



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

ODSTRAŇOVÁNÍ VYBRANÝCH LÉČIV Z ODPADNÍCH VOD OXIDAČNÍMI PROCESY

REMOVAL OF SELECTED MEDICINES FROM WASTE WATER BY OXIDATION PROCESSES

DISERTAČNÍ PRÁCE - ZKRÁCENÁ VERZE

DOCTORAL THESIS - SHORT VERSION

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Úterský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. PETR HLAVÍNEK, CSc., MBA

BRNO 2020

KLÍČOVÁ SLOVA

Odpadní voda, oxidační procesy, jednotka AOP, léčiva

KEYWORDS

Waste water, oxidation processes, AOP unit, pharmaceuticals

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Knihovnické informační centrum, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně,
Veveří 331/95, 602 00 Brno

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Michal Úterský *Odstraňování vybraných léčiv z odpadních vod oxidačními procesy*.
Brno, 2020. 102 s., 0 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta
stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc.,
MBA

OBSAH

1	ÚVOD.....	3
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	4
3	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	5
3.1	TESTOVANÁ LÉČIVA PROTI BOLESTI.....	5
4	VLASTNÍ ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	7
4.1	TESTOVÁNÍ JEDNOTKY AOP NA VĚDECKÉM CENTRU AdMaS.....	7
4.1.1	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ OZONU (O ₃)	8
4.1.2	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ O ₃ + UV	10
4.1.3	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ O ₃ + H ₂ O ₂	11
4.1.4	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ H ₂ O ₂	13
4.1.5	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ H ₂ O ₂ + UV	15
4.1.6	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ UV ZÁŘENÍ	16
4.2	TESTOVÁNÍ JEDNOTKY AOP NA ČISTÍRNĚ ODPADNÍCH VOD BRNO MODŘICE	18
4.2.1	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ OZONU (O ₃)	19
4.2.2	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ O ₃ +UV	22
4.2.3	TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ O ₃ +H ₂ O ₂	25
5	ZÁVĚR.....	30
5.1	PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE.....	31
5.2	PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI	31
6	POUŽITÁ LITERATURA.....	32
	SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ	33
	ŽIVOTOPIS.....	36
	ABSTRAKT.....	37

1 ÚVOD

Disertační práce se zabývá použitím pilotní jednotky AOP (Advanced Oxidation Processes) k účelu odstraňování vybraných léčiv z odpadních vod pomocí pokročilých oxidačních procesů. Pilotní jednotka AOP byla k účelu testování pokročilých oxidačních procesů pořízena na vědecké centrum AdMaS (Advanced Materials, Structures and Technologies), které je součástí Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Prvotním úkolem pro využití jednotky bylo studium její obsluhy (absolvování školení) a sběr informací k řešení problematiky odstraňování léčiv z odpadní vody pokročilými oxidačními procesy, které jsou součástí disertační práce. Hlavními cíly disertační práce je laboratorní a reálné ověření účinnosti pokročilých oxidačních procesů k možnému dočištění odpadních vod. Testovaná technologie je vyhodnocena z hlediska účinnosti odstranění vybraného znečištění. Chemické analýzy vzorků testované odpadní vody, které byly nezbytné k vyhodnocení účinnosti pokročilých oxidačních procesů byly prováděny (z důvodu náročnosti jejich stanovení) ve spolupráci s Fakultou chemickou VUT v Brně. Požadovanými výsledky bylo dosažení vysoké účinnosti odstranění vybraných léčiv z vypouštěných odpadních vod na vybrané ČOV (čistírně odpadních vod) za různých kombinací pokročilých oxidačních procesů a dávek jednotlivých oxidačních činidel. Kombinací pokročilých oxidačních procesů a jejich dávek se myslí zejména množství a kombinace ozonu, peroxidu vodíku a UV záření. Testovaným druhem léčiv, které bylo vybráno z důvodu jeho širokého užívání a pro svou vysokou rezistenci vůdčí klasickým procesům čištění na běžných mechanicko-biologických čistírnách odpadních vod, byly nesteroidní protizánětlivé léky proti bolesti. Z široké škály účinných látek proti bolesti byla vybrána léčiva naproxenum natricum (naproxen), diklofenak, ketoprofen a ibuprofen. Tato léčiva byla vybrána z důvodu, že patří mezi nejhojněji používaný druh léčiv proti různým typům bolesti a jejich koncentrace v odpadních vodách dle odborných publikací neustále narůstá. Počty dodaných balení těchto léčiv do České republiky jsou dle informací ze SÚKL (Státního ústavu pro kontrolu léčiv) mezi 400.000 až 10.000.000 kusů ročně pro jednotlivé druhy.

Požadavky na jakost vypouštěných vod neustále rostou, proto je věnována stále větší pozornost látkám biologicky těžce rozložitelným. Znečištění těmito látkami je nežádoucí díky tomu, že nedochází k jejich odbourávání v životním prostředí, což má za následek jejich akumulaci nebo koloběh. Mezi biologicky nerozložitelné látky patří tzv. xenobiotika, neboli cizorodé (umělé) látky. Proto se vedle klasických metod čištění odpadních vod nasazují pokročilé metody čištění, mezi něž patří pokrokové oxidační procesy (AOP). Pokrokové oxidační procesy, někdy označované jako moderní oxidační procesy, jsou využívány k oxidaci komplexních organických sloučenin, u kterých je obtížné, případně pomalé nebo nemožné dosáhnout rozkladu na jednodušší sloučeniny použitím prostého biologického čištění [1,2].

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce řeší problematiku odstranění vybraných mikropolutantů, konkrétně nesteroidních protizánětlivých léčiv používaných k omezení bolesti (naproxen, diklofenak, ketoprofen a ibuprofen). Bylo prokázáno, že přítomnost těchto látek v životním prostředí vede z dlouhodobého hlediska k chronické toxicitě vodních organismů, možnosti rozmnožení multirezistentních patogenních bakteriálních kmenů, zhoršení reprodukční činnosti živočichů a ovlivnění jejich endokrinního systému. V současné době neexistují limity pro léčiva ve vypouštěné odpadní vodě z čistíren odpadních vod. Odstraňování těchto látek z odtoků čistíren odpadních vod je ale plně podporováno evropskou směrnicí 2013/39/EU, tudíž lze dle mého názoru v budoucnu očekávat zavedení limitů na vypouštění i pro tyto látky. Perzistentní látky jako léčiva, dlouhodobě přetrvávají v nezměněné formě v životním prostředí z důvodu, že jsou téměř nerozložitelné biologickými procesy. Tyto látky tedy přecházejí konvenčními mechanicko-biologickými čistírnami odpadních vod, kde se využívá biologická oxidace nezměněné a jsou bodově vypouštěny do životního prostředí. Technologie AOP spočívá ve vytvoření vysoce reaktivních hydroxylových radikálů $\text{OH}\cdot$, které dokážou mineralizovat rezistentní substance na oxid uhličitý a vodu, resp. způsobit jejich rozklad. Pro generování hydroxylových radikálů a celkovou účinnost bude testován ozon, UV záření, peroxid vodíku a jejich kombinace.

Zpracování disertační práce bylo rozděleno do následujících cílů:

- **Zpracování kritické rešerše současného stavu poznání:** Cílem je zpracování podrobné rešerše, stanovení a vysvětlení pojmů, termínů a vlastní zhodnocení dosavadních poznatků tuzemské a zahraniční odborné literatury.
- **Testování jednotky AOP v laboratorních podmínkách:** Cílem je testování kombinací pokrokových oxidačních procesů, které jednotka AOP nabízí a jejich účinnost k odstranění vybraných druhů léčiv.
- **Testování jednotky AOP v reálných podmínkách na vybrané ČOV:** Cílem je testování možného využití technologie pokročilých oxidačních procesů jako dalšího stupně čištění na ČOV. Cílem je ověřit účinnost technologie AOP v reálných podmínkách na vybrané ČOV a definovat doporučení pro návrh AOP technologie.

3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Každý rok se celosvětově spotřebuje více než 100 000 tun farmaceutických výrobků (24 % v Evropě). Při výrobě, používání a likvidaci se do životního prostředí uvolňují aktivní farmaceutické a další chemické složky. Již v současné době je spotřeba léčiv značná a neustále se zvyšuje. V Evropské unii je používáno v humánní medicíně přibližně 3000 různých látek, nejvíce analgetika, protizánětlivá léčiva, kontraceptiva, antibiotika, betablokátory, neuroaktivní látky a další. Jen ve Velké Británii, Německu a Austrálii se množství nepoužívanějších léčiv pohybuje v řádu stovek tun ročně. Hlavní cesta léčiva od člověka do životního prostředí vede přes exkrementy a moč prostřednictvím odpadních vod. Léčiva jsou z organismu vyloučena buď v nezměněné formě nebo jako metabolity [3, 4].

Léčivá látka je účinná složka léčivého přípravku. Obvykle se jedná o čisté chemické látky s definovanou strukturou, ale může to být i velmi složitá směs chemických substancí. Léčivé látky mohou být syntetického nebo přírodního původu a nalezneme je v humánních i veterinárních přípravcích. V legislativě České republiky se léčivům věnuje zákon č. 378/2007 Sb. [5]. Tento zákon definuje jak léčivé látky, tak přípravky a používá pro ně souhrnný pojem léčiva čili farmaka. Léčiva jsou zde definována jako látky sloužící k předcházení, léčbě nebo zmírnění projevů chorob. Dle zákona č. 378/2007 Sb. se léčivým přípravkem rozumí:

- a) látka nebo kombinace látek prezentovaná s tím, že má léčebné nebo preventivní vlastnosti v případě onemocnění lidí nebo zvířat;
- b) látka nebo kombinace látek, kterou lze použít u lidí nebo podat lidem, nebo použít u zvířat či podat zvířatům, a to buď za účelem obnovy, úpravy nebo ovlivnění fyziologických funkcí prostřednictvím farmakologického, imunologického nebo metabolického účinku, nebo za účelem stanovení lékařské diagnózy [5].

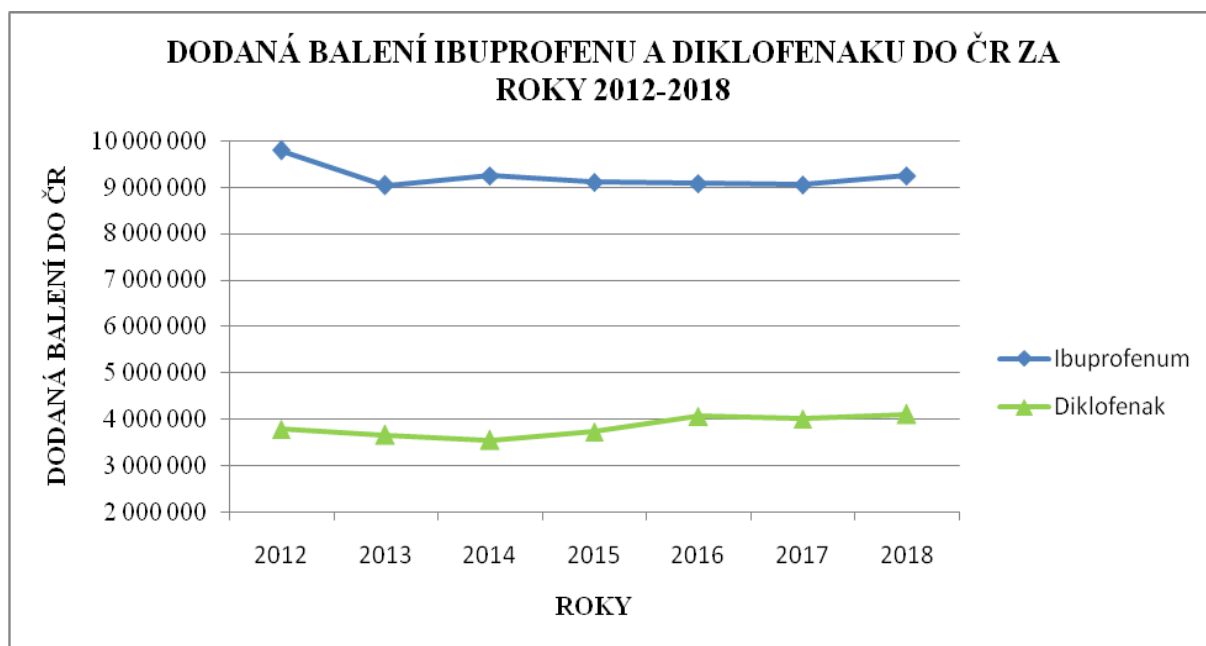
3.1 TESTOVANÁ LÉČIVA PROTI BOLESTI

V rámci tématu disertační práce, byly pro testování účinnosti odstranění léčiv pomocí pilotní jednotky AOP zvoleny široce používané a běžně dostupné léky proti bolesti. Jedná se o níže popsané typy léků, kterých se v České republice prodá ročně až necelých 10.000.000 balení. Je běžně známo, že léky s protizánětlivými a analgetickými účinky patří mezi celosvětově nejčastěji podávané medikamenty. Podle statistik tyto léky pravidelně konzumuje 10 až 20 % pacientů nad 60 let, přičemž nejvyšší je pak zastoupení pacientů ve věkové skupině nad 75 let. Právě pacienti ve vyšší věkové kategorii převážně trpí nemocemi kloubů a kostí, jako je artróza, artritida či osteoporóza. Klasická konzervativní léčba těchto nemocí spočívá v podávání protizánětlivých léků a analgetik, které pacientovi uleví od bolesti. Nejen v zahraničí, ale i v České republice se tak jedná o jedny z nejčastěji předepisovaných a nejužívanějších léčiv a jejichž spotřeba se celoročně počítá na tuny.

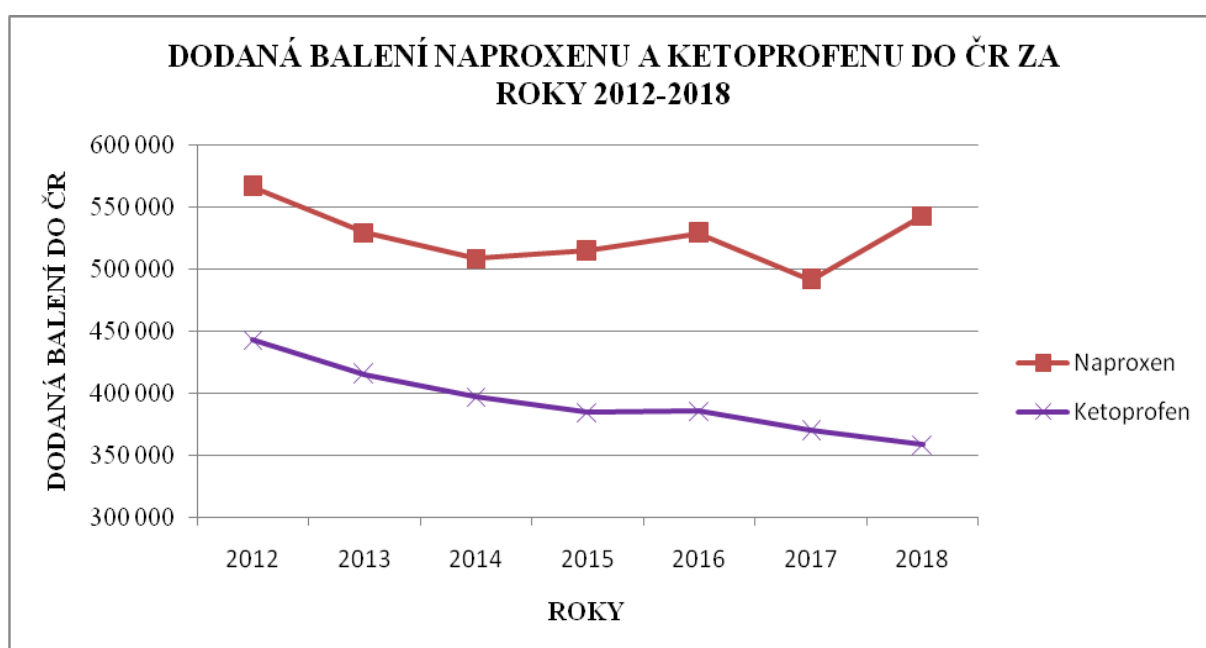
Tab. 1 Dodaná balení testovaných léčiv do ČR za roky 2012-2018 [6]

Léčivo	Dodaná balení do ČR za roky 2012-2018						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Ibuprofenum	9 787 734	9 034 565	9 245 652	9 102 626	9 080 844	9 052 906	9 247 022
Naproxen	566 129	529 185	508 066	514 284	528 391	491 000	542 460
Diklofenak	3 782 078	3 657 517	3 553 510	3 731 724	4 066 611	4 007 785	4 097 911
Ketoprofen	442 436	414 750	396 827	384 358	385 367	369 417	358 440

Poznámka: dodaná balení jednotlivých léčiv do České republiky za roky 2012 až 2018 byly získány od Státního ústavu pro kontrolu léčiv (SÚKL).



