

Účinnost technologie CaviPlasma při degradaci léčiv a ekotoxikologické posouzení ošetřené vody

Klára Odehnalová^{1,2}, Alžběta Halášová², Eliška Maršálková¹, Radek Horňák³, Pavel Šťáhel³, Pavel Rudolf⁴, Blahoslav Maršálek¹

¹Botanický ústav AV ČR, v.v.i., Lidická 25/27, 602 00 Brno, Česká republika

²Farmaceutická fakulta, Masarykova Univerzita, Palackého třída 1946/1, 612 00 Brno, Česká republika

³Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Kotlářská 267/2, 611 37 Brno, Česká republika

⁴Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

e-mail: klara.odehnalova@ibot.cas.cz

Souhrn

Léčiva patří mezi perzistentní mikropolutanty, které konvenční čistírny odpadních vod často zcela neodstraní. Stále větší pozornost se proto věnuje pokročilým oxidačním procesům. Technologie CaviPlasma, spojující nízkoteplotní plazma a hydrodynamickou kavitaci, propojuje účinky působení ozonu, UV záření, rázových vln i širokého spektra reaktivních částic a umožňuje rychlou a účinnou degradaci i velmi odolných organických kontaminantů. Následné ekotoxikologické hodnocení vzniklých produktů zajišťuje komplexní posouzení procesu.

Klíčová slova: mikropolutanty, CaviPlasma, ekotoxicita

Summary

Pharmaceuticals are among the persistent micropollutants that are often not completely removed by conventional wastewater treatment plants. Consequently, advanced oxidation processes are receiving increasing attention. CaviPlasma technology combines low-temperature plasma and hydrodynamic cavitation to integrate the effects of ozone, UV radiation, shock waves and a broad spectrum of reactive particles. This enables the rapid and effective degradation of even the most resistant organic contaminants. Subsequent ecotoxicological evaluation of the resulting products provides a comprehensive assessment of the process.

Keywords: micropollutants, CaviPlasma, ecotoxicity

Úvod

Farmaceutické látky představují významnou skupinu mikropolutantů, které se ve vodním prostředí objevují stále častěji a které současné čistírenské technologie zpravidla nedokážou dostatečně odstranit. Do odpadních vod se dostávají jak v důsledku jejich užívání v humánní a veterinární medicíně, tak v souvislosti s nevhodným nakládáním s nevyužitými léčivy v domácnostech. Další významné zdroje zahrnují splachy z půd hnojených materiály obsahujícími rezidua léčiv, odpadní vody ze živočišné výroby, zařízení zdravotní a sociální péče a rovněž emise z farmaceutického průmyslu. Všechny tyto zdroje přispívají k jejich perzistentní přítomnosti v povrchových vodách, kde mohou negativně ovlivňovat vodní organismy a narušovat ekologickou rovnováhu vodních ekosystémů. [1]

Mezi těmito látkami představují významnou podskupinu antipsychotika, která jsou v odpadních vodách často detekována. Jejich environmentální relevance vyplývá z kombinace vysoké spotřeby, účinku i při nízkých koncentracích a omezené biologické odbouratelnosti. Vzhledem k

jejich lipofilní povaze mají tendenci přetrvávat ve vodné fázi i v kalech, vykazovat bioakumulační potenciál a negativně ovlivňovat nervovou soustavu necílových organismů. [2]

S ohledem na tyto skutečnosti roste zájem o pokročilé oxidační procesy, které mohou sloužit jako účinné doplňkové technologie pro dočištění odpadních vod. Jednou z perspektivních technologií je kombinace nízkoteplotní plazmy a hydrodynamické kavitace. V tomto prostředí dochází k plazmochemickým reakcím, které vedou k tvorbě vysoce reaktivních radikálů kyslíku, dusíku a síry, mezi nimiž jsou klíčové hydroxylové radikály, peroxidy a ozon. Současně je generováno také UV-C záření, které dále přispívá k degradaci organických kontaminantů. [3,4]

Nedílnou součástí hodnocení účinnosti použité technologie je ekotoxikologické testování, které umožňuje posoudit nejen odstranění původních látek, ale i potenciální vznik případných toxičtějších transformačních produktů. Pokročilé oxidační procesy mohou vést ke vzniku reaktivních meziproduktů a reziduálních reaktivních forem kyslíku (ROS), které mohou ovlivnit výslednou toxicitu upravené vody. Z tohoto důvodu je vhodné zařazení následného dočištění, například pomocí filtrace na granulovaném aktivním uhlí (GAU), které je účinné při odstraňování zbytkových organických látek i reaktivních oxidantů a přispívá ke snížení celkové ekotoxicity výstupní vody.

