

Univerzita Pardubice
Fakulta Chemicko-technologická

Procesy čištění odpadních vod využívající UV záření
Bakalářská práce

2021

Dominika Benková

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Dominika Benková**
Osobní číslo: **C18323**
Studijní program: **B2802 Chemie a technická chemie**
Studijní obor: **Chemie a technická chemie**
Téma práce: **Procesy čištění OV využívající UV záření**
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši (minimálně od roku 2015 včetně) zaměřenou na procesy čištění odpadních vod, využívající UV záření a na jejich základní principy. Pozornost zaměřte především na soudobý trend rozmáhajících se UV-LED zdrojů.
2. Získané poznatky vyhodnoťte s ohledem na aplikační potenciál porovnávaných procesů a technologií při zpracování odpadních vod. Soustředte se zejména na posouzení z hlediska účinnosti odstranění různých typů kontaminantů a provozních podmínek procesu využívajícího UV záření.
3. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 9/2012 „Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu“ v platném znění.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Dušek, Ph.D.**
Ústav environmentálního a chemického inženýrství
Konzultant bakalářské práce: **Mgr. Gabriela Kuchtová**
Datum zadání bakalářské práce: **5. února 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **4. července 2020**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 5. února 2020

Prohlašuji:

Práci s názvem Procesy čištění odpadních vod využívající UV záření jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12. 07. 2021

Dominika Benková v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat panu Ing. Liboru Duškovu, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, podporu a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

ANOTACE

Tato bakalářská práce je zaměřena na vypracování literární rešerše na téma procesy čištění odpadních vod využívající UV záření a popis jejich základních principů. Hlavní pozornost je věnována novému trendu technologií s UV-LED zdroji. Je zde zohledněn aplikační potenciál porovnávaných procesů a technologií při odstraňování různých typů kontaminantů pomocí UV záření.

KLÍČOVÁ SLOVA

UV záření, LED zdroje, UV-A, UV-B a UV-C záření, foto-Fentonová reakce

TITLE

Wastewater treatment processes using UV radiation

ANNOTATION

This final thesis is focused on the elaboration of literary research on the topic about wastewater treatment processes using UV radiation and description of their basic principles. The main attention is paid to the new trend of technologies with UV-LED sources. The application potential of the compared processes and technologies in the removal of various types of contaminants using UV radiation is considered here.

KEYWORDS

UV light, LED sources, UV-A, UV-B and UV-C radiation, photo-Fenton reaction

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	8
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	9
ÚVOD.....	10
1. UV ZÁŘENÍ.....	13
1.1 Zdroje UV záření.....	14
1.1.1 Rtuťová výbojka.....	15
1.1.2 Xenonová oblouková výbojka.....	16
1.1.3 Led zdroje UV.....	17
1.2 Vlnová délka UV záření a reakce s chemickou vazbou.....	20
2. PROCESY ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD VYUŽÍVAJÍCÍ UV ZÁŘENÍ.....	22
2.1. Foto-Fentonová oxidace.....	25
2.2. Fotokatalytická oxidace.....	25
2.3. Fotolýza.....	26
2.4. Ozon.....	26
2.5. Příklady aplikací procesů čištění odpadních vod využívajících UV záření.....	26
ZÁVĚR.....	29
POUŽITÁ LITERATURA.....	31

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 – Obecné rozvržení ČOV	11
Obrázek 2 – Elektromagnetické spektrum slunečního záření	13
Obrázek 3 – Rtuťová vysokotlaká výbojka	15
Obrázek 4 - Spektrum střednětlaké a nízkotlaké Hg výbojky	16
Obrázek 5 – Xenonová výbojka – vpravo schéma, vlevo reálné vyhotovení výbojek.....	16
Obrázek 6 – Závislost energie vazeb na vlnové délce a intenzita záření xenonové výbojky	17
Obrázek 7 – Spektrum UV- LED výbojek AlGaIn při různých proudcích	18
Obrázek 8 – Průběh čištění pomocí TiO ₂	25
Tabulka 1: Příпустné dávky ozáření pro oblast UV-R	14
Tabulka 2: Vliv skladby polovodičového materiálu na vlnovou délku a energii emitovaných fotonů u LED zdrojů UV-VIS záření	19
Tabulka 3: Rozdělení UV oblastí podle energie a vlnové délky UV	20
Tabulka 4: Procesy AOP využívající UV a jejich systémové reakce	24

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AOPs	pokročilé oxidační procesy
WHO	World Health Organization
TOC	celkový organický uhlík
UV-A	ultrafialové záření v oblasti vlnových délek 315–400 nm
UV-B	ultrafialové záření v oblasti vlnových délek 280–315 nm
UV-C	ultrafialové záření v oblasti vlnových délek 100–280 nm
UV-VIS	ultrafialové záření v oblasti viditelného světla
BSK	biologická spotřeba kyslíku
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
NL	nerozpuštěné látky
PPCP	Pharmaceuticals and Personal Care Products

ÚVOD

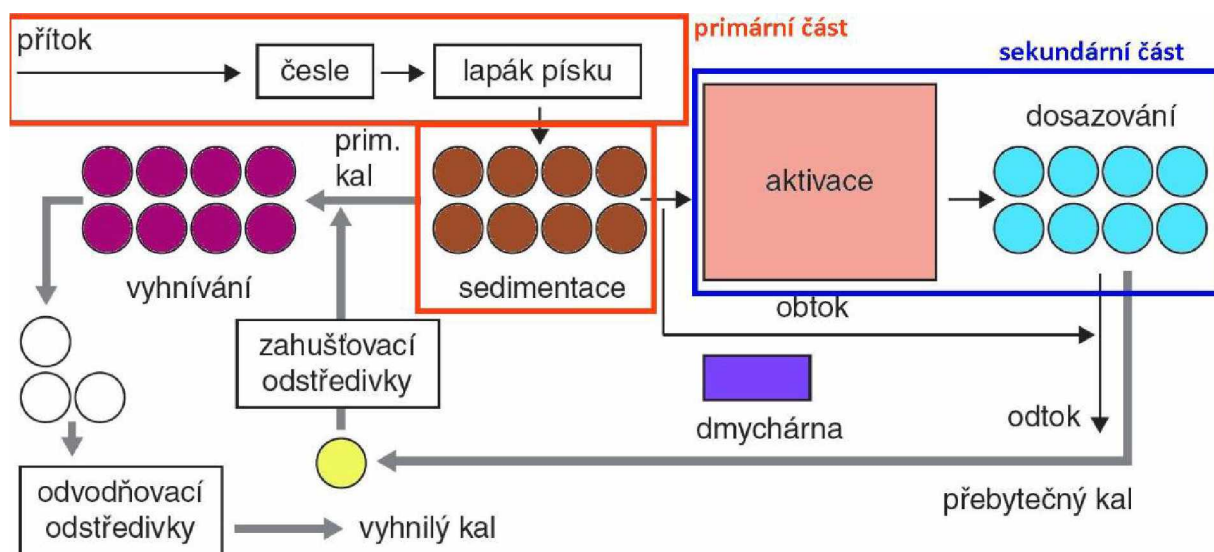
Voda je životně nenahraditelná tekutina a je nezbytnou součástí každého živého organismu. V lidském těle je jí zastoupeno 60–70 procent tělesné hmotnosti. Její přesný objem závisí na pohlaví, věku a tělesném stavu jedince. Změna tohoto objemu může být způsobena tělesnou zátěží, nemocí nebo i konzumací znečištěné vody. Projevy snížení vody v těle obecně známé jako dehydratace jsou žízeň, suchá sliznice, suchá kůže a další. Delší dehydratace organismu může končit až smrtí. Z informací Světové organizace WHO (World Health Organization) z roku 2018 je na světě asi 8 milionů lidí, kteří nemají přístup k čisté pitné vodě. Právě tyto lidé často umírají kvůli chorobám způsobeným konzumací znečištěné vody.