Obr. 1 Trend dodaných balení ibuprofenu a diklofenaku do ČR za roky 2012-2018 [6]



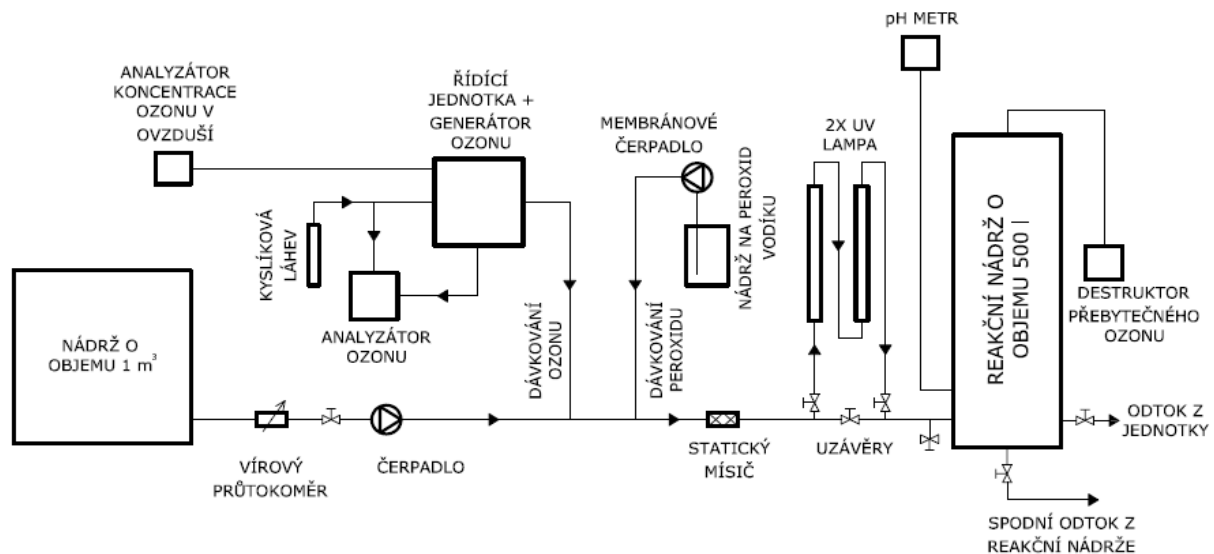
Obr. 2 Trend dodaných balení naproxenu a ketoprofenu do ČR za roky 2012-2018 [6]

4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Vlastní řešení disertační práce Odstraňování vybraných léčiv z odpadních vod oxidačními procesy navazuje na zpracovanou rešeršní část disertační práce a na realizovaná měření provedená v rámci specifického výzkumu FAST-J-16-3424, kde autor disertační práce byl jako hlavní řešitel výzkumu. Vlastní řešení disertační práce záviselo na vhodně zvolených kombinacích pokrokových oxidačních procesů a testování jednotky v reálných podmínkách na vybrané ČOV.

Na základě rešeršní části disertační práce a vlastností samotné jednotky AOP bylo možné provést návrh kombinací pokrokových oxidačních procesů a následně provést první sérii testů v poloprovozních podmínkách v hale P4 vědeckého centra AdMaS. Cílem prvních testů bylo:

- odhalit maximální a minimální rozsahy v nastavení jednotlivých prvků jednotky;
- zjištění, které z vybraných léčiv jsou lépe a hůře odstranitelná;
- které z daných kombinací pokrokových oxidačních procesů mají vyšší či nižší účinnost odstranění na jednotlivé typy léčiv;
- odhalit případné nedostatky jednotky, které by měly vliv v následném provozu v reálných podmínkách.



Obr. 3 Podrobné schéma jednotky AOP

4.1 TESTOVÁNÍ JEDNOTKY AOP NA VĚDECKÉM CENTRU ADMAS

Prvotní (laboratorní) testování pilotní jednotky AOP probíhalo v hale P4 vědeckého centra AdMaS. Jako první krok testování bylo zvoleno testování jednotky AOP na syntetických vodách, kdy se pitná voda „kontaminovala“ vybranými druhy léčiv. Vybraná léčiva se rozmíchala v chemických baňkách a poté byla aplikována do pitné vody v nádrži

(vybraná léčiva byla k aplikaci do velkokapacitní nádrže připravena na Fakultě chemické VUT v Brně). Kontaminace pitné vody probíhala ve velkokapacitní nádrži o objemu 1000 litrů, která nebyla součástí pilotní jednotky a musela být pořízena dodatečně. I při značném výkonu čerpadla 3,024 m³/h (0,84 l/s) umožňovala kapacita nádrže dostatek času pro odebrání všech vzorků ve zvolené sérii testování.

Po naplnění velkokapacitní nádrže pitnou vodou a její kontaminace bylo možno přistoupit ke spuštění jednotky AOP. Po spuštění došlo k rozběhu čerpadla, které čerpalo vodu z nádrže do celého systému jednotky. V závislosti na daném druhu testování již mohly být nastavovány hodnoty výkonu ozonizátoru, hodnoty výkonu membránového čerpadla peroxidu vodíku a aktivovány jedna až dvě UV lampy. Množství generovaného ozonu bylo nastaveno na hlavním řídicím panelu, kde se pomocí otočného spínače upravoval procentuální výkon samotného ozonizátoru. Maximální výkon ozonizátoru je 30 g/h. Množství dávky peroxidu vodíku bylo nastavováno na membránovém čerpadle pomocí otočného spínače a rozsah množství, které čerpadlo umožňuje dávkovat je 2,5 – 4000 ml/h. UV lampy bylo možno uvést do provozu pouhým zapojením kabelu do zdroje elektrické energie. Každá ze dvou UV lamp mohla být zapojena samostatně. Samotné odběry byly prováděny na odtoku z jednotky, kdy byly plněny odběrné lahve, které byly řádně označeny a následně odvezeny do laboratoře Fakulty chemické VUT v Brně na analýzu. Výsledky všech druhů testování jsou přehledně uvedeny v tabulkách a grafech níže v textu. **Celkem bylo pro laboratorní testování vyhodnoceno 35 vzorků.**

4.1.1 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ OZONU (O₃)

Během ozonizace je organická látka oxidována molekulárním O₃ a OH• radikálem, který vzniká rozpadem ozonu.



Nastavení výkonu ozonizátoru bylo zvoleno v pěti krocích, ve kterých byly odebrány zkušební vzorky pro chemický rozbor. Kroky nastavení výkonu ozonizátoru byly: **13 %**, **23 %**, **30 %**, **40 %** a **50 %**. V tomto rozmezí výkonu byl do testované syntetické vody dávkován ozon v rozmezí 1,15 až 5,55 mg/l.

Tab. 2 Koncentrace protizánětlivých nesteroidních látek v připravené syntetické vodě

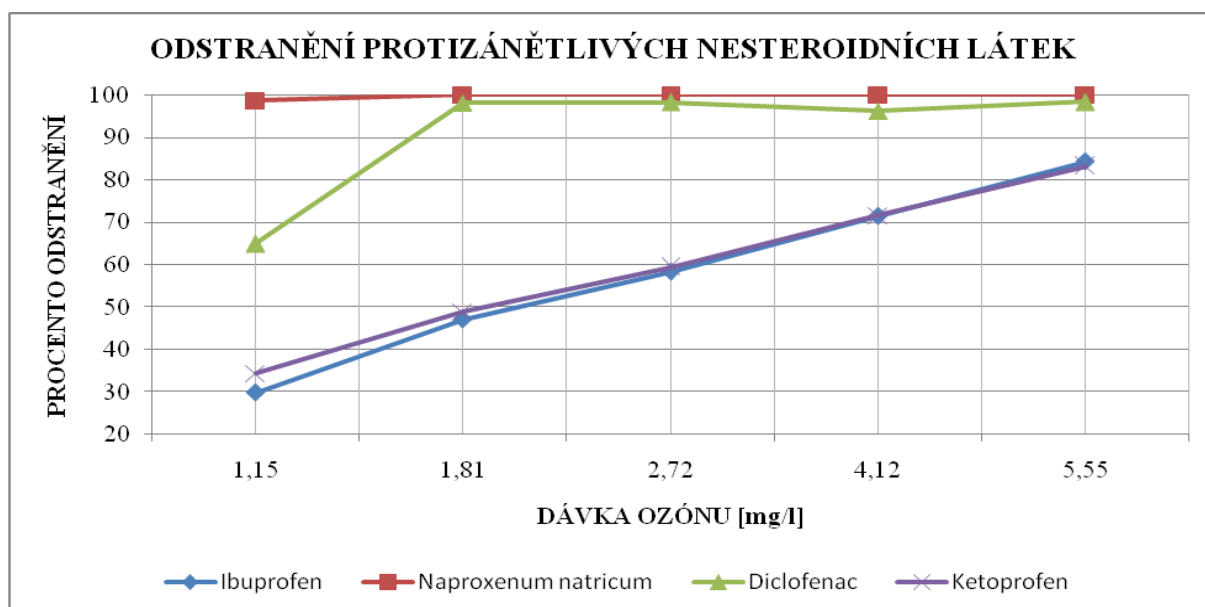
Léčivo	počáteční koncentrace	jednotka
Ibuprofen	123,7	μg/l
Naproxenum natricum	86,4	
Diklofenak	98,0	
Ketoprofen	101,5	

Tab. 3 Dávka O₃ a koncová koncentrace nesteroidních látek

Činidlo	dávka					jednotka
O ₃	1,15	1,81	2,72	4,12	5,55	mg/l
Léčivo	koncentrace na odtoku					jednotka
Ibuprofen	86,88	65,54	51,64	35,36	19,38	μg/l
Naproxenum natricum	1,18	0,00	0,00	0,00	0,00	
Diklofenak	34,34	1,83	1,71	3,73	1,61	
Ketoprofen	66,70	51,94	41,21	28,90	17,10	

Tab. 4 Procentuální odstranění léčiv při zvyšující se dávce ozonu

Léčivo	procentuální odstranění					jednotka
Ibuprofen	29,77	47,02	58,25	71,42	84,34	%
Naproxenum natricum	98,64	100,00	100,00	100,00	100,00	
Diklofenak	64,96	98,13	98,26	96,20	98,35	
Ketoprofen	34,32	48,85	59,42	71,54	83,16	



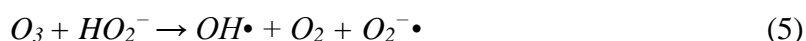
Obr. 4 Průběhy odstranění protizánětlivých nesteroidních látek pomocí zvyšující se dávky ozonu

U protizánětlivých nesteroidních látek došlo při použití samotného ozonu podle výsledků k poměrně dobrému procentu odstranění. Léčiva naproxenum natricum a diklofenak byla prakticky ve všech dávkách ozonu odstraněna velmi dobře. Léčivo ibuprofen a ketoprofen bylo odstraněno v menší míře než ostatní dvě léčiva, ale také s poměrně dobrým výsledkem. Diclofenak zaznamenal při dávce ozonu 5,55 mg O₃/l maximální odstranění 98,38 %, ibuprofen a ketoprofen při stejné koncentraci ozonu 84,34 % a 83,16 %. Naproxenum natricum byl při dávce ozonu 5,55 mg O₃/l odstraněn úplně (99,99 %). Z výsledků je dále patrné, že i nižší dávky ozonu mohou velice účinně snížit koncentrace některých léčiv.

Doporučení: ozon velice vhodný při výskytu léčiv naproxen a diklofenak. Při výskytu léčiv ibuprofen a ketoprofen nutno zvýšit dávkované množství ozonu.

4.1.2 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ O₃ + UV

Nastavení výkonu ozonizátoru bylo zvoleno v pěti krocích, ve kterých byly odebrány zkušební vzorky pro chemický rozbor. Kroky nastavení výkonu ozonizátoru byly: **13 %**, **18 %**, **30 %**, **40 %** a **50 %**. V tomto rozmezí výkonu byl do testované syntetické vody dávkován ozon v rozmezí 1,14 až 5,58 mg/l. Zároveň byly i spuštěny obě UV lampy pro iniciaci celé reakce tvorby hydroxidových radikálů dle rovnic (3), (4) a (5).



