaló értékelése. *Journal of Central European Green Innovation*, 10(Suppl 1), 197-210.
- 13) **Bezsényi A.**, Nagy-Mezei, Cs., Makó, M. (2022). A biodegradáció modellezése a szennyvíztisztításban. *MASZESZ Hírcsatorna* 2022/4. 54-68. **VITÁLIS SÁNDOR SZAKIRODALMI NÍVÓDÍJ (Magyar Hidrológiai Társaság)**
- 14) **Bezsényi A.**, Nagy-Mezei, Cs., Gyarmati, I., Makó, M. (2022). A fröccsöntött civilizáció ára: mikro- és nanoműanyagok (MNP) a szennyvízben. *Vízmű Panoráma* 2022/02. pp. 37-48. **ÉV CIKKE díj (Vízmű Panoráma szakmai lap, Magyar Víziközmű Szövetség)**
- 15) **Bezsényi, A.**, Makó, M., Takács, E. (2021). Mit tehetünk, ha nincs pénzünk negyedik tisztítási fokozat kialakítására? *MASZESZ Hírcsatorna* 2021/4. 5-17. **Magyar Hidrológiai Társaság NÍVÓDÍJ**
- 16) **Bezsényi, A.**, Gyarmati, I., Oláh, J., Takács, E., Makó, M. (2021). A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen üzemelő nitrogéneltávolító bioszűrő-fokozat szerepe, teljesítménye és üzemeltetésének tapasztalatai. *Vízmű Panoráma* 2021/03.
- 17) **Bezsényi, A.**, Gyarmati, I., Makó, M., Takács, E. (2021). Gyógyszermaradványok a szennyvízben – Csak a holnap kihívása? *Vízmű Panoráma* 2021/06. 4-12.

- 18) **Bezsenyi A.**, Sági Gy., Bodáné Kendrovics R., Bakosné Diószegi M., Makó M., Palkó Gy., Wojnárovits L., Takács E. Kometabolizmus: mikrobiológiai segítség a gyógyszermaradványok szennyvízből való eltávolításához. *MASZESZ Hírcsatorna* 2019/4. 11-37.
- 19) Sági, G., **Bezsenyi, A.**, Kovács, K., Klátyik, S., Darvas, B., Székács, A., Mohácsi-Farkas, C., Takács, E., Wojnárovits, L. (2018). Radiolysis of sulfonamide antibiotics in aqueous solution: Degradation efficiency and assessment of antibacterial activity, toxicity and biodegradability of products. *Science of The Total Environment*, 622-623, 1009–1015. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.065
- 20) Sági, G., **Bezsenyi, A.**, Kovács, K., Klátyik, S., Darvas, B., Székács, A., Wojnárovits, L., Takács, E., (2017). The impact of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and the role of mineralization in biodegradation or ecotoxicity assessment of advanced oxidation processes. *Radiation Physics and Chemistry* 144, 361–366. doi:10.1016/j.radphyschem.2017.09.023
- 21) Sági, Gy., Kovács, K., **Bezsenyi, A.**, Csay, T., Takács, E., Wojnárovits, L., Enhancing the biological degradability of sulfamethoxazole by ionizing radiation treatment in aqueous solution. *Radiation Physics and Chemistry* 124, 179-183 (2016) doi: 10.1016/j.radphyschem.2021.109773

### **Konferenciakiadványok**

- 22) Nagy-Mezei, Cs., Gyarmati, I., **Bezsenyi, A.**, Kardos, L. (2023). A karbidmész hasznosítási lehetőségei kommunális szennyvíztisztító telepeken. In: Kaszás, Gábor (szerk.) A Magyar Hidrológiai Társaság által rendezett XL. Országos Vándorgyűlés dolgozatai. Budapest, Magyarország : Magyar Hidrológiai Társaság (2023) pp. 1-19., 19 p.
- 23) Nagy-Mezei, Cs., Gyarmati, I., **Bezsenyi, A.**, Kardos, L. (2023). A víztelenített szennyvíziszap jelentős TPH-tartalmának forrásai. In: Blanka-Végi, Viktória (szerk.) XVIII. Kárpát-medencei Környezettudományi konferencia = XVIII. Carpathian Basin Environmental Science Conference Szeged, Magyarország : Szegedi Tudományegyetem, Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék, Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem (2023) 139 p. pp. 41-42., 2 p.
- 24) Nagy-Mezei, Cs., **Bezsenyi, A.**, Gyarmati, I., Makó, M., Kardos, L. (2022). The role, the performance and the operational experiences of the nitrogen removal fixed-film biological stage operating at the South-Pest Wastewater Treatment Plant. In: Hosam, E.A.F. Bayoumi Hamuda (szerk.) Proceedings Book of 13th ICEEE-2022 International Annual Conference on “Global Environmental Development & Sustainability: Research, Engineering & Management”. Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2022) 579 p. pp. 227-243. 17 p.
- 25) Nagy-Mezei, Cs., **Bezsenyi, A.**, Gyarmati, I., Makó, M., Kardos, L. (2022). The role, the performance and the operational experiences of the nitrogen removal fixed-film biological stage operating at the South-Pest Wastewater Treatment Plant. In: Hosam, E.A.F. Bayoumi Hamuda (szerk.) Proceedings Book of 13th ICEEE-2022 International Annual Conference on “Global

Environmental Development & Sustainability: Research, Engineering & Management”  
Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2022) 579 p. p. 95

26) **Bezsenyi, A.**, Sági, Gy., Makó, M., Palkó, Gy., Tóth, T., Wojnárovits, L., Takács, E. (2019). The improvement of the biodegradability of diclofenac and sulfamethoxazole by combined cometabolism and gamma irradiation treatment *In: Alapi, Tünde; Ilisz, István (szerk.) Proceedings of the 25th International Symposium on Analytical and Environmental Problems. Szeged, Magyarország: University of Szeged (2019) 464 p. pp. 284-288., 5 p.*

27) Sági Gy., Kovács K., **Bezsenyi A.**, Csay T., Takács E., Wojnárovits L., 2015. Enhancing the biological degradability of sulfamethoxazol by ionizing radiation treatment in aqueous solution. *In: Szentmiklósi László (szerk.), Őszi Radiokémiai Napok 2015. Konferencia helye, ideje: Balatonszárszó, Magyarország, 2015.10.19–2015.10.21. Budapest: Magyar Kémikusok Egyesülete (MKE), pp. 47–52. ISBN:978–963–9970–59–5*