Voda je nejdůležitější složkou na Zemi, která zaujímá více než dvě třetiny zemského povrchu a z tohoto celku tvoří pitná voda přibližně 3 procenta. Pitná voda v podobě povrchových a podzemních vod obsahuje rozpuštěné i nerozpuštěné nečistoty, které je potřeba před samotnou konzumací vody odstranit. Podle druhu znečištění musí voda projít speciálními procesy čištění. K účelu dopravení znečištěné vody do čistícího zařízení slouží tzv. kanalizační systémy. Počátky transportu odpadních vod jsou známé z roku 2600 př.n.l. z Babylonu a z roku 2510 př.n.l. z Mezopotámie, kde lidé používali zařízení podobná dnešním lázním spolu se splachovacími záchody. V Evropě se tyto kanalizační systémy objevily až o mnoho let později, a to kolem roku 1500 př.n.l.

Ve středověku se na našem území odvod odpadních vod řešil formou otevřených příkopů. Tento jednoduchý příkopový systém způsoboval nejen nepříjemný zápach, napomáhal i šíření různých nemocí. První pražskou uzavřenou kanalizaci pomohl zřídit v letech 1816–1828 hrabě Karel Chotek. Zrealizovat tak myšlenku pocházející z roku 1787 o výstavbě kanalizačního systému, bohužel tento kanalizační systém dlouhý 44 km končil přímou výpustí přímo do Vltavy. K modernizaci tohoto systému došlo až v roce 1893 a to jen díky zkušenému inženýrovi Williamu Heerlei Lindley. Podle něj byl vypracován v roce 1906 projekt kanalizačního systému zakončeným čistírnou odpadních vod v Praze-Bubenči. [1]

Voda je součástí řady technologických procesů, ve kterých se široce začalo řešit její složení. Záleží nejen na kvalitě vody vstupující do technologických procesů, ale i na kvalitě z nich vystupující. V posledních letech bylo hlavním záměrem získat široce aplikovatelnou a finančně dostupnou technologii čištění odpadních vod.

Současné čistírny odpadních vod mají dva základní stupně čištění vod a to primární a sekundární stupeň. Primární stupeň čištění zahrnuje mechanické odstranění větších částic znečišťujících vodu a je prováděn na česlech, mřížích, sítích, lapačích písku a olejů a pomocí usazováků. Sekundární stupeň zahrnuje biologické procesy odstraňující menší či rozpuštěné látky, těmito procesy jsou biofiltrace, mikrobiologické odbourávání organických sloučenin obsahující uhlík, čištění pomocí aktivního kalu odstraňující fosfor a dusík. Příklad obecného rozvržení takové čistírky je zobrazen na Obr. 1, upraveno z [2].



Obrázek 1 – Obecné rozvržení ČOV, upraveno z [2]

Pro zvýšení kvality čištěných vod byl v dnešní době zaveden tzv. terciární dočišťovací stupeň. Tímto dočišťovacím způsobem jsou odstraňovány zejména rozpuštěné látky, fosfor a patogenní látky a tím dochází k hygienizaci vody. Mezi tyto doplňující metody patří biologické, fyzikálně-chemické a jiné procesy jako je chemické srážení fosforu, postdenitrifikace, koagulace, sorpce, separace suspendovaných látek (filtrace, sedimentace, membránové procesy, flotace) a různá kombinace těchto procesů závisící na druhu doodstraňovaného znečištění. [2]

Obsah znečištění ve vypouštěných vodách z čistíren je kontrolován pomocí hodnot parametrů BSK, CHSK a NL a dále je také kontrolován obsah fosforu a dusíku. Z běžných domácností se do čištěných komunálních vod dostávají i jiné látky jako jsou hygienické a čisticí prostředky, kosmetika, léčiva a další. Zvýšení obsahu těchto specifických látek ve vodách vedlo v roce 1999 k zavedení pojmu PPCP (Pharmaceuticals and Personal Care Products – Daughton a Temes). Největší komplikací pro čištění jsou z této skupiny zejména léčiva s biologicky aktivní složkou s různorodou chemickou strukturou a různými fyzikálními

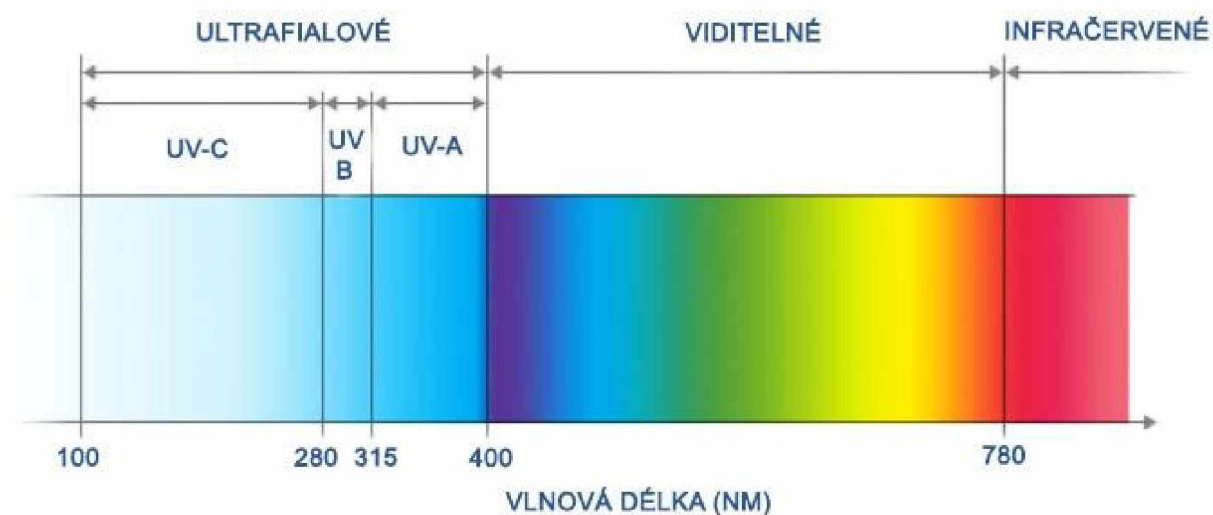
vlastnostmi podávanými perorálně, parenterálně či dermatologicky. Takto uvolněná léčiva ve vodních tocích nelze z legislativního pohledu kontroly znečištění brát jako nebezpečné látky a tím i nelze aplikovat legislativní podklady pro ochranu vody a životního prostředí. Pro eliminaci obsahu těchto látek v komunálních odpadních vodách je v čistírnách odpadních vod využíváno kvartérního stupně dočištění.