Tab. 5 Koncentrace protizánětlivých nesteroidních látek v připravené syntetické vodě

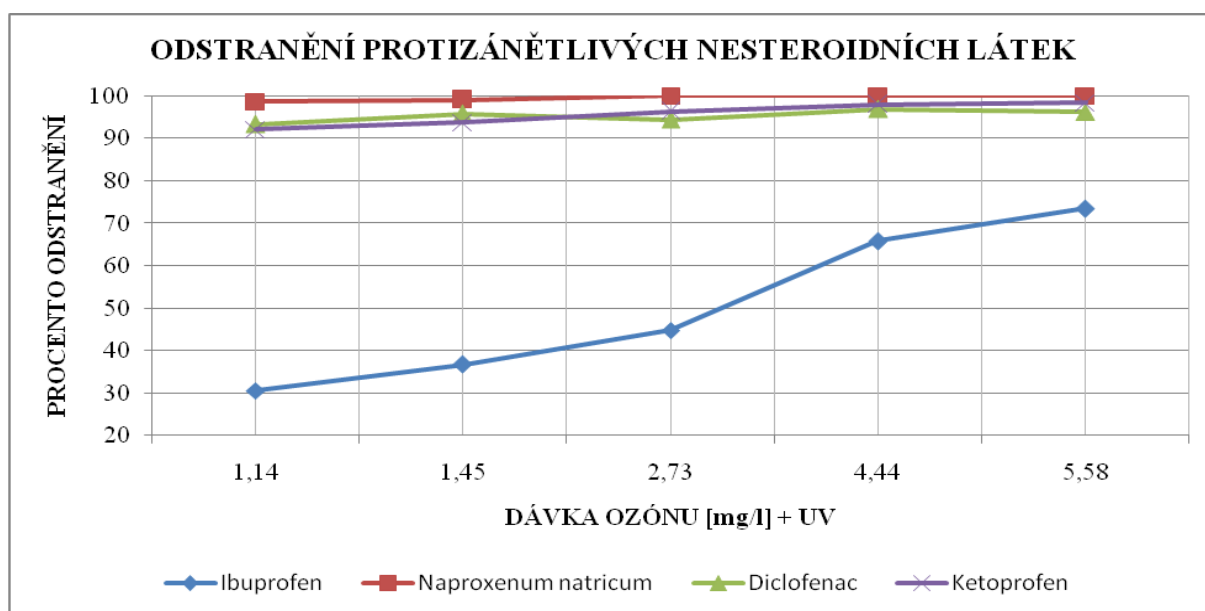
Léčivo	počáteční koncentrace	jednotka
Ibuprofen	124,8	μg/l
Naproxenum natricum	90,3	
Diklofenak	69,5	
Ketoprofen	104,2	

Tab. 6 Dávka O₃ + UV a koncová koncentrace nesteroidních látek

Činidlo	dávka					jednotka
O ₃	1,14	1,45	2,73	4,44	5,58	mg/l
Léčivo	koncentrace na odtoku					jednotka
Ibuprofen	86,65	79,03	68,90	42,70	33,14	μg/l
Naproxenum natricum	1,21	0,87	0,00	0,00	0,00	
Diklofenak	4,59	2,95	3,88	2,14	2,64	
Ketoprofen	8,23	6,50	3,76	2,08	1,62	

Tab. 7 Procentuální odstranění léčiv při zvyšující se dávce ozonu + UV záření

Léčivo	procentuální odstranění					jednotka
Ibuprofen	30,59	36,70	44,81	65,80	73,46	%
Naproxenum natricum	98,67	99,03	100,00	100,00	100,00	
Diklofenak	93,39	95,75	94,41	96,91	96,20	
Ketoprofen	92,10	93,76	96,39	98,00	98,44	



Obr. 5 Průběhy odstranění protizánětlivých nesteroidních látek pomocí zvyšující se dávky ozonu a UV záření

Při použití ozonu a UV lamp došlo u protizánětlivých nesteroidních látek podle výsledků k dalšímu dobrému procentu odstranění. Léčiva naproxenum natricum, diklofenak a ketoprofen byla již při nízkých dávkách ozonu a UV záření odstraněna velmi dobře. Léčivo ibuprofen opět vykazovalo větší míru rezistence a bylo odstraněno v menší míře než ostatní tři léčiva. Nutno podotknout, že i toto odstranění je také s poměrně dobrým výsledkem. Diklofenak zaznamenal při dávce ozonu 5,58 mg O₃/l maximální odstranění 96,20 %, ibuprofen při stejné dávce ozonu jenom 73,46 %. Naproxenum natricum byl při dávce ozonu 5,4 mg O₃/l odstraněn úplně a Ketoprofen z 98,44 %. Značné zlepšení výsledků u ketoprofenu při použití UV záření.

Doporučení: ozon v kombinaci s UV zářením velice vhodný při výskytu léčiv naproxen, diklofenak a ketoprofen. UV záření účinné na ketoprofen. Při výskytu léčiva ibuprofen nutno zvýšit dávkované množství ozonu.

4.1.3 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ O₃ + H₂O₂

Nastavení výkonu ozonizátoru bylo zvoleno v šesti krocích, ve kterých byly odebrány zkušební vzorky pro chemický rozbor. Kroky nastavení výkonu ozonizátoru byly: **13 %**, **18 %**, **23 %**, **30 %**, **40 %** a **50 %**. V tomto rozmezí výkonu byl do testované syntetické vody dávkován ozon v rozmezí 1,35 až 5,97 mg/l. Zároveň bylo spuštěno i dávkovací čerpadlo peroxidu vodíku. Výkon dávkovacího čerpadla H₂O₂ byl nastavován v závislosti na výkonu ozonizátoru dle rovnice (6). Dávka peroxidu vodíku byla v šesti krocích v rozmezí 0,36 mg/l až 1,94 mg/l. Pro stanovení správného poměru molekul dle rovnice (6) H₂O₂:O₃ (1:2) byl proveden převodní výpočet na mmol/l, který určil dávkovací množství v nastavení průtoku membránového čerpadla H₂O₂. Hodnoty mmol/l jsou uvedeny v tab. 9. Hodnota množství

H₂O₂ byla přepočtena na l/hod z důvodu přesného nastavení membránového čerpadla které peroxid vodíku dávákuje.



Tab. 8 Koncentrace protizánětlivých nesteroidních látek v připravené syntetické vodě

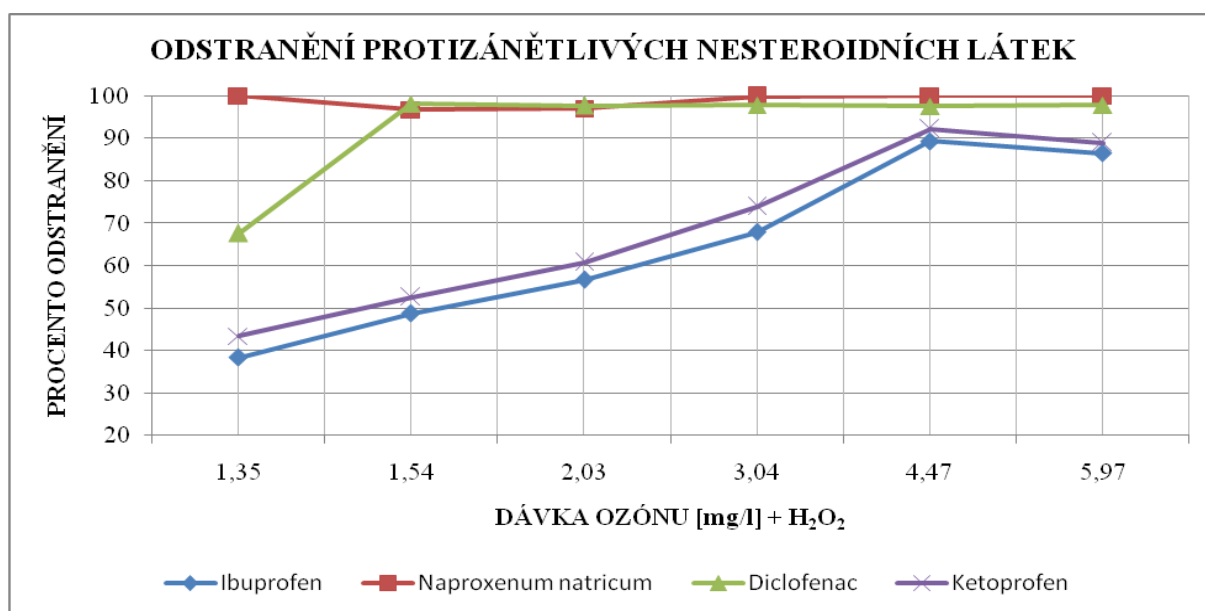
Léčivo	počáteční koncentrace	jednotka
Ibuprofen	120,21	μg/l
Naproxenum natricum	83,95	
Diklofenak	90,79	
Ketoprofen	100,53	

Tab. 9 Dávka O₃ + H₂O₂ a koncová koncentrace nesteroidních látek

Činidlo	dávka						jednotka
O ₃	1,35	1,54	2,03	3,04	4,47	5,97	mg/l
	0,028	0,032	0,042	0,063	0,093	0,124	mmol/l
H ₂ O ₂	0,36	0,57	0,79	1,09	1,52	1,94	mg/l
	0,011	0,017	0,023	0,032	0,045	0,057	mmol/l
	1,36	2,17	2,98	4,11	5,73	7,35	l/hod
Léčivo	koncentrace na odtoku						jednotka
Ibuprofen	74,07	61,61	52,01	38,52	12,85	16,24	μg/l
Naproxenum natricum	0,00	2,70	2,50	0,04	0,00	0,00	
Diklofenak	29,35	1,73	2,11	1,92	2,22	1,91	
Ketoprofen	56,87	47,63	39,46	26,27	7,77	11,05	

Tab. 10 Procentuální odstranění léčiv při zvyšující se dávce ozonu + peroxidu vodíku

Léčivo	procentuální odstranění						jednotka
Ibuprofen	38,38	48,74	56,73	67,95	89,31	86,49	%
Naproxenum natricum	100,00	96,78	97,03	99,96	100,00	100,00	
Diklofenak	67,67	98,09	97,67	97,88	97,55	97,90	
Ketoprofen	43,43	52,62	60,75	73,87	92,27	89,01	



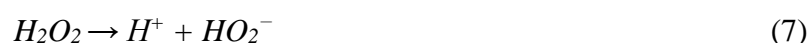
Obr. 6 Průběhy odstranění protizánětlivých nesteroidních látek pomocí zvyšující se dávky ozonu a peroxidu vodíku

Při použití ozonu a peroxidu vodíku došlo u protizánětlivých nesteroidních látek podle výsledků u vyšších koncentrací k velmi dobrému procentu odstranění. Léčiva naproxenum natricum a diklofenak byla již při nízkých dávkách ozonu a peroxidu vodíku odstraněna opět velmi dobře. Léčiva ibuprofen a ketoprofen vykazovala větší míru rezistence a byla odstraněna až při vyšších dávkách ozonu a peroxidu vodíku. Diklofenak zaznamenal při dávce ozonu 5,97 mg O₃/l a dávce peroxidu vodíku 1,94 mg H₂O₂/l maximální odstranění 97,9 %, ibuprofen při stejné dávce ozonu a peroxidu vodíku 86,49 %. Naproxenum natricum byl při dávce ozonu 5,97 mg O₃/l a dávce peroxidu vodíku 1,94 mg H₂O₂/l odstraněn úplně a ketoprofen z 89,01 %. Hodnoty odstranění jsou velice podobné hodnotám při použití samotného ozonu. Z tohoto důvodu lze usuzovat, že H₂O₂ má minimální podíl na celkovém odstranění daných léčiv.

Doporučení: ozon v kombinaci s peroxidem vodíku má stejnou účinnost jako samotný ozon. Ozon velice vhodný při výskytu léčiv naproxen a diklofenak. Při výskytu léčiv ibuprofen a ketoprofen nutno zvýšit dávkované množství ozonu.

4.1.4 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ H₂O₂

Při testování účinnosti samotného peroxidu vodíku byl použit 5% roztok peroxidu vodíku a dávkovací membránové čerpadlo bylo nastavováno v šesti krocích od dávky 17,13 mg/l až po dávku 103,12 mg/l, což odpovídá hodnotám 0,504 až 3,033 mmol/l, které byly převedeny na l/h kvůli nastavování výkonu (průtoku) membránového čerpadla.



Vzorec převodu: (dávka H₂O₂ (mmol/l)*průtok čerpadla (3,024 m³/hod)*1000)/(1 ml 5% roztoku H₂O₂ (mmol)).

Tab. 11 Koncentrace protizánětlivých nesteroidních látek v připravené syntetické vodě

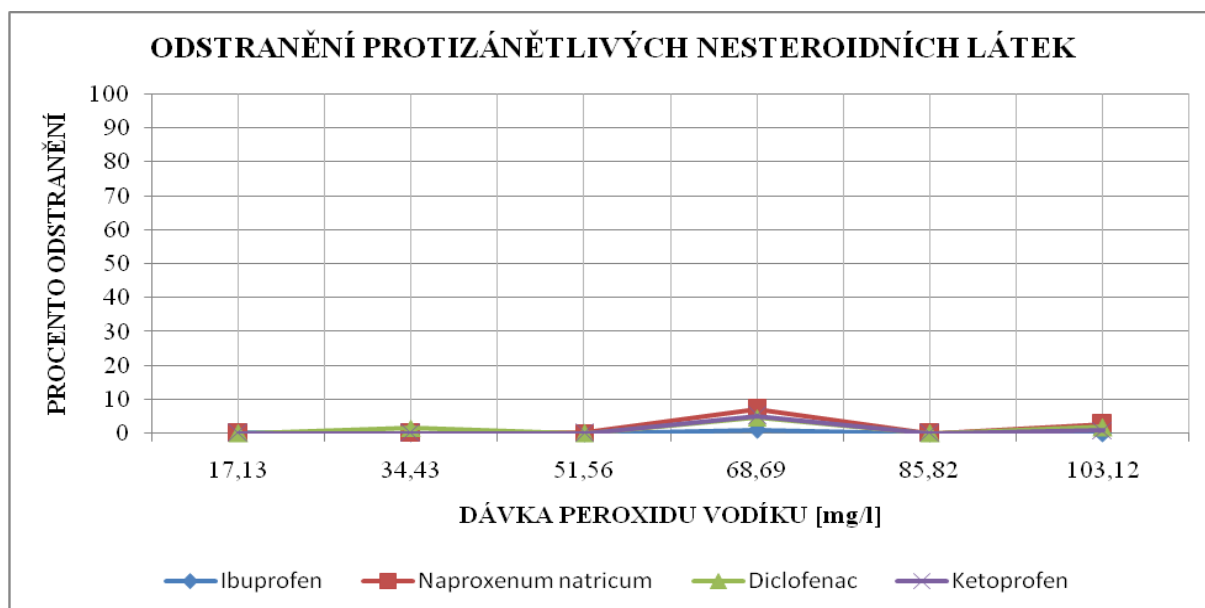
Léčivo	počáteční koncentrace	jednotka
Ibuprofen	104,34	μg/l
Naproxenum natricum	78,36	
Diklofenak	51,20	
Ketoprofen	83,73	

Tab. 12 Dávka 5% roztoku H₂O₂

Činidlo	dávka						jednotka
H ₂ O ₂	17,13	34,43	51,56	68,69	85,82	103,12	mg/l
	0,504	1,013	1,516	2,020	2,524	3,033	mmol/l
	1,02	2,05	3,07	4,09	5,11	6,14	l/h
Léčivo	koncentrace na odtoku						jednotka
Ibuprofen	103,94	104,34	104,33	103,15	104,33	104,34	μg/l
Naproxenum natricum	78,36	78,35	78,15	72,69	78,36	76,15	
Diklofenak	51,19	50,37	51,20	48,81	51,19	50,25	
Ketoprofen	83,72	83,73	83,73	79,38	83,72	82,95	

Tab. 13 Procentuální odstranění léčiv při zvyšující se dávce peroxidu vodíku

Léčivo	procentuální odstranění						jednotka
Ibuprofen	0,38	0,00	0,00	1,14	0,00	0,00	%
Naproxenum natricum	0,00	0,00	0,27	7,23	0,00	2,82	
Diklofenak	0,00	1,61	0,00	4,68	0,00	1,86	
Ketoprofen	0,00	0,00	0,00	5,19	0,00	0,93	



Obr. 7 Průběhy odstranění protizánětlivých nesteroidních látek pomocí zvyšující se dávky peroxidu vodíku

Při použití samotného 5% roztoku peroxidu vodíku se zvoleným množstvím 17,13 až 103,12 mg/l nedošlo u protizánětlivých nesteroidních látek podle výsledků k významnému procentu odstranění. Žádné z testovaných léčiv nebylo ani při nejvyšších dávkách peroxidu vodíku dostatečně odstraněno. Všechna léčiva vykazovala vysokou míru rezistence. Celkové zaznamenané míry odstranění jsou velmi nízké a s ohledem na grafické výsledky můžeme předpokládat i jistou chybu ve vyhodnocení chemických rozborů.