Experimentální část

Analýza odpadních vod a degradace antipsychotik

Psychofarmaka z řad antidepresiv a anxiolytik (citalopram, sertralin, fluoxetin, paroxetin, venlafaxin, alprazolam a mirtazapin) a jejich metabolitů byla analyzována metodou LC-MS/MS po jejich předchozí extrakci na pevné fázi.

Degradace antipsychotik byla prováděna ve vsázkovém reaktoru, kdy byla ošetřovaná voda podrobena opakovanému průchodu jednotkou. Parametry přístroje jsou uvedeny v Tabulce 1. Testován byl jeden, tři, pět a deset průchodů jednotkou, což odpovídá specifickým energiím 10, 29, 48 či 96 kJ/l (2,8; 8,1; 13,3 a 26,7 kWh/m³).

Tabulka 1: Nastavení CaviPlasmové jednotky

Parametr	Hodnota
Příkon (W)	4000
Frekvence zdroje (kHz)	11.5
Průtok (l/min)	25
Průměr dýzy (mm)	10
Materiál elektrody	Titan
Rychlost tvorby peroxidu vodíku (mg/l/s)	1.33 - 1.54

K odstranění zbytků oxidačních činidel a dočištění odpadní vody bylo použito granulované aktivní uhlí Chemviron Filtrasorb 400 s velikostí částic 12 × 40 mesh a specifickou plochou BET 1050 m²/g. Protokol filtrace byl navržen tak, aby zohlednil realistické hydraulické podmínky typické pro dočišťovací stupně ČOV s průměrným hydraulickým retenčním časem 18 min.

Za účelem ekotoxikologického hodnocení byla testována inhibice růstu řas kultury *Pseudokirchneriella subcapitata* (ČSN EN ISO 8692) a inhibice pohyblivosti korýše *Daphnia magna* (ČSN EN ISO 6341).

Výsledky

Obsah antipsychotik včetně jejich hlavních metabolitů byl monitorován v odpadních vodách z ČOV Modřice (kapacita 100 000 EO) a ČOV Veverská Bítýška (6 000 EO). V obou zařízeních byly nejvyšší průměrné koncentrace zjištěny u venlafaxinu a jeho metabolitu O-

desmethylvenlafaxinu, dosahující hodnot vyšších stovek ng/l. U citalopramu a N-desmethylcitalopramu byly naměřeny koncentrace řádově v nižších stovkách ng/l. Ostatní analyzované látky se v odpadních vodách vyskytovaly v podstatně nižších koncentracích (řádově desítky ng/l).

Účinnost degradace antipsychotik se mezi jednotlivými vzorky odpadní vody lišila a stoupala s přidáním energie (Tabulka 2). Nicméně již jeden průchod jednotkou (10 kJ/l) způsobil inhibici růstu řas kultury *Pseudokirchneriela subcapitata* o více než 97 % a vedl k 95% inhibici pohyblivosti korýše *Daphnia magna*.

Tabulka 2: Koncentrace a míra degradace antipsychotik

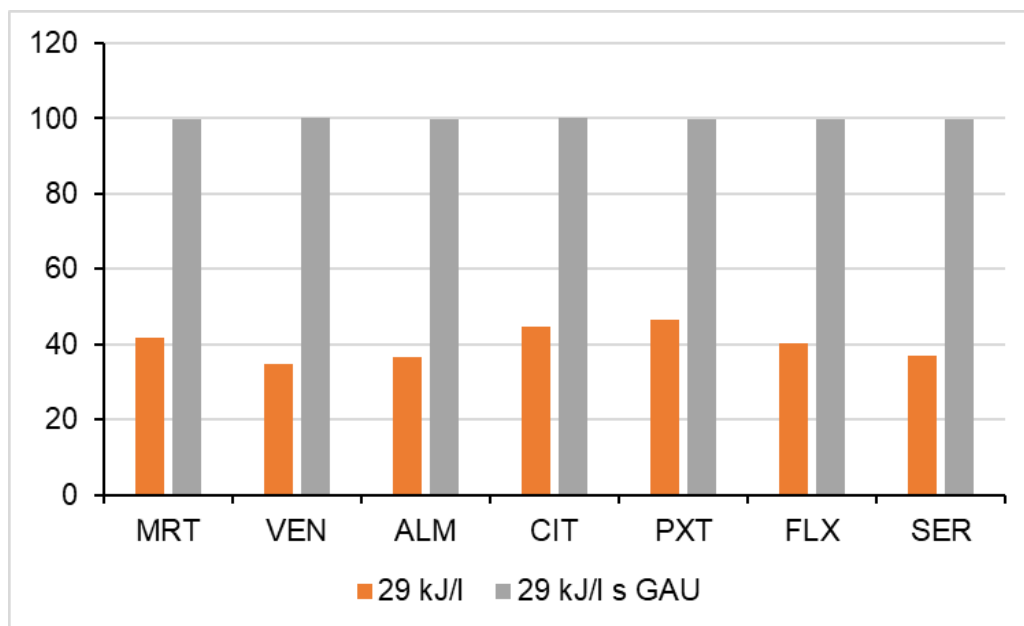
analyt	ČOV Veverská Bítýška (12/2025) - 48 kJ/l		ČOV Veverská Bítýška (01/2026) - 48 kJ/l		ČOV Veverská Bítýška (01/2026) - 96 kJ/l	
	koncentrace (ng/l)	degradace (%)	koncentrace (ng/l)	degradace (%)	koncentrace (ng/l)	degradace (%)
mirtazapin	47.6 ± 0.5	26	58.9 ± 2.5	48	58.9 ± 2.5	77
venlafaxin	681.1 ± 24.5	17	349.9 ± 20.4	49	349.9 ± 20.4	81
alprazolam	1.7 ± 0.1	33	0.8 ± 0.2	43	0.8 ± 0.2	66
citalopram	215.5 ± 13.8	20	312.7 ± 41.1	53	312.7 ± 41.1	99
fluoxetin	3.1 ± 0.1	32	5.6 ± 0.2	45	5.6 ± 0.2	93
sertralin	52.3 ± 1.0	40	90.7 ± 1.4	65	90.7 ± 1.4	99