Mezi tyto technologie čištění odpadních a jinak znečištěných vod, které byly postupně využívány a zdokonalovány se dostaly i takové, které využívaly tzv. fotokatalytické štěpení. Takovými technologiemi jsou sorpční a pokročilé oxidační procesy AOPs z anglického názvu (Advanced oxidation processes), přičemž základem AOPs je odstranění znečištění pomocí hydroxylového radikálu. Výhodou tohoto procesu je široká aplikovatelnost díky reakčním mechanismům různých fotokatalyzátorů poskytujících vlivem vhodného světelného zdroje hydroxylový radikál $\text{OH}\cdot$. [3]

Obecně mezi fotokatalyzátory lze zařadit takovou sloučeninu, která po absorpci světelného kvanta poskytuje pár elektron-díra. Právě tento pár dále reaguje s přítomnými polutanty tak, že je štěpí s cílem regenerace původního elektronového stavu. Hlavním problémem při využití těchto procesů je převážně ekonomická náročnost způsobena drahými činidly (O_3 , H_2O_2). Ve své bakalářské práci jsem se zaměřila především na moderní AOP proces, které pro generaci $\text{OH}\cdot$ a rozpad organického znečištění využívají UV-VIS záření.

1. UV ZÁŘENÍ

Ultrafialové záření (UV záření) je elektromagnetické záření v pásmu vlnových délek 100–400 nm. Toto záření lze podle vlnové délky rozdělit na UV-A (315–400 nm), UV-B (280–315 nm) a UV-C (100–280 nm), jak je to patrné i z Obr. 2, upraveno z [4]. Čárovému spektru UV-C se také jinak říká VUV vzduchoprázdné (vakuové) UV záření. Mezi přirozené zdroje UV záření patří sluneční paprsky. Sluneční paprsky obsahují 51,8 % viditelného záření, 43,9 % infračerveného záření a 4,3 % UV záření. A toto UV záření dopadající na zemský povrch se skládá z 99 % ze záření UV-A a 1 % záření UV-B. UV-B záření je převážně pohlceno ve stratosféře ozónovou vrstvou. Mezi umělé zdroje patří například rtuťové výbojky či monochromatické lasery.



Obrázek 2 – Elektromagnetické spektrum slunečního záření upraveno z [4]

UV záření se nachází na hranici s ionizujícím zářením, které působí biologické poškození tkání. Protože byly i u záření s frekvencí pod hranicí ionizace prokázány negativní účinky na lidský organismus, je i UV záření kontrolováno. Legislativně ale nelze stanovit a kontrolovat ozáření z přírodních zdrojů. Proto jsou limitovány hodnoty jen u umělých zdrojů UV. Z hlediska posuzování biologických účinků bylo UV záření rozděleno na oblast UV-R a na oblast UV-A. Biologické účinky UV záření jsou posuzovány na základě hodnoty tzv. dávky ozáření H , která se získá součinem intenzity ozáření E [W/m^2] a doby trvání expozice [5,6], viz rovnice (1).

$$H = E_{\text{ef}} \cdot t \text{ [J}/\text{m}^2] \quad (1)$$

U oblasti UV-R, kde jsou hodnoty vlnové délky menší než 320 nm, nesmí být překročeny hodnoty ozáření H, viz tabulka 1.

Tabulka 1: Příпустné dávky ozáření pro oblast UV-R

Vlnová délka [nm]	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
Dávka ozáření [J/m ²]	400	250	160	100	70	46	30	34	47	100	2000

U oblasti UV-A, kde jsou hodnoty vlnové délky větší než 320 nm, se dále kontroluje doba expozice.

UV záření se používá nejen k čištění odpadních vod a opalování, ale i k chemické analýze (UV-VIS spektrofotometrie), k fotolitografii, dále ve zdravotnických laboratořích ve formě germicidních zářičů, nebo jako stabilizátor v plastikářském průmyslu, sterilizační činidlo (potravinářství, kosmetika) a nově i k vytvrzování materiálů v 3D tisku. [7]

1.1 Zdroje UV záření

Pro čištění odpadních vod UV zářením se používají monochromatické nízkotlaké (low pressure) a polychromatické střednětlaké (medium pressure) UV lampy. Mechanismus dezinfekčního (germicidního) účinku těchto lamp v případě odstraňování mikroorganismů a virů je na principu fotochemického poškození nukleových kyselin (DNA či RNA) mikroorganismů. Například báze v nukleových kyselinách absorbují záření o vlnové délce 240–280 nm, avšak nejvyšší účinek fotochemického poškození nukleových kyselin je pozorován v rozmezí 260–265 nm.