Doporučení: samotný peroxid vodíku nemá významný vliv na odstranění testovaných léčiv. Peroxid vodíku má nízký oxidačně redukční potenciál.

4.1.5 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ H₂O₂ + UV

Při testování účinnosti peroxidu vodíku v kombinaci s UV zářením byl použit 5% roztok peroxidu vodíku a dávkovací membránové čerpadlo bylo nastavováno v šesti krocích od dávky 17,13 mg/l až po dávku 103,12 mg/l, což odpovídá hodnotám 0,504 až 3,033 mmol/l. Zároveň byly zapojeny i dvě UV lampy, které dle rovnice (8) způsobují rozklad H₂O₂ za vzniku OH radikálů.



Tab. 14 Koncentrace protizánětlivých nesteroidních látek v připravené syntetické vodě

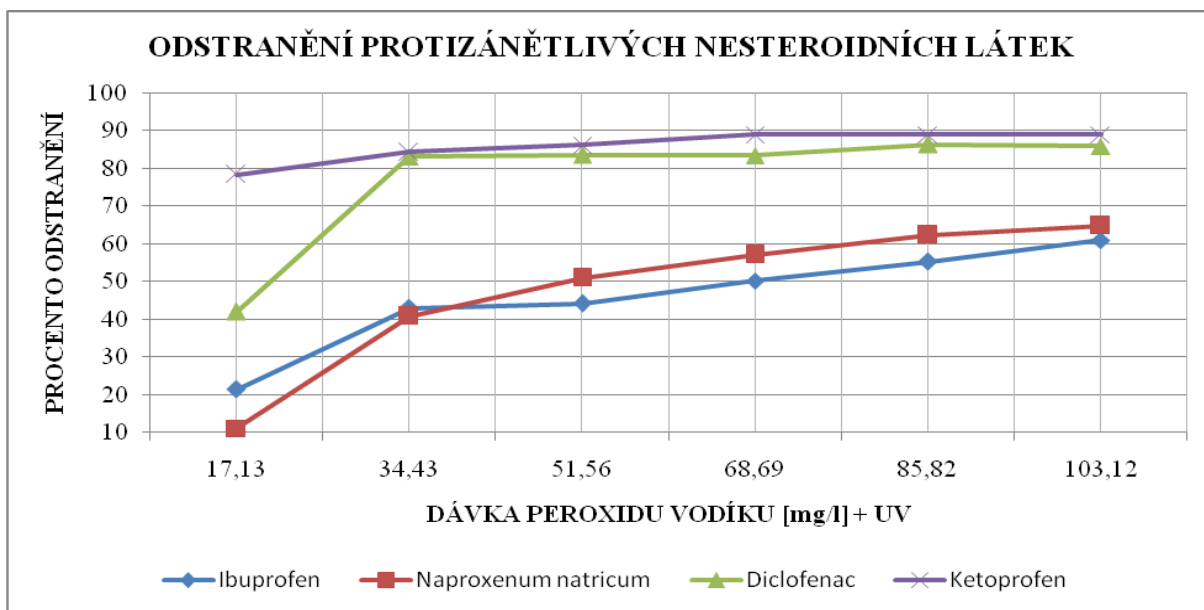
Léčivo	počáteční koncentrace	jednotka
Ibuprofen	92,57	μg/l
Naproxenum natricum	51,23	
Diklofenak	49,71	
Ketoprofen	13,01	

Tab. 15 Dávka 5% roztoku H₂O₂ + UV a koncová koncentrace nesteroidních látek

Činidlo	dávka						jednotka
H ₂ O ₂ + (UV)	17,13	34,43	51,56	68,69	85,82	103,12	mg/l
	0,504	1,013	1,516	2,020	2,524	3,033	mmol/l
	1,02	2,05	3,07	4,09	5,11	6,14	l/h
Léčivo	koncentrace na odtoku						jednotka
Ibuprofen	72,76	52,81	51,64	46,10	41,32	36,09	μg/l
Naproxenum natricum	45,52	30,31	25,11	21,93	19,29	18,05	
Diklofenak	28,84	8,41	8,18	8,21	6,77	6,98	
Ketoprofen	2,82	2,04	1,79	1,43	1,44	1,43	

Tab. 16 Procentuální odstranění léčiv při zvyšující se dávce peroxidu vodíku + UV

Léčivo	procentuální odstranění						Jednotka
Ibuprofen	21,40	42,95	44,21	50,20	55,36	61,01	%
Naproxenum natricum	11,16	40,85	51,00	57,19	62,36	64,76	
Diklofenak	41,98	83,08	83,54	83,48	86,38	85,96	
Ketoprofen	78,29	84,29	86,25	89,00	88,94	89,05	



Obr. 8 Průběhy odstranění protizánětlivých nesteroidních látek pomocí zvyšující se dávky peroxidu vodíku + UV záření

Při použití 5% roztoku peroxidu vodíku a UV záření došlo u protizánětlivých nesteroidních látek podle výsledků u vyšších koncentrací peroxidu vodíku k poměrně dobrému procentu odstranění. Léčiva diklofenak a ketoprofen byla již při nízkých dávkách peroxidu vodíku a UV záření odstraněna velmi dobře. Léčiva ibuprofen a naproxenum natricum vykazovala menší míru rezistence, ale byl zaznamenán zvyšující se trend odstranění se zvyšující se koncentrací peroxidu vodíku. Diklofenak zaznamenal při dávce peroxidu vodíku 103,12 mg H₂O₂/l a UV záření maximální odstranění 85,96 %, ketoprofen při stejné dávce peroxidu vodíku a UV záření 89,05 %. Naproxenum natricum byl při dávce peroxidu vodíku 103,12 mg H₂O₂/l a UV záření maximálně odstraněn z 64,76 % a ibuprofen z 61,01 %.

Doporučení: peroxid vodíku v kombinaci s UV zářením vhodný při výskytu léčiv ketoprofen a diklofenak. Při výskytu léčiv ibuprofen a naproxen nutno zvýšit dávkované množství H₂O₂.

4.1.6 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ UV ZÁŘENÍ

Při tomto měření bylo využito dvou UV lamp, kterými je jednotka AOP rovněž vybavena. UV záření mělo ověřit schopnost destrukce určitých chemických vazeb v molekulách a tím podpořit vznik nízkomolekulární sloučeniny, kterou lze biologicky snadněji odbourat.

Tab. 17 Koncentrace protizánětlivých nesteroidních látek v připravené syntetické vodě

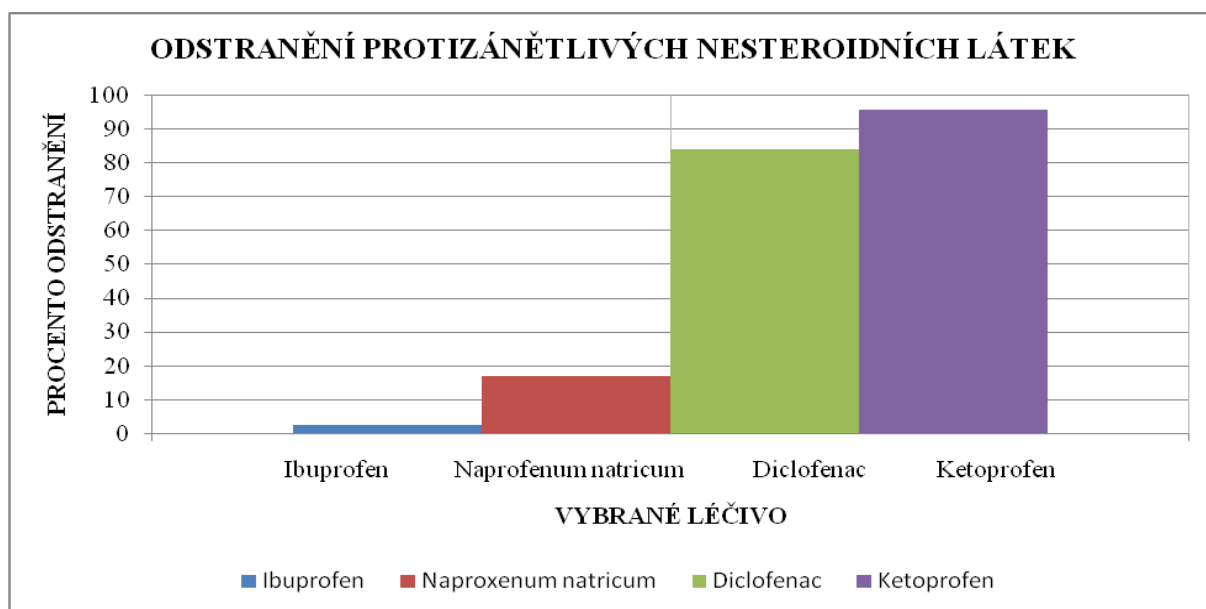
Léčivo	počáteční koncentrace	jednotka
Ibuprofen	124,84	µg/l
Naproxenum natricum	90,34	
Diklofenak	69,46	
Ketoprofen	104,16	

Tab. 18 Koncová koncentrace nesteroidních látek

Léčivo	koncentrace na odtoku	jednotka
Ibuprofen	121,66	μg/l
Naproxenum natricum	75,13	
Diklofenak	11,09	
Ketoprofen	4,47	

Tab. 19 Procentuální odstranění léčiv při použití UV lamp

Léčivo	procentuální odstranění	Jednotka
Ibuprofen	2,55	%
Naproxenum natricum	16,84	
Diklofenak	84,04	
Ketoprofen	95,71	



Obr. 9 Odstranění protizánětlivých nesteroidních látek pomocí UV záření

Při aplikaci samotného UV záření došlo u protizánětlivých nesteroidních látek podle výsledků k různému procentuálnímu odstranění. Léčiva diklofenak a ketoprofen byla při aplikaci UV záření odstraněna velmi dobře. Léčiva ibuprofen a naproxenum natricum se podařilo odstranit pouze v minimálním množství. Diklofenak zaznamenal při aplikaci UV záření míru odstranění 84,04 % a ketoprofen 95,71 %. Naproti tomu léčivo naproxenum natricum bylo odstraněno z 16,84 % a ibuprofen jen z 2,55 %.

Doporučení: samotné UV zářením vhodné při výskytu léčiv ketoprofen a diklofenak. Při výskytu léčiv ibuprofen a naproxen nutno přidat i ozon nebo H₂O₂.

4.2 TESTOVÁNÍ JEDNOTKY AOP NA ČISTÍRNĚ ODPADNÍCH VOD BRNO MODŘICE

Druhé testování pilotní jednotky AOP probíhalo v areálu čistírny odpadních vod Brno Modřice. Testování jednotky probíhalo na vyčištěné odpadní vodě. Část vyčištěné odpadní vody se na ČOV Modřice chloruje a dále využívá jako voda provozní. Jednotka byla umístěna u nádrží vyčištěné vody před objektem chlorovny, kde se pro účely testování pomocí čerpadla voda odebírala. Jednalo se tedy o testování na již vyčištěné odpadní vodě před chlorací.

ČOV Brno Modřice byla pro testování jednotky AOP vybrána z důvodu jejího umístění (město Brno) a také z důvodu její velikosti. Na ČOV Modřice jsou přiváděny odpadní vody z města Brna a okolí. Tato skutečnost podporuje teorii detekovatelného množství vybraných léčiv v odpadní vodě.

Všechna testování proběhla v měsíci říjnu. Při každém testování bylo vždy odebráno **5 vzorků** v rozsahu nastavení výkonu jednotky generátoru ozonu v hodnotách **40 %, 50 %, 60 %, 70 % a 80 %** a **pro každý rozsah ještě jeden vzorek pro určení počáteční koncentrace léčiv**. Počet opakování měření byl stanoven na **5**. Výsledkem pokusů je tedy **25 vzorků** od každé zvolené kombinace a **5 vzorků** pro určení počáteční koncentrace léčiv. Zvolené kombinace pokusů byly následující: **O₃; O₃+UV a O₃+H₂O₂**. Tyto kombinace byly zvoleny z důvodu vysoké účinnosti odstranění sledovaného znečištění již při prvním testování v hale Vědeckého centra AdMaS. **Celkový počet analyzovaných vzorků byl 90.**

Počáteční koncentrace diklofenaku se v jednotlivých dnech měření pohybovala v rozmezí 1018 až 1595 ng/l.

Počáteční koncentrace ibuprofenu se v jednotlivých dnech měření pohybovala v rozmezí 132 až 470 ng/l.

Výsledky testů z laboratoře ukázaly, že léčiva naproxen a ketoprofen nebylo možno detekovat z důvodu jejich minimálního množství, tj. pod hranicí detekčního limitu. Z tohoto důvodu není uveden vliv zvolených kombinací AOP na jejich míru odstranění. Níže popsaná část disertační práce popisuje pouze léčiva diklofenak a ibuprofen, u kterých bylo možno jejich počáteční koncentraci stanovit a bylo možno stanovit vliv zvolených kombinací AOP na jejich míru odstranění.

Po nastavení jednotky na požadované hodnoty koncentrací ozonu, peroxidu vodíku a případně i aktivací UV lamp byla voda na odtoku z jednotky před návratem zpět do nádrže odebírána do předem připravených lahví. Tyto lahve byly po naplnění testované vody zavíčkované a popsány systémem značení (kódem) určující typ testování, číslem opakování pokusu a číslem značící použitou koncentraci. Poté byly lahve umístěny do přepravy a odvezeny do laboratoří Fakulty chemické VUT v Brně.

Pro odebrání vzorků byl vytvořen systém značení, který jednoznačně určuje, jaká kombinace testování byla použita, o jaký počet opakování jde a o jakou jde koncentraci.

Např. označení vzorku **O-2-3**= testování za použití ozonu, 2. opakování, 3. koncentrace.

Např. označení vzorku **U-3-4**= testování za použití ozonu a UV záření, 3. opakování, 4. koncentrace.

Např. označení vzorku **H-1-2**= testování za použití ozonu a peroxidu vodíku, 1. opakování, 2. koncentrace.

4.2.1 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ OZONU (O₃)

Jednotlivé kroky měření **O-1-1** až **O-5-5** odpovídají nastavení výkonu generátoru ozonu v rozsahu **40 %**, **50 %**, **60 %**, **70 %** a **80 %**. Tento rozsah byl zvolen z důvodu zkušeností z prvního testování jednotky AOP na Vědeckém centru AdMaS.

Objem plynu do ozonizátoru je spotřeba pracovního plynu (kyslíku) o konstantním množství 0,3 m³/h. Tato hodnota je dána samotným zařízením generátoru ozonu. Koncentrace O₃ v plynu je hodnota, kterou generátor ozonu ukazuje na displeji při ustálení výkonu na požadované hodnotě. Tato hodnota je nezbytná pro výpočet výkonu generátoru [g/h], který se stanoví jako součin objemu plynu do ozonizátoru [m³/h] a koncentrace O₃ v plynu [g/m³]. Koncentrace O₃ ve vodě [mg/l] je pak hodnota výkonu generátoru děleno průtok vody od čerpadla jednoty AOP, které má konstantní průtok 3 m³/h. Tímto způsobem určíme koncentraci ozonu, kterou dávkuje do testované odpadní vody.