Zařazení filtru s granulovaným aktivním uhlím (GAU) významně zvýšilo účinnost odstranění sledovaných antipsychotik z odpadní vody (Obrázek 1). Současně došlo k účinné eliminaci zbytkových reaktivních oxidačních činidel (demonstrováno úbytkem peroxidu vodíku, který vznikl při ošetření jednotkou CaviPlasma), čímž se snížila potenciální ekotoxická upravené vody (Tabulka 3).

Tabulka 3: Výsledky ekotoxikologického testování ošetřených odpadních vod

vzorek	<i>Daphnia magna</i>		<i>Pseudokirchneriela subcapitata</i> ¹
	imobilizace 24h (%)	imobilizace 48h (%)	inhibice růstu po 72h (%)
kontrola	0	0	-48.9
29 kJ/l	100	100	-97.6
29 kJ/l s GAU	20	25	1.1

¹ kladná hodnota znamená stimulaci růstu, záporná jeho inhibici, hodnoty do 10 % jsou brány jako neprůkazné



Obrázek 1: Účinnost odstranění antipsychotik v odpadní vodě bez a s aplikací filtru s granulovaným aktivním uhlím (GAU)

Závěr

Na modelu antipsychotik byla prokázána účinnost technologie CaviPlasma při degradaci farmaceutických mikropolutantů. Účinnost odstranění se výrazně lišila v závislosti na charakteru matrice odpadní vody. Zařazení filtru s granulovaným aktivním uhlím (GAU) za jednotkou CaviPlasma nejen zvýšilo míru odstranění antipsychotik, ale rovněž vedlo k významnému snížení ekotoxicity výstupní vody.

Poděkování

Tato práce byla podpořena Technologickou agenturou České republiky a Ministerstvem životního prostředí České republiky v rámci programu „Životní prostředí pro život“ (projekt č. SS07020057).

Použitá literatura

1. Naseem, A.; Alneghery, L.; Al-Zharani, M.; Nasr, F.; Jawad, S.; Umer, M.; Sayyed, R.; Ilyas, N. An insight into the impacts of pharmaceutical pollutants on the ecosystem and the potential role of bioremediation in mitigating pharmaceutical pollutants. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PHARMACEUTICS* **2025**, *680*, doi:10.1016/j.ijpharm.2025.125791.
2. Davey, C.; Hartelust, A.; Helmus, R.; Praetorius, A.; van Wezel, A.; ter Laak, T. Presence, removal, and risks of psychopharmaceuticals in wastewater streams. *ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY* **2025**, *44*, 375-385, doi:10.1093/etjnl/vgae042.
3. Rudolf, P.; Pochylý, F.; Sťahel, P.; Ráhel, J.; Čech, J.; Maršálek, B. DEVICE FOR TREATMENT OF LIQUIDS AND THE METHOD OF TREATMENT OF LIQUIDS WITH USE OF THIS DEVICE. 2023.
4. Odehnalova, K.; Cech, J.; Marsalkova, E.; Stahel, P.; Mayer, B.; Santana, V.T.; Rudolf, P.; Marsalek, B. Exploring the dynamics of reactive oxygen species from CaviPlasma and their disinfection and degradation potential - the case of cyanobacteria and cyanotoxins. *Environmental science and pollution research international* **2025**, *32*, 849-863, doi:10.1007/s11356-024-35803-4.