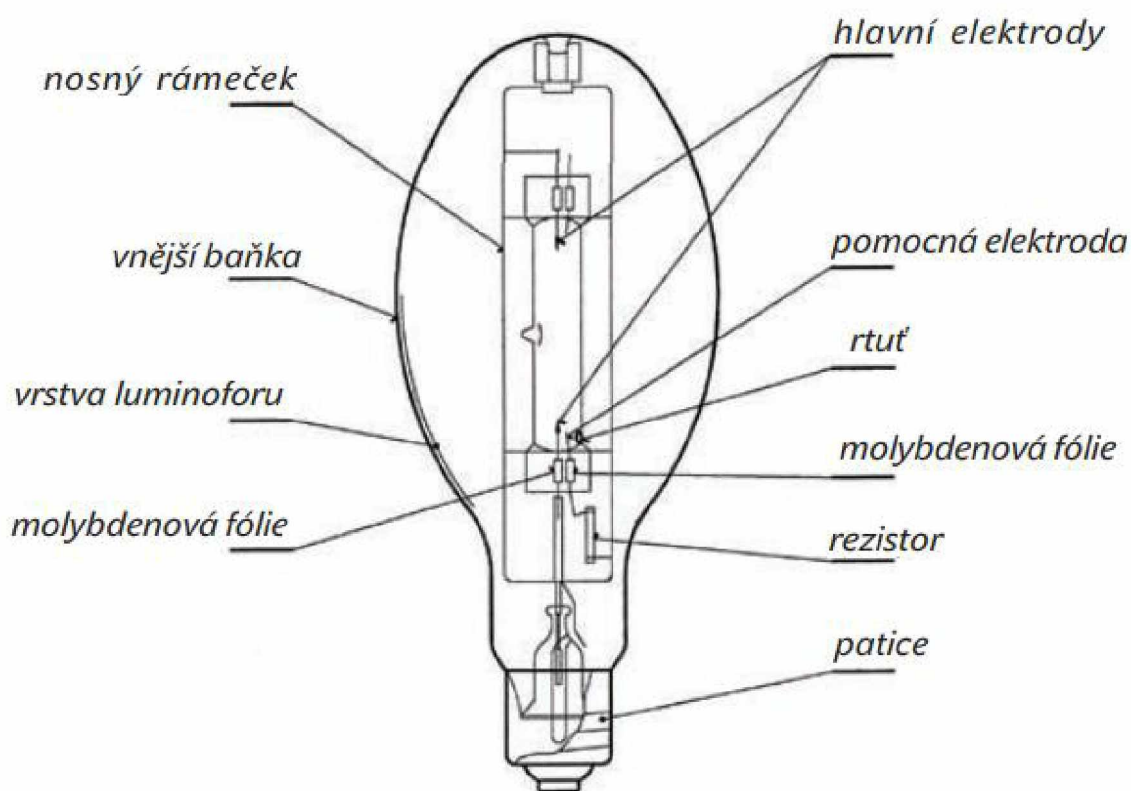
Nevýhodou tohoto procesu je možné obnovení takto poškozených buněk (mikroorganismů), avšak tato obnova se netýká všech typů mikroorganismů. Oproti tomu má tento druh čištění velké výhody jako je zejména nevyužívání chemických látek. Tímto způsobem se nemění ani složení vody týkající se zbytků sloučenin či vedlejších produktů dezinfekce vody a není ovlivňována chuť či pach vody. Další výhodou je, že proces není příliš ovlivnitelný chemickým složením nebo teplotou čištěné vody.

Pro čištění odpadních vod je možné použít oba tyto typy UV lamp. Nevýhodou nízkotlakých UV lamp je nízká životnost zdroje v porovnání s polychromatickými UV lampami. [7]

Mezi další zdroje UV záření patří lasery a výbojky. Výbojky uvolňující UV záření musí být vytvořeny z křemenného skla, protože klasické obyčejné sklo UV záření pohlcuje. Mezi takové výbojky patří například xenonová a rtuťová výbojka.

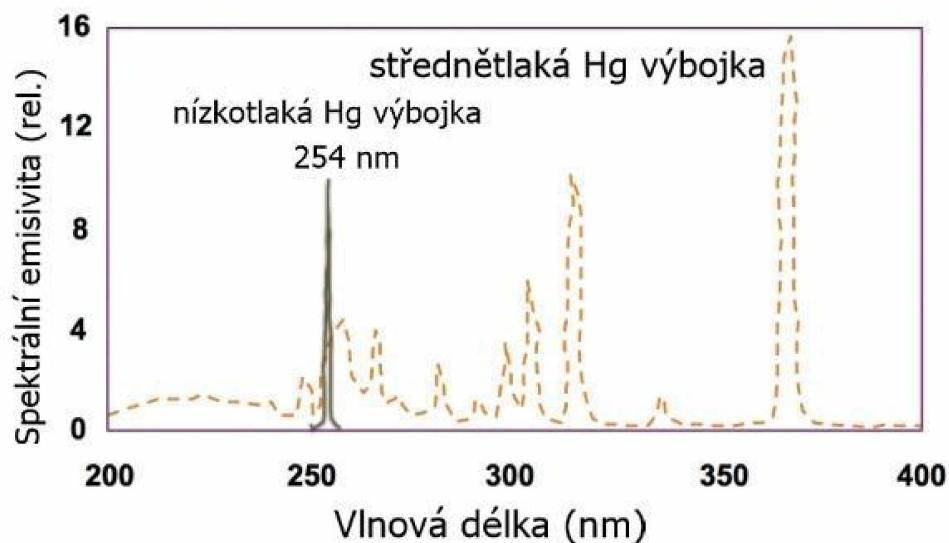
1.1.1 Rtuťová výbojka

Rtuťová výbojka je nejstarším a nejčastějším zdrojem UV záření pro fotokatalytické štěpení. Hlavním médiem výbojky je rtuť o různých tlacích. Vysokotlaké rtuťové výbojky s tlakem 10 MPa uvolňují záření o vlnové délce 200–1000 nm a proto jsou používány jako veřejné osvětlení. Jejich konstrukce je patrná z Obr. 3, upraveno z [8].



Obrázek 3 – Rtuťová vysokotlaká výbojka, upraveno z [8]

Střednětlaké rtuťové výbojky s tlakem par 1 MPa uvolňují záření o vlnové délce 300–580 nm a jsou používány jako běžné osvětlovací zdroje. [8]



Obrázek 4 – Spektrum střednětlaké a nízkotlaké Hg výbojky, upraveno z [9]

Nízkotlaké rtuťové výbojky s tlakem par 0,1 Pa uvolňují záření o vlnové délce 180–254 nm, jak je vidět na Obr. 4. Právě tyto výbojky mají vhodnou vlnovou délku záření, která je potřebná pro čištění pomocí UV záření. [8, 9]

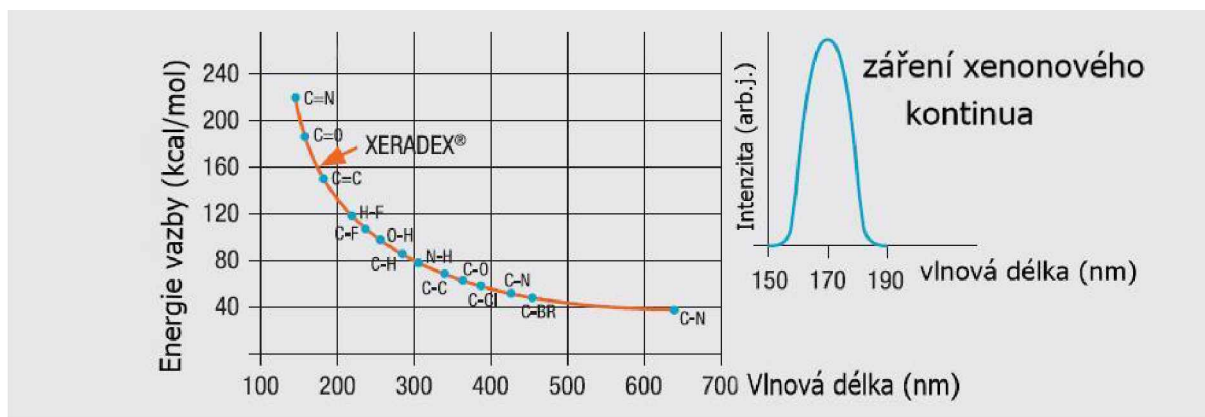
1.1.2 Xenonová oblouková výbojka

Xenonová výbojka obsahuje xenon pod vysokým tlakem 1–3 MPa. V plášti jsou obsaženy dvě elektrody z wolframu a právě mezi těmito elektrodami vzniká výboj, jak je vidět na Obr. 5. [10]



Obrázek 5 – Xenonová výbojka - vpravo schéma, vlevo reálné vyhotovení výbojek[10]

Xenonové výbojky se uplatňují např. jako inkohorentní zářiče VUV záření jako jsou lampy XENAREX. U těchto xenonových lamp je využíváno vyzářené vlnové délky 172 nm spadající do vakuové oblasti UV záření, jak je vidět na Obr. 6, upraveno z [10].