Tab. 20 Tabulka s nastavením koncentrace O₃ u prvního opakování měření

Dávkování O ₃ datum: 1.10.2018	kroky měření					jednotka
	O-1-1	O-1-2	O-1-3	O-1-4	O-1-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,5	61,3	74,5	87,2	99,0	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,85	18,39	22,35	26,16	29,7	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,95	6,13	7,45	8,72	9,90	[mg/l]

Tab. 21 Tabulka s nastavením koncentrace O₃ u druhého opakování měření

Dávkování O ₃ datum: 12.10.2018	kroky měření					jednotka
	O-2-1	O-2-2	O-2-3	O-2-4	O-2-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	48,4	61,7	73,6	86,5	98,9	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,52	18,51	22,08	25,95	29,67	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,84	6,17	7,36	8,65	9,89	[mg/l]

Tab. 22 Tabulka s nastavením koncentrace O₃ u třetího opakování měření

Dávkování O ₃ datum: 18.10.2018	kroky měření					jednotka
	O-3-1	O-3-2	O-3-3	O-3-4	O-3-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	48,8	61,9	73,8	87,3	99,2	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,64	18,57	22,14	26,19	29,76	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,88	6,19	7,38	8,73	9,92	[mg/l]

Tab. 23 Tabulka s nastavením koncentrace O₃ u čtvrtého opakování měření

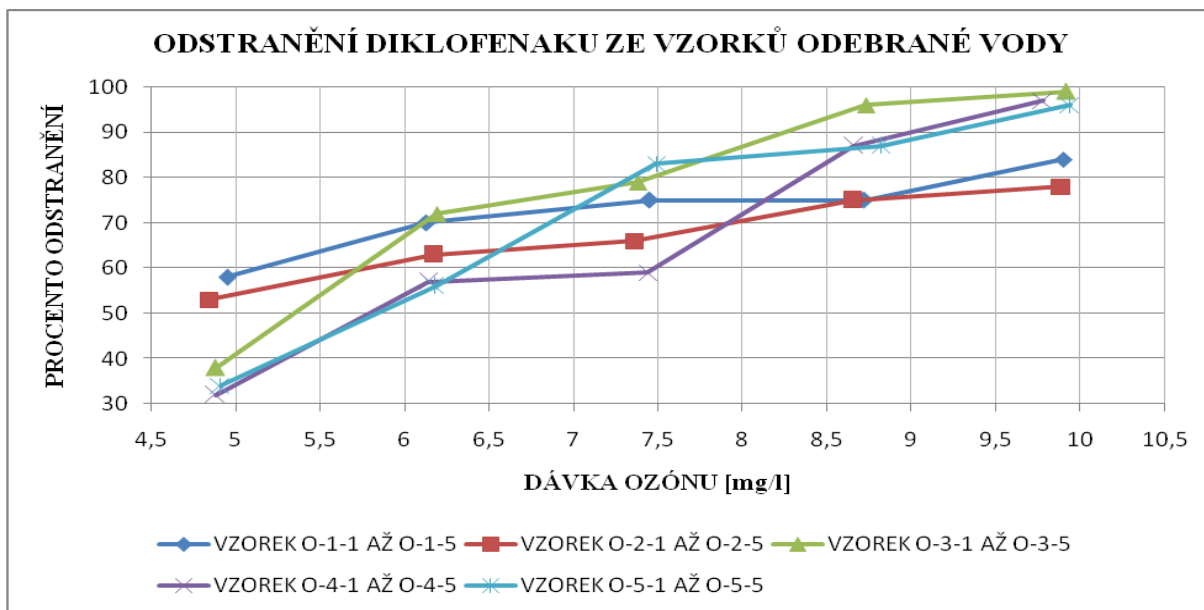
Dávkování O ₃ datum: 24.10.2018	kroky měření					jednotka
	O-4-1	O-4-2	O-4-3	O-4-4	O-4-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	48,8	61,4	74,4	86,6	97,8	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,64	18,42	22,32	25,98	29,34	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,88	6,14	7,44	8,66	9,78	[mg/l]

Tab. 24 Tabulka s nastavením koncentrace O₃ u pátého opakování měření

Dávkování O ₃ datum: 25.10.2018	kroky měření					jednotka
	O-5-1	O-5-2	O-5-3	O-5-4	O-5-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,1	61,8	74,9	88,2	99,4	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,73	18,54	22,47	26,46	29,82	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,91	6,18	7,49	8,82	9,94	[mg/l]

Tab. 25 Souhrnná tabulka s nastavením koncentrace O₃ u všech měření

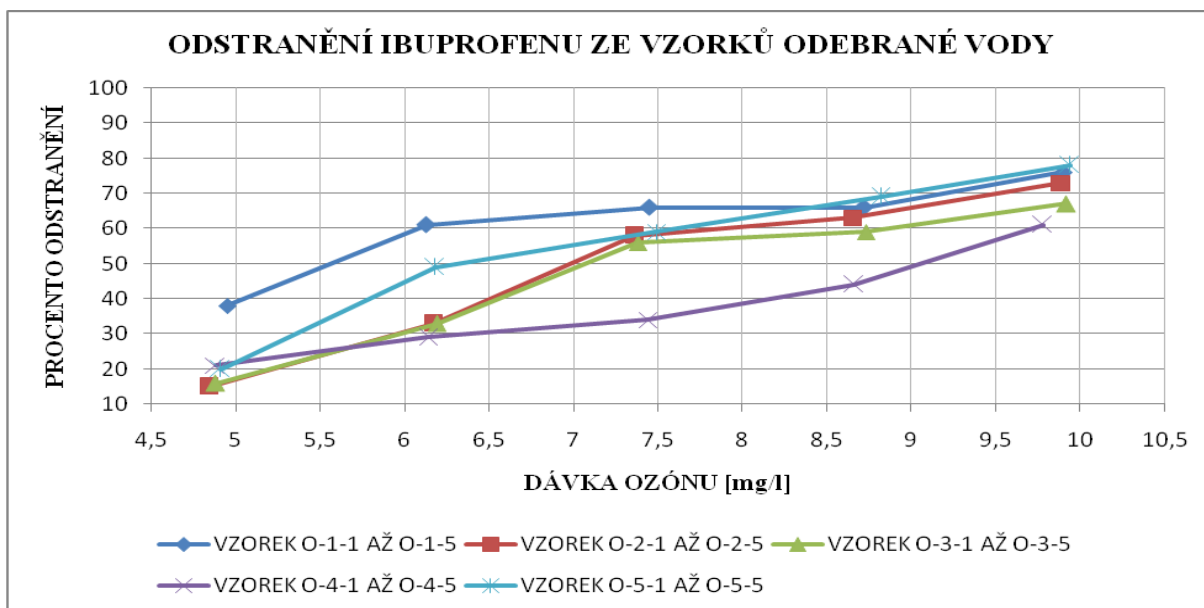
Vzorek	O-1-1	O-1-2	O-1-3	O-1-4	O-1-5	jednotka
dávka O ₃	4,95	6,13	7,45	8,72	9,90	[mg/l]
Vzorek	O-2-1	O-2-2	O-2-3	O-2-4	O-2-5	jednotka
dávka O ₃	4,84	6,17	7,36	8,65	9,89	[mg/l]
Vzorek	O-3-1	O-3-2	O-3-3	O-3-4	O-3-5	jednotka
dávka O ₃	4,88	6,19	7,38	8,73	9,92	[mg/l]
Vzorek	O-4-1	O-4-2	O-4-3	O-4-4	O-4-5	jednotka
dávka O ₃	4,88	6,14	7,44	8,66	9,78	[mg/l]
Vzorek	O-5-1	O-5-2	O-5-3	O-5-4	O-5-5	jednotka
dávka O ₃	4,91	6,18	7,49	8,82	9,94	[mg/l]



Obr. 10 Průběhy odstranění diklofenaku pomocí zvyšující se dávky ozonu

U léčiva diklofenak došlo při použití zvyšující se dávky samotného ozonu podle výsledků k velmi dobrému procentu odstranění. Léčivo diklofenak bylo prakticky ve všech měřených opakování odstraněno velmi dobře. Nejvyšší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávkách ozonu okolo 10 mg O₃/l. V těchto hodnotách se diklofenak podařilo odstranit z 84 až 99 %. Nejnižší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávkách ozonu okolo hodnoty 5 mg O₃/l. V těchto hodnotách se diklofenak podařilo odstranit z 32 až 58 %. Na tak malé množství ozonu je i tento výsledek poměrně dobrý. Z výsledků, které jsou uvedeny v grafu je patrné, že i nižší koncentrace ozonu mohou velice účinně odstranit tento druh léčiv.

Doporučení: ozon při vyšších dávkách okolo 10 mg/l vhodný pro odstranění diklofenaku.



Obr. 11 Průběhy odstranění ibuprofenu pomocí zvyšující se dávky ozonu

U léčiva ibuprofen došlo při použití zvyšující se dávky samotného ozonu podle výsledků k poměrně dobrému procentu odstranění. Nejvyšší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávkách ozonu okolo 10 mg O₃/l. V těchto hodnotách se ibuprofen podařilo odstranit z 61 až 78 %. Nejnižší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávkách ozonu okolo hodnoty 5 mg O₃/l. V těchto hodnotách se ibuprofen podařilo odstranit z 15 až 38 %. Z výsledků, které jsou uvedeny v grafu je patrné, že léčivo ibuprofen je stabilnější než léčivo diklofenak, protože při použití stejných koncentrací ozonu dosahuje znatelně nižšího procenta odstranění.

Doporučení: ozon při vyšších dávkách okolo 10 mg/l vhodný pro odstranění ibuprofenu.

4.2.2 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ O₃+UV

Jednotlivé kroky měření U-1-1 až U-5-5 odpovídají nastavení výkonu generátoru ozonu v rozsahu 40 %, 50 %, 60 %, 70 % a 80 %. Zároveň byly zapojeny i obě UV lampy, které jsou součástí jednotky AOP. Aplikací ozonu a ozařováním vody UV zářením bylo docíleno efektivnější tvorby OH radikálů. Objem plynu do ozonizátoru je spotřeba pracovního plynu (kyslíku) o konstantním množství 0,3 m³/h. Tato hodnota je dána samotným zařízením generátoru ozonu. Koncentrace O₃ v plynu je hodnota, kterou generátor ozonu ukazuje na displeji při ustálení výkonu na požadované hodnotě. Tato hodnota je nezbytná pro výpočet výkonu generátoru [g/h], který se stanoví jako součin objemu plynu do ozonizátoru [m³/h] a koncentrace O₃ v plynu [g/m³]. Koncentrace O₃ ve vodě [mg/l] je pak hodnota výkonu generátoru dělena průtok vody od čerpadla jednotky AOP, které má konstantní průtok cca 3 m³/h. Tímto způsobem určíme koncentraci ozonu, kterou dávkujeme do testované odpadní vody.

Tab. 26 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+UV u prvního opakování měření

Dávkování O ₃ +UV datum: 1.10.2018	kroky měření					jednotka
	U-1-1	U-1-2	U-1-3	U-1-4	U-1-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,2	63,5	75,0	88,3	97,3	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,76	19,05	22,5	26,49	29,19	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,92	6,35	7,50	8,83	9,73	[mg/l]

Tab. 27 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+UV u druhého opakování měření

Dávkování O ₃ +UV datum: 12.10.2018	kroky měření					jednotka
	U-2-1	U-2-2	U-2-3	U-2-4	U-2-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,4	62,3	75,8	88,5	99,3	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,82	18,69	22,74	26,55	29,79	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,94	6,23	7,58	8,85	9,93	[mg/l]

Tab. 28 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+UV u třetího opakování měření

Dávkování O ₃ +UV datum: 19.10.2018	kroky měření					jednotka
	U-3-1	U-3-2	U-3-3	U-3-4	U-3-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,9	62,1	74,0	87,0	98,6	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,97	18,63	22,2	26,1	29,58	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,99	6,21	7,40	8,70	9,86	[mg/l]

Tab. 29 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+UV u čtvrtého opakování měření

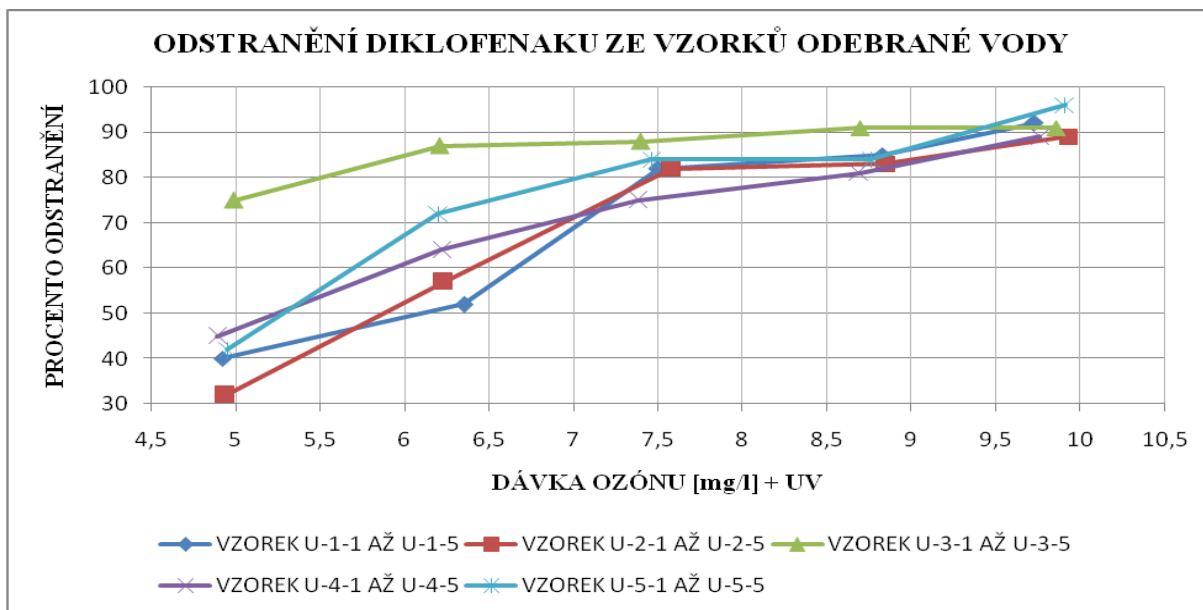
Dávkování O ₃ +UV datum: 24.10.2018	kroky měření					jednotka
	U-4-1	U-4-2	U-4-3	U-4-4	U-4-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	48,9	62,2	73,8	86,9	97,6	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,67	18,66	22,14	26,07	29,28	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,89	6,22	7,38	8,69	9,76	[mg/l]

Tab. 30 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+UV u pátého opakování měření

Dávkování O ₃ +UV datum: 25.10.2018	kroky měření					jednotka
	U-5-1	U-5-2	U-5-3	U-5-4	U-5-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,5	62,0	74,6	87,6	99,1	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,85	18,6	22,38	26,28	29,73	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,95	6,2	7,46	8,76	9,91	[mg/l]