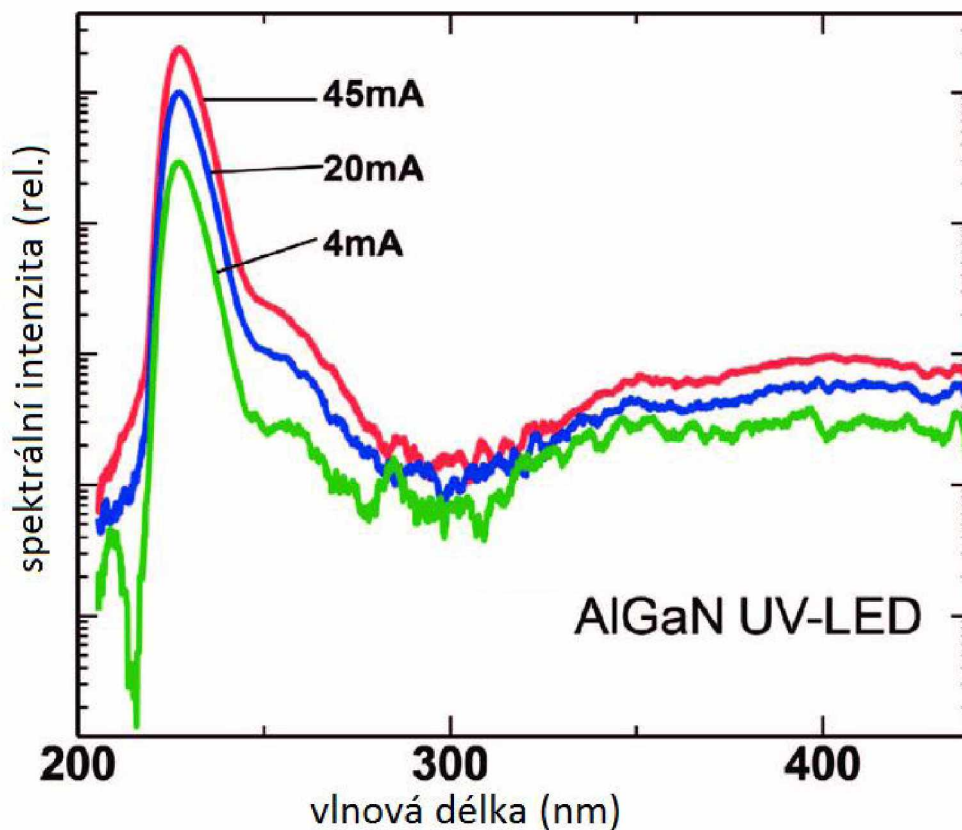
Obrázek 6 – Závislost energie vazeb na vlnové délce a intenzita záření xenonové výbojky, upraveno z [10]

Svým výkonem tyto lampy předčí všechny klasické UVC výbojky, protože je jejich účinnost až 40 %. Záření ve vakuové oblasti takovéto zářiče předurčuje pro totální sterilizační procesy, pro výrobu polovodičů, LCD a výrobu ozónu např. pro sterilizační a environmentální aplikace. V průmyslu se pak tyto zdroje používají především při leptání plastů, matování laků, odstraňování fotolaků apod. [10–12]

1.1.3 Led zdroje UV

UV LED (UV light emitting diode) zdroje jsou optometrická zařízení generující záření, které vzniká pomocí průchodu elektrického proudu přes spojení PN polovodiče. Barva a vlnová délka emitovaného záření se odvíjí od použitého materiálu diody, viz tabulka 2 uvádějící vliv skladby polovodičového materiálu na vlnovou délku a energii emitovaných fotonů. Díky velkému množství různých materiálů vhodných pro tvorbu těchto diod lze generovat široké spektrum vlnových délek viditelného světla od 450–1700 nm. Za vynález účinných diod emitujících modré světlo, které je úsporným zdrojem bílého světla, byla v roce 2014 udělena Nobelova cena za fyziku. Tyto LED zdroje jsou založeny na bázi nitridu india a gália (InGaN). Díky jejich vysoké účinnosti a vysoké kvalitě se tyto zdroje začaly využívat ve velkém množství jako náhrada stávajících žárovek. Další výhodou těchto diod je snížení emise vznikajících plynů.

Pro UV oblast se využívají LED založené na AlGaN, kdy je emitovaná vlnová délka 210–400 nm. Intenzitu tohoto záření lze dále ovlivňovat přiváděným proudem, jak je vidět na Obr. 7, upraveno z [14]. UV-LED zdroje potřebují nižší energii, jsou méně křehké, lehčí a mají vyšší energetický výkon než jiné výbojky. [13]



Obrázek 7 – Spektrum UV-LED výbojek AlGaN při různých proudech, upraveno z [14]

Tabulka 2: Vliv skladby polovodičového materiálu na vlnovou délku a energii emitovaných fotonů u LED zdrojů UV-VIS záření

Polovodičový materiál	Barva záření	Vlnová délka emitovaných fotonů (eV)	Energie emitovaných fotonů (eV)
GaAs			
AlGaAs	infračervená	>770	<1,99
AlGaAs			
GaAsP			
AlGaInP	červená	622–770	1,61–1,99
GaP			
GaAsP			
AlGaInP	oranžová	597–622	1,99–2,08
GaP			
GaAsP	žlutá	577–597	2,08–2,15
AlGaInP			
InGaN		455–492	2,15–2,52
ZnSe	modrá		
InGaN	fialová	390–227	2,73–3,18
diamant		235	
AlGaN		390–227	
BN	ultrafialová	215	3,18–6,2
AlGaInN		390–210	
AlN		210	

1.2 Vlnová délka UV záření a reakce s chemickou vazbou

Podle Planckovy kvantové hypotézy se záření, které je emitované a pohlcované jednotlivými atomy zahřátého tělesa, šíří v tzv. kvantech nebo fotonech. Množství této energie je dáno Planckovou rovnicí, ze které je patrné, že je tato energie přímo úměrná jeho frekvenci a Planckově konstantě $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s, jak vyplývá z rovnice (2). [15]

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot c \cdot \tilde{\nu} \quad (2)$$

Kde: c je rychlost světla = $3 \cdot 10^8$ m/s; λ je vlnová délka (nm) a $\tilde{\nu}$ je vlnové číslo

Interakcí fotonu a molekuly může dojít k absorpci tohoto fotonu a k následnému vytvoření excitovaného stavu (označován *). Tato excitační energie je uváděna v kJ nebo v kcal na jednotku einstein, který reprezentuje 1 mol N_A fotonu o stejné vlnové délce. Pomocí upravené Planckovy rovnice je možné vypočítat tuto energii pomocí vlnové délky elektromagnetického záření λ podle rovnice (3):

$$E = N_A \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{0,1197}{\lambda} \quad (3)$$

Z předcházející rovnice je patrná závislost rostoucí energie elektromagnetického záření na klesající vlnové délce, jak ilustruje i tabulka 3. Tato tabulka současně uvádí i rozdělení UV oblasti elektromagnetického spektra záření podle oblasti vlnové délky, odpovídající vlnové délce a energie.

Tabulka 3: Rozdělení UV oblastí podle energie a vlnové délky UV

Oblast	λ	ν	$\tilde{\nu}$	E		
	[10^{-9} m]	[s^{-1}]	[10^2 m $^{-1}$]	[kcal/mol]	[kJ/mol]	[eV]
UVC	200	$1,5 \cdot 10^{15}$	50 000	143,0	597,7	6,2
UVC	250	$1,2 \cdot 10^{15}$	40 000	114,4	478,2	5,0
UVB	300	10^{15}	33 333	95,4	398,4	4,1
UVA	350	$8,7 \cdot 10^{14}$	28 571	81,7	341,5	3,5

Vazby většiny organických sloučenin mají disociační energii v oblasti hodnot 167–565 kJ/mol. Teoreticky by všechny tyto kovalentní vazby bylo možné termicky štěpit pomocí krátkovlnných UV zdrojů záření. Ale tato reakce se není možná bez samotné světelné absorpce záření a vzniku excitovaného stavu. Nejběžnějšími vazbami v organických

sloučeninách štěpenými pomocí UV zdroje jsou vazby C-C_{arom.} v kondenzovaných aromatických kruzích (540 kJ/mol) a dále pak vazby C-Cl (327 kJ/mol), C=S (628 kJ/mol). A právě štěpení těchto vazeb a zároveň i tvorba účinného OH[•] z H₂O₂ je možná v případě použití VUV-UVC zdroje vlnových délek 170–254 nm, kde se energie záření pohybuje v hodnotách 704–471 kJ/mol.

Při ozáření molekuly organické sloučeniny UV zářením dochází k absorpci záření a následné excitaci energetického stavu na C^{*}. Teprve molekula v takto excitovaném stavu může dále reagovat s přítomným O₂ za vzniku superoxidových radikálů. Anebo je možná homolýza vazeb R-X a následná reakce s O₂ za vzniku peroxylových radikálů. Samostatná homolýza C-X vazeb u halogen sloučenin pouze pomocí nízkotlakých UV-C lamp je málo účinná, a proto dochází ke kombinaci s různými činidly jako je O₃ či H₂O₂. Použití záření UV-A či UV-B pro odstranění sloučenin s C-X vazbou je nevhodné kvůli jejich nízkým hodnotám záření. [16]

Reakce organických sloučenin probíhá jako fotochemická reakce v prostředí inertního rozpouštědla. Fotoaktivní molekuly organické sloučeniny se tak v nízkých koncentracích nacházejí v tzv. kleci rozpouštědla, kde nejdříve dochází k disociaci vazeb a následně k tzv. rekombinaci radikálových párů s antiparalelními spiny za vzniku σ-vazby, to je znázorněno v rovnici (4).



V případě čištění odpadních vod je rozpouštědlem voda. Ta jako polární rozpouštědlo ovlivňuje vlnovou délku záření, kterou propouští. Propustnost (transmitance) ozařované vody %T₁₀₀ je charakteristická veličina vztažená na 100 mm vrstvu H₂O, její měření se provádí spektrálním fotometrem nebo v průtokovém analyzátoru. Dále má vliv solvatace v rozpouštědle, která ovlivňuje rozložení energetických hladin základního a excitovaného stavu.

2. PROCESY ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD VYUŽÍVAJÍCÍ UV ZÁŘENÍ

Cílem čištění odpadních vod je dosáhnout požadované kvality vody pro konkrétní použití. V průmyslových podnicích jsou totiž rozdílné požadavky na kvalitu než například u pitné vody.

K čištění odpadních vod se využívá mechanických a chemických procesů. V posledních letech se z ekologických důvodů přechází na procesy, které chemické látky využívají minimálně nebo pokud možno vůbec. Podstatnou změnou ve využití těchto procesů je zejména to, že při čištění bez chemických látek nevznikají takové vedlejší produkty, které by mohly způsobovat komplikace při dalším využití čištěné vody. Jako alternativa chemických látek lze pro čištění využít UV záření.

Předchůdcem čištění využívajícímu UV jsou různé biologicko-fyzikálně chemické procesy, které jsou sice účinné, ale finančně neefektivní. Například adsorpce na pevný nosič jako aktivní uhlí je sice proces nedestruktivní, ale tímto způsobem se odpad pouze přesouvá na nosič, který je pak nutné určitým způsobem regenerovat. A právě tato regenerace je cenově nevýhodná.

V 19. století objevil vědec Johann Wilhelm Ritter důkaz o novém typu neviditelného záření. Tímto bylo UV záření, kterému se svého největšího využití dostalo až o 200 let poté a to zejména v podobě polovodičových LED zařízení a laserů využívaných ke sterilizaci, biosensingu a zejména k využití UV světelných zdrojů k neutralizaci patogenních mikroorganismů a odstranění chemických znečištění ze vzduchu a vody.

UV LED lampy se staly alternativním zdrojem UV záření, který nahradil stávající rtuťové lampy a to díky efektivnějšímu štěpení a mineralizaci různých organických látek [17]. Dále se toto zařízení využívá k pseudomorfnímu růstu různých substrátů (vylepšení jejich vlastností – méně defektní, vyšší hustota a velikost vzniklých struktur) [18].

Velkou skupinou procesů využívající UV záření jsou pokročilé oxidační procesy s označením AOPs (advance oxidation processes). Tyto procesy se také mohou označovat jako procesy *in situ* neboli chemická oxidace prováděná přímo v místě znečištění. Základním principem těchto procesů je tvorba hydroxylového radikálu, který se uvolňuje pomocí UV záření z příslušné chemické sloučeniny daného procesu. Takto vzniklý hydroxylový radikál je vysoce reaktivní, jeho rychlostní konstanta druhého řádu nabývá hodnot 10^6 – 10^9 l/mol·s.