Tab. 31 Souhrnná tabulka s nastavením koncentrace O₃+UV u všech měření

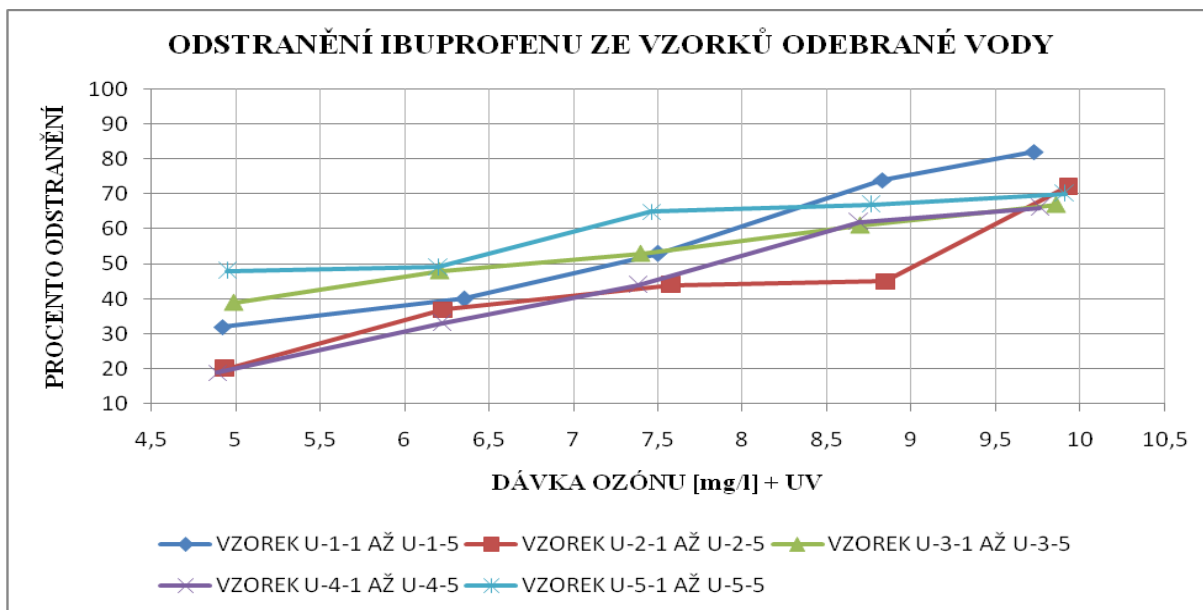
Vzorek	U-1-1	U-1-2	U-1-3	U-1-4	U-1-5	jednotka
dávka O ₃	4,92	6,35	7,50	8,83	9,73	[mg/l]
Vzorek	U-2-1	U-2-2	U-2-3	U-2-4	U-2-5	jednotka
dávka O ₃	4,94	6,23	7,58	8,85	9,93	[mg/l]
Vzorek	U-3-1	U-3-2	U-3-3	U-3-4	U-3-5	jednotka
dávka O ₃	4,99	6,21	7,40	8,70	9,86	[mg/l]
Vzorek	U-4-1	U-4-2	U-4-3	U-4-4	U-4-5	jednotka
dávka O ₃	4,89	6,22	7,38	8,69	9,76	[mg/l]
Vzorek	U-5-1	U-5-2	U-5-3	U-5-4	U-5-5	jednotka
dávka O ₃	4,95	6,20	7,46	8,76	9,91	[mg/l]



Obr. 12 Průběhy odstranění diklofenaku pomocí zvyšující se dávky ozonu + UV

U léčiva diklofenak došlo při použití zvyšující se dávky ozonu a přidaného UV záření podle výsledků k velmi dobrému procentu odstranění. Diklofenak byl prakticky ve všech měřených opakování odstraněn velmi dobře. Nejvyšší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávkách ozonu okolo 10 mg O₃/l. V těchto hodnotách se diklofenak podařilo odstranit z 90 až 96 %. Nejnižší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávkách ozonu okolo hodnoty 5 mg O₃/l. V těchto hodnotách se diklofenak podařilo odstranit z 30 až 75 %. Z výsledků, které jsou uvedeny v grafu je patrné, že se hodnoty odstranění oproti použití pouze samotného ozonu celkově posunuly směrem k vyššímu procentu odstranění. Výsledky z grafu naznačují, že kombinace ozonu a UV záření má prokazatelně vyšší účinnost na odstranění diklofenaku.

Doporučení: ozon+UV záření vhodné pro odstranění diklofenaku, kombinací došlo při snížení dávky ozonu na cca 7,5 mg/l ke stejnému procentu odstranění jako při dávce 10 mg/l při použití pouze samotného ozonu.



Obr. 13 Průběhy odstranění ibuprofenu pomocí zvyšující se dávky ozonu + UV

U léčiva ibuprofen došlo při použití zvyšující se dávky ozonu a přidaného UV záření podle výsledků k poměrně dobrému procentu odstranění. Léčivo ibuprofen bylo prakticky ve všech měřených opakování odstraněno dobře. Nejvyšší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávce ozonu okolo 10 mg O₃/l. V těchto hodnotách se ibuprofen podařilo odstranit z 66 až 82 %. Nejnižší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávkách ozonu okolo hodnoty 5 mg O₃/l. V těchto hodnotách se ibuprofen podařilo odstranit z 19 až 48 %. Z výsledků, které jsou uvedeny v grafu je patrné, že léčivo ibuprofen je i v případě použití ozonu a UV záření stabilnější než léčivo diklofenak, protože při použití stejných koncentrací ozonu dosahuje znatelně nižšího procenta odstranění. Z výsledků, které jsou uvedeny v grafu je ovšem patrné, že se hodnoty odstranění oproti použití pouze samotného ozonu celkově posunuly směrem k vyššímu procentu odstranění pouze velmi mírně. Výsledky z grafu naznačují, že kombinace ozonu a UV záření nemá významnější vliv na účinnost odstranění ibuprofenu.

Doporučení: ozon+UV záření při odstranění ibuprofenu bez významnějšího vlivu než samotný ozon, dobré odstranění až při dávkách ozonu cca 10 mg/l.

4.2.3 TESTOVÁNÍ ODSTRANĚNÍ LÉČIV ZA POUŽITÍ O₃+H₂O₂

Jednotlivé kroky měření H-1-1 až H-5-5 odpovídají nastavení výkonu generátoru ozonu v rozsahu 40 %, 50 %, 60 %, 70 % a 80 %. Zároveň bylo zapojeno i membránové čerpadlo pro aplikaci peroxidu vodíku do testované vody. Aplikací ozonu a peroxidu vodíku bylo docíleno efektivnější tvorby OH radikálů. Podle rovnice (6) je potřeba na dvě molekuly hydroxylového radikálu jedné molekuly peroxidu vodíku a dvou molekul ozonu.

Objem plynu do ozonizátoru je spotřeba pracovního plynu (kyslíku) o konstantním množství 0,3 m³/h. Tato hodnota je dána samotným zařízením generátoru ozonu. Koncentrace

O₃ v plynu je hodnota, kterou generátor ozonu ukazuje na displeji při ustálení výkonu na požadované hodnotě. Tato hodnota je nezbytná pro výpočet výkonu generátoru [g/h], který se stanoví jako součin objemu plynu do ozonizátoru [m³/h] a koncentrace O₃ v plynu [g/m³]. Koncentrace O₃ ve vodě [mg/l] je pak hodnota výkonu generátoru dělena průtok vody od čerpadla jednoty AOP, které má konstantní průtok 3 m³/h. Tímto způsobem určíme koncentraci ozonu, kterou dávkujeme do testované odpadní vody.

Pro správné nastavení výkonu (průtoku) dávkovacího membránového čerpadla peroxidu vodíku bylo potřeba stanovit množství požadovaného H₂O₂ v [l/h]. Pro sérii měření byl použit 0,2% roztok H₂O₂, který byl naředěn z 30 % roztoku H₂O₂. Převodem peroxidu vodíku a ozonu na jednotky [mmol/l] byly získány hodnoty k nastavení parametrů generátoru ozonu a dávkovacího čerpadla H₂O₂.

Tab. 32 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+H₂O₂ u prvního opakování měření

Dávkování O ₃ +H ₂ O ₂ datum: 2.10.2018	kroky měření					jednotka
	H-1-1	H-1-2	H-1-3	H-1-4	H-1-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	50,1	61,4	75,7	89,4	99,2	[g/m ³]
Výkon generátoru	15,03	18,42	22,71	26,82	29,76	[g/h]
Koncentrace O ₃ ve vodě	0,104	0,128	0,158	0,186	0,207	[mmol/l]
Koncentrace O₃ ve vodě	5,01	6,14	7,57	8,94	9,92	[mg/l]
Roztok 30% H ₂ O ₂	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	[%]
Dávka H ₂ O ₂	0,052	0,064	0,079	0,093	0,103	[mmol/l]
Dávka H₂O₂	2,65	3,26	4,02	4,75	5,27	[l/h]

Tab. 33 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+H₂O₂ u druhého opakování měření

Dávkování O ₃ +H ₂ O ₂ datum: 18.10.2018	kroky měření					jednotka
	H-2-1	H-2-2	H-2-3	H-2-4	H-2-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	48,8	61,9	73,8	87,3	99,2	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,64	18,57	22,14	26,19	29,76	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,88	6,19	7,38	8,73	9,92	[mg/l]
Roztok 30% H ₂ O ₂	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	[%]
Dávka H₂O₂	2,59	3,29	3,92	4,63	5,23	[l/h]

Tab. 34 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+H₂O₂ u třetího opakování měření

Dávkování O ₃ +H ₂ O ₂ datum: 19.10.2018	kroky měření					jednotka
	H-3-1	H-3-2	H-3-3	H-3-4	H-3-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,1	61,7	73,8	88,0	98,6	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,73	18,51	22,14	26,4	29,58	[g/h]

Koncentrace O₃ ve vodě	4,91	6,17	7,38	8,8	9,86	[mg/l]
Roztok 30% H ₂ O ₂	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	[%]
Dávka H₂O₂	2,60	3,28	3,92	4,67	5,23	[l/h]

Tab. 35 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+H₂O₂ u čtvrtého opakování měření

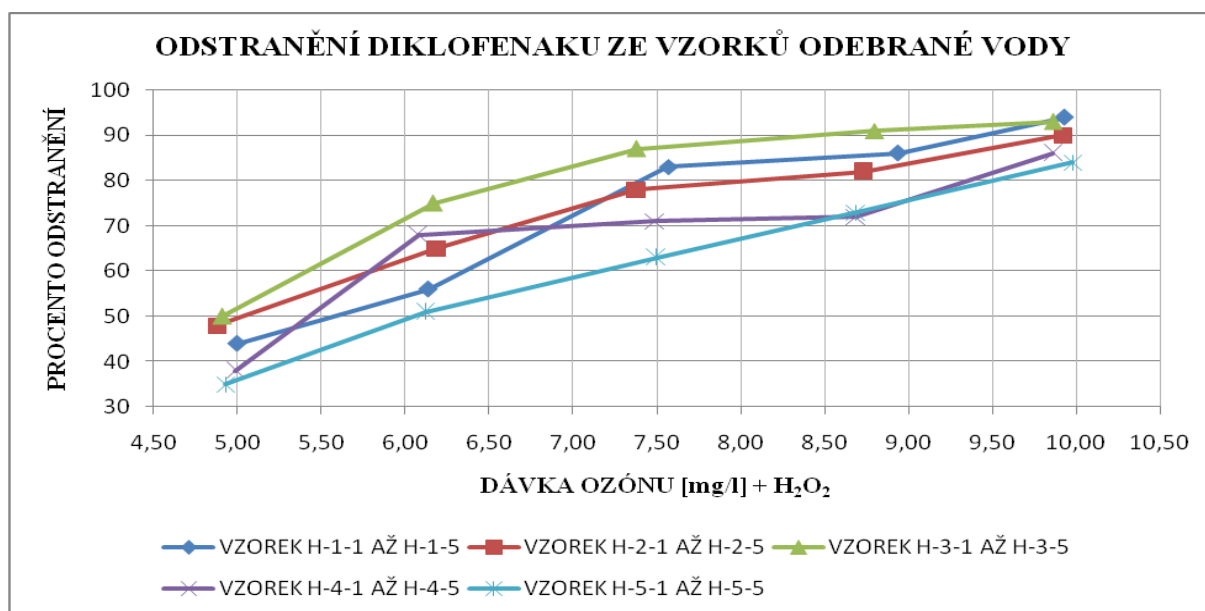
Dávkování O₃+H₂O₂ datum: 24.10.2018	kroky měření					jednotka
	H-4-1	H-4-2	H-4-3	H-4-4	H-4-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,9	60,8	74,9	86,9	98,6	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,97	18,24	22,47	26,07	29,58	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,99	6,08	7,49	8,69	9,86	[mg/l]
Roztok 30% H ₂ O ₂	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	[%]
Dávka H₂O₂	2,65	3,23	3,98	4,61	5,23	[l/h]

Tab. 36 Tabulka s nastavením koncentrace O₃+H₂O₂ u pátého opakování měření

Dávkování O₃+H₂O₂ datum: 25.10.2018	kroky měření					jednotka
	H-5-1	H-5-2	H-5-3	H-5-4	H-5-5	
Nastavení výkonu ozonizátoru	40	50	60	70	80	[%]
Objem plynu do ozonizátoru	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[m ³ /h]
Koncentrace O ₃ v plynu	49,3	61,2	75,0	86,9	99,8	[g/m ³]
Výkon generátoru	14,79	18,36	22,5	26,07	29,94	[g/h]
Koncentrace O₃ ve vodě	4,93	6,12	7,50	8,69	9,98	[mg/l]
Roztok 30% H ₂ O ₂	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	[%]
Dávka H₂O₂	2,62	3,25	3,98	4,61	5,30	[l/h]

Tab. 37 Souhrnná tabulka s nastavením koncentrace O₃+H₂O₂ u všech měření poměr O₃:H₂O₂= 2:1

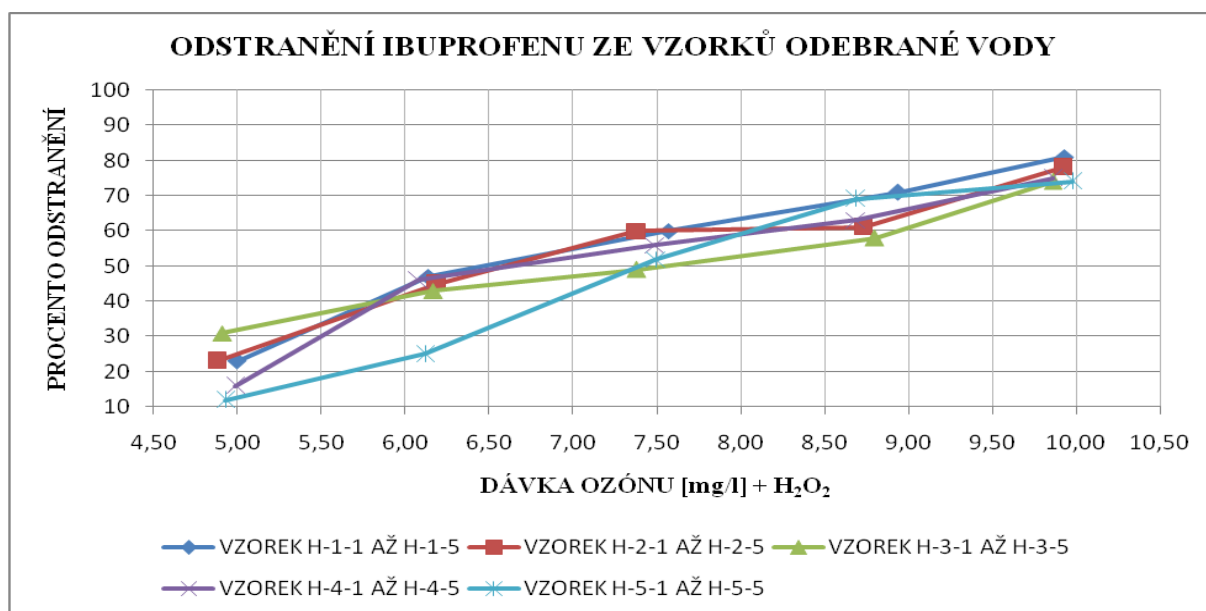
Vzorek	H-1-1	H-1-2	H-1-3	H-1-4	H-1-5	jednotka
dávka O ₃	5,00	6,14	7,57	8,94	9,93	[mg/l]
dávka H ₂ O ₂	2,65	3,26	4,02	4,75	5,27	[l/h]
Vzorek	H-2-1	H-2-2	H-2-3	H-2-4	H-2-5	jednotka
dávka O ₃	4,88	6,19	7,38	8,73	9,92	[mg/l]
dávka H ₂ O ₂	2,59	3,29	3,92	4,63	5,23	[l/h]
Vzorek	H-3-1	H-3-2	H-3-3	H-3-4	H-3-5	jednotka
dávka O ₃	4,91	6,17	7,38	8,80	9,86	[mg/l]
dávka H ₂ O ₂	2,60	3,28	3,92	4,67	5,23	[l/h]
Vzorek	H-4-1	H-4-2	H-4-3	H-4-4	H-4-5	jednotka
dávka O ₃	4,99	6,08	7,49	8,69	9,86	[mg/l]
dávka H ₂ O ₂	2,65	3,23	3,98	4,61	5,23	[l/h]
Vzorek	H-5-1	H-5-2	H-5-3	H-5-4	H-5-5	jednotka
dávka O ₃	4,93	6,12	7,50	8,69	9,98	[mg/l]
dávka H ₂ O ₂	2,62	3,25	3,98	4,61	5,30	[l/h]



Obr. 14 Průběhy odstranění diklofenaku pomocí zvyšující se dávky ozonu + H₂O₂

U léčiva diklofenak došlo při použití zvyšující se dávky ozonu a zvyšující se dávky H₂O₂ podle výsledků k velmi dobrému procentu odstranění. Diklofenak byl prakticky ve všech měřených opakování odstraněn velmi dobře. Nejvyšší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávce ozonu okolo 10 mg O₃/l a dávce peroxidu vodíku cca 5,25 l/h. V těchto hodnotách se diklofenak podařilo odstranit z 85 až 95 %. Nejnižší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávce ozonu okolo hodnoty 5 mg O₃/l a dávce peroxidu vodíku cca 2,62 l/h. V těchto hodnotách se diklofenak podařilo odstranit z 35 až 50 %. Z výsledků, které jsou uvedeny v grafu je patrné, že se hodnoty odstranění oproti použití ozonu a UV záření celkově moc neposunuly směrem k vyššímu procentu odstranění. Průběhy odstranění spíše korespondují s grafem, který zobrazuje průběhy odstranění při použití samotného ozonu. Výsledky z grafu tedy naznačují, že kombinace ozonu a peroxidu vodíku nemá prokazatelně vyšší účinnost na odstranění diklofenaku oproti jiným kombinacím.

Doporučení: ozon+H₂O₂ při odstranění diklofenaku bez významnějšího vlivu než samotný ozon, dobré odstranění až při dávkách ozonu cca 10 mg/l a cca 5,25 l/h peroxidu vodíku.



Obr. 15 Průběhy odstranění ibuprofenu pomocí zvyšující se dávky ozonu + H₂O₂

U léčiva ibuprofen došlo při použití zvyšující se dávky ozonu a zvyšující se dávky H₂O₂ podle výsledků k dobrému procentu odstranění. ibuprofen byl prakticky ve všech měřených opakování odstraněn dobře. Nejvyšší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávce ozonu okolo 10 mg O₃/l a dávce peroxidu vodíku cca 5,25 l/h. V těchto hodnotách se ibuprofen podařilo odstranit z 75 až 80 %. Nejnižší hodnoty odstranění byly naměřeny při dávce ozonu okolo hodnoty 5 mg O₃/l a dávce peroxidu vodíku cca 2,62 l/h. V těchto hodnotách se diklofenak podařilo odstranit z 12 až 30 %. Z výsledků, které jsou uvedeny v grafu je patrné, že se hodnoty odstranění oproti použití ozonu a UV záření celkově moc neposunuly směrem k vyššímu procentu odstranění. Průběhy odstranění spíše korespondují s grafem, který zobrazuje průběhy odstranění při použití samotného ozonu. Výsledky z grafu tedy naznačují, že kombinace ozonu a peroxidu vodíku nemá prokazatelně vyšší účinnost na odstranění ibuprofenu oproti jiným kombinacím.

Doporučení: ozon+H₂O₂ při odstranění ibuprofenu bez významnějšího vlivu než samotný ozon, dobré odstranění až při dávkách ozonu cca 10 mg/l a cca 5,25 l/h peroxidu vodíku.

5 ZÁVĚR

Cíle disertační práce, které spočívaly ve zpracování rešerše současného stavu poznání, laboratorního testování jednotky AOP a testování jednotky AOP v reálných podmínkách s definováním koncepčního návrhu technologie pro vybranou ČOV byly splněny. Chemické rozborů byly zaměřeny čistě na prokázání množství jednotlivých léčiv v odpadní vodě. Toxikologické rozborů nebyly stanoveny. V rámci vytyčených cílů lze konstatovat následující:

- **Zpracování kritické rešerše současného stavu problematiky:** v rámci kapitoly 4 byla zpracována rešerše současného stavu problematiky, byla zde vysvětlena problematika léčiv v životním prostředí a uvedeny poznatky z tuzemské a zahraniční odborné literatury.
- **Testování jednotky AOP v laboratorních podmínkách:** provedl jsem dvě fáze testování jednotky AOP. První fáze testování proběhla na Vědeckém centru AdMaS, kde došlo k testování účinnosti pokročilých oxidačních procesů na syntetické odpadní vodě. Jednalo se o pitnou vodu, kterou jsem kontaminoval vybranými druhy léčiv. V první, laboratorní fázi testování jsem provedl tyto kombinace pokročilých oxidačních procesů: O_3 ; UV; H_2O_2 ; O_3+UV ; H_2O_2+UV ; $O_3+H_2O_2$. Kombinace pokročilých oxidačních procesů byly provedeny na základě rešerše odborné literatury. Celkem bylo analyzováno 35 vzorků odebrané vody. Dále byla jednotka dodatečně doplněna o důležité součásti např. velkokapacitní nádrž o objemu 1000 l, vírový průtokoměr aj.
- **Testování jednotky AOP v reálných podmínkách na vybrané ČOV:** druhá fáze testování jednotky AOP proběhla na ČOV Brno Modřice, kde došlo k testování účinnosti pokročilých oxidačních procesů na reálné odpadní vodě. Jednalo se o odpadní vodu na odtoku z ČOV Brno Modřice. Druhá fáze testování byla prováděna na základě zkušeností z testování prvního. Doplnil jsem jednotku o chybějící praktické komponenty a optimalizoval testovací kombinace pokročilých oxidačních procesů na základě výsledků z prvního testování. Optimalizace spočívala ve vybrání tří kombinací pro testování odstranění léčiv z odpadních vod. Jednalo se o kombinace: O_3 ; O_3+UV ; $O_3+H_2O_2$. Tyto kombinace se v prvním testování projeví jako nejúčinnější. Odpadní voda byla čerpána pomocí ponorného kalového čerpadla do plastové velkokapacitní akumulární nádrže o objemu 1000 l, kterou jsem pořídil jako součást jednotky k jejímu možnému provozu. Z nádrže byla voda nasávána do systému jednotky AOP pomocí jejího čerpadla. Před vypouštěním testované odpadní vody zpět do nádrže byly odebírány vzorky pro následné chemické analýzy. Celkem bylo analyzováno 90 vzorků odebrané vody. Pro koncepční návrh technologie jsem stanovil doporučení pro eliminaci léčiv ibuprofen a diklofenak na ČOV Modřice.

5.1 PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

- v rámci disertační práce jsem se zaměřil na možnost odstraňování vybraných druhů léčiv pomocí pokročilých oxidačních procesů. Vybraným typem léčiv byly nesteroidní protizánětlivé léky, konkrétně se jednalo o léčiva typu ibuprofen, naproxen, diklofenak a ketoprofen. Tato léčiva byla vybrána z důvodu nejčastěji předepisovaných a nejužívanějších léčiv, kdy se jejich spotřeba v České republice počítá na statisíce až miliony balení ročně;
- během testování jednotky AOP byly odzkoušeny její nastavitelné parametry, byla doplněna o důležité součásti, které zaručují její provozuschopnost a byla provedena řada měření, která prokázala, že jednotka AOP dokáže redukovat vybraná léčiva z testované odpadní vody;
- veškerá měření a analýzy vzorků jsem zaznamenal do tabulek a grafů, které s popisem a fotodokumentací přehledně zaznamenávají průběh všech měření a jejich výsledky;
- bylo prokázáno, že každé z testovaných druhů léčiv má jinou míru resistance odstranění. Každé z testovaných léčiv reaguje jinak na zvolenou kombinaci pokročilých oxidačních procesů a jejich koncentrace;
- na základě rozborů odpadní vody, které byly odebrány na ČOV Brno Modřice bylo prokázáno, že odpadní voda obsahuje léčiva ibuprofen a diklofenak. Léčiva naproxen a ketoprofen se ve vzorcích odpadní vody detekovat nepodařilo;
- celkem bylo provedeno 125 chemických rozborů, které jsem vyhodnotil v grafech a doporučil jednotlivé druhy kombinací pokročilých oxidačních procesů pro nejlepší eliminaci konkrétních typů testovaných léčiv. Jako doporučení pro ČOV Brno Modřice navrhuji pro odstranění léčiva diklofenak kombinaci ozonu a UV záření. Při této kombinaci UV záření podpořilo ozonizaci a fotodegradaci diklofenaku, čímž došlo i při nižších dávkách ozonu k velice dobrému procentu odstranění. Jako doporučení pro léčivo ibuprofen navrhuji použití samotného ozonu. Jiné kombinace pokročilých oxidačních procesů neměly významnější vliv na procento odstranění.

5.2 PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI

Vyhodnocené výsledky mohou být použity pro návrh technologie/procesů směřujících ke zlepšení kvality vypouštěných vyčištěných odpadních vod z ČOV do recipientu. Cíle disertační práce by měly přispět ke zlepšení životního prostředí a eliminaci akumulujících se léčiv v povrchových i podzemních vodách.

Bylo provedeno testování procesů AOP k eliminaci léčiv z odpadních vod. Testování nových technologií a odzkoušení pilotní jednotky v poloprovozních i reálných podmínkách.

Zatím v České republice neexistuje legislativa, která by vyžadovala čištění odpadních vod z hlediska léčiv. Ovšem stále častěji otevírající se témata ohledně zvyšující se jejich spotřeby, prokázaných negativních vlivech léčiv na životní prostředí, chemických výsledků

rozborů povrchových i podzemních vod a diskuze na toto téma v laické i odborné veřejnosti zesilují tlak na legislativní úpravu. Lze tedy očekávat, že v budoucnu upravená legislativa povede k zařazení dalšího stupně čištění na větších ČOV. Tato očekávaná změna již vyžaduje z hlediska provozovatele ČOV hledání vhodných metod čištění, které zaručí požadovanou účinnost za ekonomicky přijatelných podmínek a pokrokové oxidační procesy jsou jednou z nich.

Novým poznatkem pro vědní obor je:

- odzkoušení jednotky AOP v laboratorních a reálných podmínkách na vybrané ČOV;
- porovnání potřeby ozonu, peroxidu vodíku a UV záření za účelem dosažení požadované účinnosti čištění vzhledem k rozdílným vlastnostem sledovaných léčiv, tj. za účelem snížení jejich spotřeby nebo jejich nutnosti využití, čímž dojde k úspoře provozních nákladů.

Výhledově by bylo žádoucí rozšířit testování pokročilých oxidačních procesů na další druhy léčiv, které jsou dle studií také velice často detekovány v životním prostředí. Dále pak rozšířit rozborů o toxikologii z důvodu látkové přeměny (metabolity), které bývají v mnohých případech toxičtější, než původní produkt. Pro eliminaci toxických metabolitů by bylo možné využít např. kombinace pokročilých oxidačních procesů a membránové technologie, aktivního uhlí nebo produktů mikrovlnné pyrolýzy nazývané biochar.

6 POUŽITÁ LITERATURA

[1] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 1. *Special Report on Environmental Endocrine Disruption - An Effects Assessment and Analysis*. 1997. [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <<http://www.epa.gov/nscep/index.html>>

[2] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 1. *Ozone for Industrial Water and Wastewater Treatment*. 1999 [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <<http://www.epa.gov/nscep/index.html>>.

[3] ŠÍDLOVÁ, PETRA, RADKA PODLIPNÁ a TOMÁŠ VANĚK. Cytostatická léčiva v životním prostředí. In: [Http://www.chemicke-listy.cz](http://www.chemicke-listy.cz) [online]. Praha, 2010 [cit. 2018-09-16]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2011_01_8-14.pdf

[4] Zákon č. 378/2007 Sb., o léčivech a o změnách některých souvisejících zákonů. In: [Http://www.mzcr.cz](http://www.mzcr.cz) [online]. Praha, 2007 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: http://www.mzcr.cz/Legislativa/dokumenty/leciva_5619_2493_11.html

[5] THE PROBLEM OF PHARMACEUTICAL POLLUTION. In: *Eeb* [online]. Brusel: European Environmental Bureau, 2018 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://eeb.org/the-problem-of-pharmaceutical-pollution/>

[6] Podklady a data poskytnuty paní Mgr. Hanou Pavlíčkovou ze Státního ústavu pro kontrolu léčiv

SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

2019

(IMPACT FACTOR 0,553)

ŠVESTKOVÁ, T.; MACSEK, T.; LANDOVÁ, P.; ÚTERSKÝ, M.; VÁVROVÁ, M.; HLAVÍNEK, P. Use of advanced oxidation processes for water treatment. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2019, vol. 28, no. 2, p. 831-836. ISSN: 1018-4619.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

ÚTERSKÝ, M.; HLAVÍNEK, P.; RAČEK, J.; POTUŽÁK, I.; KUTIL, V. Plovákové regulátory, štítové česle a štítové oddělovače odlehčovacích komor. *Vodovod.info*, 2019, no. 3., p. 1-14. ISSN: 1804-7157.

LANDOVÁ, P.; ŠVESTKOVÁ, T.; MACSEK, T.; ÚTERSKÝ, M.; VÁVROVÁ, M.; HLAVÍNEK, P. Evaluation of usability of advanced oxidation processes for the elimination of pharmaceuticals from treated wastewater. Mexico City: CSI XLI - Mexico 2019, 2019. p. 69-69.

MACSEK, T.; ÚTERSKÝ, M.; ŠVESTKOVÁ, T.; LANDOVÁ, P.; HLAVÍNEK, P. Odstraňování vybraných léčiv z odpadních vod pomocí pokrokových oxidačních procesů. In *MĚSTSKÉ VODY 2019*. Brno: ARDEC s.r.o., 2019. p. 207-212. ISBN: 978-80-86020-90-7.