Hydroxylový radikál má v případě AOPs nízkou selektivitu a okamžitě napadá organickou molekulu a odebírá z ní hydrogenový atom. Z organické molekuly se pak stává radikál, který dále reaguje. Reakcí s O₂ pak tento radikál produkuje peroxylové radikály, které spolu dále reagují a tvoří peroxidy a superoxidový radikál (O₂^{·-}), tyto reakce jsou vidět v rovnicích (5–8).



AOP procesy probíhají při normální teplotě a tlaku a tím dochází k energetické úspoře. Díky velkému množství různých chemických činidel, ze kterých je možné generovat potřebný hydroxylový radikál, mají tyto procesy potřebnou variabilitu při řešení různých ekologických problémů. Tyto činidla a jejich systémové reakce jsou popsány v tabulce 4. Účinnost tohoto druhu oxidace je závislá na faktorech: síla oxidačního činidla generující hydroxylový radikál, pH, teplota a míra znečištění v čištěné vodě. [16, 19]

Tabulka 4: Procesy AOP využívající UV a jejich systémové reakce

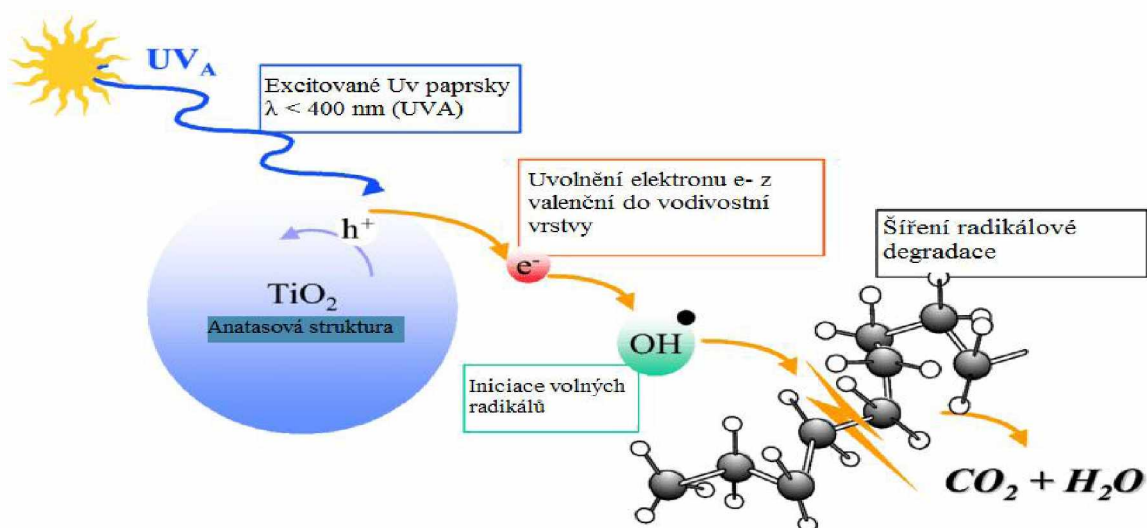
Foto-Fentonova oxidace	Reakce systému
H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ /UV	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \text{OH}\cdot$ $\text{Fe}(\text{OH})^{2+} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{OH}\cdot$
H ₂ O ₂ /Fe ³⁺ /UV	$\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}^+ + \text{OH}_2\cdot$
H ₂ O ₂ /[Fe ^{III} (C ₂ O ₄) ₃] ³⁻ /UV	$[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-} + h\nu \rightarrow [\text{Fe}^{\text{II}}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]^{2-} + \text{C}_2\text{O}_4\cdot^-$ $\text{C}_2\text{O}_4\cdot^- + [\text{Fe}^{\text{III}}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-} \rightarrow [\text{Fe}^{\text{II}}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]^{2-} + \text{C}_2\text{O}_4^{2-} + 2\text{CO}_2$ $\text{C}_2\text{O}_4\cdot^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2\cdot^- + 2\text{CO}_2$
Fotokatalytická oxidace	
TiO ₂ /UV/O ₂	$\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow \text{e}^- + \text{TiO}_2(h^+)$ $\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2\cdot^-$ $2\text{O}_2\cdot^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{OH}\cdot + \text{OH}^- + \text{O}_2$ $\text{TiO}_2(h^+) + \text{OH}^- \rightarrow \text{TiO}_2 + \text{OH}\cdot$ $\text{TiO}_2(h^+) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2 + \text{OH}\cdot + \text{H}^+$
TiO ₂ /UV/H ₂ O ₂	$\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow \text{e}^- + \text{TiO}_2(h^+)$ $\text{TiO}_2(h^+) + \text{OH}^- \rightarrow \text{TiO}_2 + \text{OH}\cdot$ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{OH}^-$
TiO ₂ /UV/S ₂ O ₈	$\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow \text{e}^- + \text{TiO}_2(h^+)$ $\text{TiO}_2(h^+) + \text{OH}^- \rightarrow \text{TiO}_2 + \text{OH}\cdot$ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + \text{e}^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{SO}_4\cdot^{2-}$
Fotolýza	
H ₂ O ₂ /UV-C	$\text{H}_2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{OH}\cdot$ $2\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{OH}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2\cdot$ $2\text{HO}_2\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$
Ozon	
O ₃ /UV	$\text{O}_3 + h\nu(\lambda < 310\text{nm}) \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}({}^1\text{D})$ $\text{O}({}^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{OH}\cdot$
O ₃ /H ₂ O ₂ /UV	$\text{H}_2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{HO}_2^- + \text{H}^+$ $\text{HO}_2^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{HO}_2\cdot + \text{O}_3\cdot^-$ $\text{HO}_2\cdot \rightarrow \text{O}_2\cdot^- + \text{H}^+$ $\text{O}_2\cdot^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_3\cdot^- + \text{O}_2$ $\text{O}_3\cdot^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{HO}_3\cdot$ $\text{HO}_3\cdot \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{O}_2 \quad \text{OH}\cdot + \text{O}_3 \rightarrow \text{HO}_2\cdot + \text{O}_2$

2.1. Foto-Fentonová oxidace

Foto-Fentonová oxidace využívá k tvorbě hydroxylového radikálu kromě katalyzujícího Fe^{2+} iontu rovněž schopnost UV záření radikálově štěpit molekulu peroxidu vodíku. Mezi systémy foto-Fentonové oxidace patří např. $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{UV}$, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{3+}/\text{UV}$ a $\text{H}_2\text{O}_2/[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}/\text{UV}$, jejichž systémové reakce jsou znázorněny v tabulce 4. Rozdíl mezi těmito systémy je ve vlnové délce použitého UV záření. U systému $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ je vhodnou vlnovou délkou záření cca do 400 nm, u systému $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{3+}$ je to vlnová délka do 550 nm. [16]