2018

ÚTERSKÝ, M.; RAČEK, J.; HLAVÍNEK, P.; ŠEVČÍK, J. Získávání energie z odpadních vod pomocí tepelných výměníků. In *JUNIORSTAV 2018*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2018. p. 793-799. ISBN: 978-80-86433-69-1.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

ÚTERSKÝ, M.; STANKO, Š.; RAČEK, J.; KORYTÁŘ, I.; HLAVÍNEK, P. Výstavba zděných stok v České a Slovenské republice. *Vodovod.info*, 2018, no. 9, p. 1-16. ISSN: 1804-7157.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

ÚTERSKÝ, M.; ZDEŇKOVÁ, P.; LANDOVÁ, P.; MACSEK, T.; RAČEK, J.; HLAVÍNEK, P. Snížení koncentrace mikropolutantů v odpadní vodě prostřednictvím pevného uhlíkatého produktu mikrovlnné torefakce. *Vodovod.info*, 2018, no. 10, p. 1-9. ISSN: 1804-7157.

2017

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

ÚTERSKÝ, M.; HLUŠTÍK, P. Implementace programu SWMM v praxi. *Vodovod.info*, 2017, no. 9, p. 1-2. ISSN: 1804-7157.

RAČEK, J.; ÚTERSKÝ, M.; JANAS, T.; ŠEVČÍK, J.; MIKEŠOVÁ, M.; ROUŠAR, L.; HLAVÍNEK, P.; DUFEK, Z. Posouzení maximálních zisků tepla pro polyfunkční objekt Koliště-Vlhká. In *Městské vody 2017*. Brno: ARDEC s.r.o., 2017. p. 245-250. ISBN: 978-80-86020-85-3.

ŠVESTKOVÁ, T.; LANDOVÁ, P.; MACSEK, T.; ÚTERSKÝ, M.; VÁVROVÁ, M.; HLAVÍNEK, P. Use of Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. 2017. p. 397-397.

(SCOPUS)

RAČEK, J.; ÚTERSKÝ, M.; ŠEVČÍK, J.; DUFEK, Z.; HLAVÍNEK, P. Energy recovery from wastewater for heating and cooling of multifunctional building in Brno: Modeling the connection. In *17 th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. International multidisciplinary geoconference SGEM*. Bulgaria: SGEM, 2017. p. 519-526. ISBN: 978-619-7408-29-4. ISSN: 1314-2704.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

MACSEK, T.; ŠVESTKOVÁ, T.; LANDOVÁ, P.; ÚTERSKÝ, M.; BENEŠ, J.; HLAVÍNEK, P.; VÁVROVÁ, M. Odstraňování antibiotik z matrice pitné vody pomocí pokrokových oxidačních procesů. *Vodovod.info*, 2017, no. 9, p. 1-4. ISSN: 1804-7157.

ŠVESTKOVÁ, T.; LANDOVÁ, P.; MACSEK, T.; ÚTERSKÝ, M.; VÁVROVÁ, M.; HLAVÍNEK, P. *Removal of pharmaceuticals by advanced oxidation processes*. HPLC 2017 Prague Abstract Book. Praha: 2017. p. 305-3005.

HLUŠTÍK, P.; ÚTERSKÝ, M.; VACULÍN, O. *Výzkumná zpráva ze spolupráce při řešení aplikovaného výzkumu s firmou AgPOL, s.r.o.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, 2017. p. 1-37.

ÚTERSKÝ, M.; MACSEK, T.; HLAVÍNEK, P.; ŠVESTKOVÁ, T.; LANDOVÁ, P.; VÁVROVÁ, M. *Odstraňování vybraných léčiv z odpadních vod za použití oxidačních procesů*. In *JUNIORSTAV 2017*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017. p. 189-195. ISBN: 978-80-214-5462-0.

MACSEK, T.; ŠVESTKOVÁ, T.; ÚTERSKÝ, M.; LANDOVÁ, P.; HLAVÍNEK, P.; VÁVROVÁ, M. *Removal of pharmaceuticals from drinking water matrix in a flow-through AOPs reactor*. In *15th International Conference on Environmental Science and Technology. Proceedings of the International Conference on Environmental Science and Technology*. Athens, Greece: International Conference on Environmental Science and Technology, 2017. p. 1-5. ISBN: 978-960-7475-53-4. ISSN: 1106-5516.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

HLUŠTÍK, P.; ÚTERSKÝ, M. *Zhodnocení uživatelského prostředí programu SWMM*. *Vodovod. info*, 2017, no. 9, p. 1-7. ISSN: 1804-7157.

2016

(SCOPUS)

HLUŠTÍK, P.; ÚTERSKÝ, M.; VÁCLAVÍK, V.; DVORSKÝ, T. *Use of the program SWMM to simulate rainfall runoff from urbanized areas*. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II*. 1. Florida: CRC Press/Balkema, 2016. p. 413-418. ISBN: 9781315393827.

ŠVESTKOVÁ, T.; MACSEK, T.; ÚTERSKÝ, M.; LANDOVÁ, P.; VÁVROVÁ, M.; HLAVÍNEK, P. *Removal of Pharmaceuticals and Musk Compounds from Wastewater Using Advanced Oxidation Processes*. 17th European Meeting on Environmental Chemistry. Inverness: 2016. p. 46-46.

ÚTERSKÝ, M.; MACSEK, T.; HLAVÍNEK, P.; ŠVESTKOVÁ, T. *Odstraňování léčiv pomocí jednotky AOP (ADVANCED OXIDATION PROCESS)*. In *Odpadové vody 2016*. 1. Bratislava: Asociácia čistiarenských expertov Slovenskej republiky, 2016. p. 111-116. ISBN: 978-80-89882-00-7.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

MACSEK, T.; ÚTERSKÝ, M.; ŠVESTKOVÁ, T.; VÁVROVÁ, M.; HLAVÍNEK, P. *Výzkum odstraňování antibiotik z odpadních vod pomocí technologie AOPs*. *Vodní hospodářství*, 2016, vol. 66., no. 10, p. 6-9. ISSN: 1211-0760.

ÚTERSKÝ, M.; MACSEK, T.; HLAVÍNEK, P. *Waste water micropollutants removal by using AOP (Advanced Oxidation Process) prototype*. In *16th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016. International multidisciplinary geoconference SGEM*. 1. Sofia, Bulharsko: International multidisciplinary scientific geoconference SGEM, 2016. p. 823-830. ISBN: 978-619-7105-65-0. ISSN: 1314-2704.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

HLAVÍNEK, P.; RAČEK, J.; MACSEK, T.; ÚTERSKÝ, M. *Vývoj a testování plaveckého trenažeru „SwimmTrainer“*. *Vodovod. info*, 2016, vol. 2016, no. 3, p. 1-3. ISSN: 1804-7157.

HLAVÍNEK, P.; RAČEK, J.; ÚTERSKÝ, M. *Výzkumná zpráva č. 12657089 HEROLDS, spol. s r.o. - Multifunkční centrum EDISON - posouzení využití tepla z odpadních vod, tepla z vrtů a využití šedých vod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, 2016. p. 1-61.

2015

ÚTERSÝ, M.; HLUŠTÍK, P.; HLAVÍNEK, P. Možnosti posouzení odlehčovacích komor v softwarovém prostředí. In *Městské vody 2015*. 1. Brno: ARDEC s.r.o., 2015. p. 267-273. ISBN: 978-80-86020-81- 5.

(SCOPUS)

ÚTERSÝ, M.; HLUŠTÍK, P.; HLAVÍNEK, P. Software environment for the assessment of combined sewer overflows in sewer systems. In *15th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2015 - Ecology, Economics, Education and Legislation. International multidisciplinary geoconference SGEM*. 1. Sofia, Bulgaria: SGEM, 2015. p. 455-462. ISBN: 978-619-7105-40-7. ISSN: 1314-2704.

ÚTERSÝ, M.; HLUŠTÍK, P.; HLAVÍNEK, P. Softwarové prostředí pro simulaci odlehčovacích komor. In *Rekonštrukcie stokových sietí a čistiarní odpadových vod*. 1. Bratislava, Slovenská republika: Výskumný ústav vodného hospodárstva Bratislava, 2015. p. 419-426. ISBN: 978-80-89740-08- 6.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

ÚTERSÝ, M.; PÍŠŤKOVÁ, V.; TURKOVÁ, J.; HLAVÍNEK, P.; VÁVROVÁ, M.; KORYTÁROVÁ, J. Technologie ČOV Mikulov a možnosti odbourávání mikropolutantů. *Vodní hospodárství*, 2015, vol. 65, no. 6, p. 4-8. ISSN: 1211- 0760.

ÚTERSÝ, M.; HLAVÍNEK, P.; PÍŠŤKOVÁ, V.; VÁVROVÁ, M.; TURKOVÁ, J.; KORYTÁROVÁ, J. Degradation of micropollutants at WWTP Mikulov. In *JUNIORSTAV 2015*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015. p. 260-268. ISBN: 978-80-214-5091- 2.

HLAVÍNEK, P.; RACLAVSKÝ, J.; HLUŠTÍK, P.; RAČEK, J.; MACSEK, T.; ÚTERSÝ, M.; TLAŠEK, M.; BÝŠEK, M. *Výzkumná zpráva č. 25/12521/15 - HS 12557096 ve věci součinnosti na vývojovém projektu "SWIMM TRAINER"*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAST, Centrum AdMaS, 2015. p. 1-39.

2014

PÍŠŤKOVÁ, V.; ÚTERSÝ, M.; TURKOVÁ, J.; HLAVÍNEK, P.; VÁVROVÁ, M.; KORYTÁROVÁ, J. Studium vlivu čistírenských technologií na eliminaci škodlivin z vodního ekosystému. In *Odpadové vody 2014*. 1. Bratislava: NOI Bratislava, 2014. p. 108-113. ISBN: 978-80-970896-7- 2.

ÚTERSÝ, M.; HLUŠTÍK, P. Technické ukazatele energetické náročnosti čistíren odpadních vod. In *Aktuální vodohospodářské problémy*. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. p. 48-57. ISBN: 978-80-248-3541- 9.

ÚTERSÝ, M.; HLUŠTÍK, P.; RACLAVSKÝ, J. Technické ukazatele energetické náročnosti čistíren odpadních vod. In *Městské vody 2014*. 1. Brno: ARDEC s.r.o., 2014. p. 175-182. ISBN: 978-80-86020-79- 2.

TURKOVÁ, J.; CHALOUPKOVÁ, P.; ÚTERSÝ, M.; KORYTÁROVÁ, J.; VÁVROVÁ, M.; HLAVÍNEK, P. Způsob ekonomického posouzení použité technologie u ČOV Mikulov. In *Oceňovanie a riadenie stavebných projektov*. 1. Brusel, Belgie: EuroScientiavzw, 2014. p. 226-232. ISBN: 978-90-822990-1- 4.

(RECENZOVANÝ ČASOPIS)

ÚTERSÝ, M.; HLUŠTÍK, P. Návrh technických ukazatelů energetické náročnosti čistíren odpadních vod. *Vodovod. info*, 2014, vol. 2014, no. 12, p. 1-7. ISSN: 1804- 7157.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje:

Jméno, příjmení: Ing. Michal Úterský
Datum narození, místo nar.: 01.06.1988, Opava, Česká republika
E-mail: utersky.m@fce.vutbr.cz

Vzdělání:

2014-současnost Doktorský studijní program, Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební, Vodní hospodářství a vodní stavby, Veveří
331/95, 602 00 Brno
2012-2014 Magisterský studijní program, Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební, Vodní hospodářství a vodní stavby, Veveří
331/95, 602 00 Brno
2008-2012 Bakalářský studijní program, Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební, Vodní hospodářství a vodní stavby, Veveří
331/95, 602 00 Brno
2004-2008 Střední průmyslová škola stavební, Lipník nad Bečvou.

Pracovní zkušenosti:

2016-současnost VH atelier, spol. s r.o.; projekční a inženýrská činnost
2015-současnost Centrum AdMaS, VUT v Brně, Fakulta stavební, výzkumná
skupina EGAR; výzkumný pracovník
2014-2015 SWECO Hydroprojekt a.s.; projekční činnost

Pedagogická činnost:

BP02 Stokování a čištění, Ústav vodního hospodářství obcí, VUT FAST v Brně
BP51 Inženýrské sítě, Ústav vodního hospodářství obcí, VUT FAST v Brně
BP54 Hydrologie stokových sítí, Ústav vodního hospodářství obcí, VUT FAST v Brně
BS001 Vodohospodářské stavby, Ústav vodního hospodářství obcí, VUT FAST v Brně
Dozor studentů v rámci výuky v terénu, Ústav vodního hospodářství obcí, VUT FAST v Brně

Vědecká činnost:

Účast na výzkumných projektech Vědeckého centra AdMaS, odborné publikace.

Dovednosti:

AutoCAD - zkušený uživatel
MS Office - zkušený uživatel
MS Project - samostatný uživatel
SWMM 5.1 - zkušený uživatel
Epanet 2.0 - zkušený uživatel
REVIT - samostatný uživatel

Jazykové znalosti:

Angličtina - středně pokročilý

ABSTRAKT

Koncepce odstraňování léčiv z odpadních vod nabývá v poslední době stále většího významu. Aktuálně můžeme po celém světě identifikovat tendenci zvyšující se spotřeby léčiv a zároveň proporcionální navýšení účinných dávek v léčivech z důvodu rezistentnosti mikroorganismů. Obecně můžeme léčivo definovat jako léčivou látku, směs léčivých látek nebo léčivý přípravek, který je určen k příznivému ovlivňování zdraví lidí nebo zvířat. Ovšem přítomnost těchto látek v životním prostředí vede z dlouhodobého hlediska k chronické toxicitě vodních organismů, možnosti rozmnožení multirezistentních patogenních bakteriálních kmenů, zhoršení reprodukční činnosti živočichů a zhoršení jejich endokrinního systému. Disertační práce se zabývá odstraňováním léčiv z odpadních vod pomocí pokročilých oxidačních procesů. Výzkum ukázal, že pokročilé oxidační procesy jsou schopny redukovat koncentrace léčiv. Jednou z hlavních priorit této problematiky je zejména dočišťování odpadních vod, které odtékají z komunálních ČOV do recipientu. Odpadní vody obsahují nezanedbatelné množství léčiv, které se do nich dostávají z výkalů, moči a také splachováním prošlých léků. Účinnost pokročilých oxidačních procesů na odstraňování vybraných druhů léčiv je podrobně řešena v praktické části disertační práce.

ABSTRACT

A concept of removing of pharmaceuticals from a wastewater is become more important topic. Currently we can see the increasing consumption of pharmaceuticals worldwide and an increasing effective doses of pharmaceuticals due to the resistance of microorganisms. Generally, a medicine means an active substance or their mixtures. The medicine is used for positive influencing of human's and animal's health. Nevertheless, a long term presence of pharmaceuticals in the environment leads to chronic toxic aquatic organisms, possibilities of multiplication of multi-resistant pathogenic bacterial strains, deterioration of reproduction of animals and their endocrine system. My dissertation is focused on a removing of pharmaceuticals from the wastewater via advanced oxidation processes. Results of research showed that the advanced oxidation processes are able to reduce concentration of pharmaceuticals. Mainly priority of this problem is other cleaning level of the wastewater which flows away from urban WWTP to river. Wastewaters consist of large volume of pharmaceuticals due to excrements, urination and flushing of outdated pharmaceuticals. An efficiency of advanced oxidation processes on the removal selected types of pharmaceuticals is a part of practical selection of the dissertation.