2.2. Fotokatalytická oxidace

Fotokatalytická oxidace systému TiO_2/UV probíhá nejlépe při vlnových délkách 250–400 nm. Touto oxidací probíhající na povrchu polovodiče (TiO_2) vznikají spolu s hydroxylovým radikálem i ionty superoxidů, které jsou velice reaktivní a reagují s velkým množstvím sloučenin. Vlastní vznik těchto radikálů na povrchu polovodiče probíhá tak, že po absorpci záření dochází k překročení energetické bariéry zakázaného pásu a tím k přechodu elektronů z valenční vrstvy do vodivostní. Uvolněním elektronů dochází ke vzniku děr s kladným nábojem ve valenční vrstvě a ty dále reagují s přítomnou H_2O za produkce H^+ a OH^\bullet , tento mechanismus je zobrazen na Obr. 8, upraveno z [20]. Dále mohou uvolněné elektrony z vodivostní vrstvy redukovat přítomný kyslík na superoxidový radikál O_2^\bullet . Reakce jednotlivých systémů fotokatalytické oxidace jsou znázorněny v tabulce 4. [16,21]



Obrázek 8 – Průběh čištění pomocí TiO_2 , upraveno z [20]

TiO₂ se jako fotokatalyzátor používá nejčastěji. Jeho vlastnost redukovat látky, díky páru elektron-díra vzniklého vlivem UV záření, je pro čištění nejpodstatnější. Časté používání je nejen díky jeho nenákladnosti, ale také jeho stabilitě v biologických a chemických prostředích a stabilitě vůči fotokorozi. Podobné vlastnosti má například i ZnO, ale mezi jeho hlavní nevýhody patří jeho nestabilita při nízkých pH. [22]

2.3. Fotolýza

Fotolýza systému H₂O₂/UVC neboli fotoindukovaná degradace H₂O₂ probíhá při vlnové délce UV 254 nm. Takto vzniklý hydroxylový radikál reaguje s další molekulou H₂O₂ za vzniku superoxidového radikálu HO₂[•], který se pak rozkládá na kyslík a vodu. Tato metoda je velice účinná při vyšších koncentracích H₂O₂ cca 0,1%. [16]

2.4. Ozon

Ozon jen velice silné oxidační činidlo a pro dezinfekci vody se používal již dříve před zavedením chlorace vody. Přímá oxidace tímto činidlem je selektivní a preferuje reakce s ionizovanou a disociovanou formou oproti neutrální formě sloučeniny. Spojením s UV zářením a tím vznikem hydroxylového radikálu se tato oxidace stává účinnější. V případě systému O₃/UV dochází ke vzniku hydroxylového radikálu z přítomné vody. U systému O₃/H₂O₂/UV je zdrojem hydroxylového radikálu přítomný peroxid. [19]

2.5. Příklady aplikací procesů čištění odpadních vod využívajících UV záření

Práce studující využití fotokatalytických procesů pro odstraňování škodlivých látek jako alternativní metody pro čištění odpadních vod pocházejí již z druhé poloviny 20. století, ale k jejich přímému využívání společně se slunečním zářením došlo až později. První technologie založené na fotokatalýze byly v USA realizovány pro čištění důlních vod. Následovaly technologie zaměřené na čištění průmyslových vod, které byly realizovány ve Španělsku. Na základě poznatků z těchto technologií byl vyvinut dvouplášťový reaktor pro biologické předčištění průmyslových odpadních vod firmy Volkswagen v Německu. Dále se i další firmy a společnosti začaly zajímat o využívání slunečního záření pro čištění jejich odpadních vod. [23]

Ve Španělsku na základě předloženého projektu společností ALBAIDA a CIEMAT vznikla technologie pro čištění vody po recyklaci lahví od pesticidních prostředků. Technologie byla založena na foto-Fentonové oxidaci, při níž dochází k mineralizaci 80 % celkového organického uhlíku (TOC) z vody. V současnosti je tato technologie stále využívána. Využití metod AOP při odstraňování pesticidů z odpadních vod se vyrovná metodám využívající granulované aktivní uhlí.

Později došlo ke zkombinování foto-Fentonové oxidace s aerobními biologickými procesy pro odstraňování TOC a biologicky nerozložitelných sloučenin jako je α -fenylmethylglycin. Při této kombinaci došlo k 95% mineralizaci skládající se z 50 % TOC odstraněného foto-fentonovou oxidací a dále 45 % TOC bylo odstraněno aerobním procesem.

Technologie AOP napomáhají k řešení problému s narůstajícím množstvím endokrinních disruptorů (ED), které ohrožují životní prostředí. Tyto látky v organismu mají schopnost blokovat receptory a zabránit tak normálním reakcím těla. Mezi tyto látky patří pesticidy, plasty, rozpouštědla, změkčovadla a farmaceutické prostředky. Příkladem AOP procesu používaného pro čištění odpadních vod z farmaceutických zařízení je fotokatalytická oxidace s TiO_2 , konkrétně pro látku ethinylestradiol.

Metody AOP využívající sluneční záření pro dezinfekci vody dávají velkou možnost pro úpravu pitné vody v oblastech, kde nemají přístup k jiným dražším a náročnějším alternativám čištění. Využívá se tak nejjednoduššího uplatnění těchto metod v podobě nádrže vystavené slunečnímu záření za přítomnosti TiO_2 . To napomáhá k odstranění velkého množství škodlivých látek a patogenních mikroorganismů z vody. [23]

Dalším možným využitím fotokatalytické oxidace pomocí TiO_2 je souběžné odstraňování těžkých kovů a organických látek znečišťujících vodu. Aplikováním této metody bylo zjištěno, že je efektivnější souběžné odstraňování než separované. Ovlivnitelnost procesu byla prezentována na redukci Cr^{+VI} na Cr^{+III} v přítomnosti huminových kyselin. Větší dávkou fotokatalyzátoru TiO_2 bylo dosaženo jak zvýšení redukce tak odstranění kyselin a větším obsahem kyselin bylo dosaženo vyššího účinku redukce. Zbytkové množství huminových kyselin bylo odstraněno pomocí adsorpce. Byla vyzkoušena i varianta se zvýšeným pH vody, které sice podpořilo odstranění kyselin, ale redukce Cr byla snížena. [24]

Souběžné odstraňování těžkých kovů spolu s organickými sloučeninami se stalo velice populárním. Mezi tyto organické sloučeniny patří mimo jiné pesticidy, barviva, fenoly a léčiva.

Fotokatalytická oxidace je velice často využívána pro souběžné odstraňování různých látek. A protože mají odstraňované látky různé vlastnosti, začalo se uvažovat o dopování nebo jiné úpravě a vylepšení fotokatalyzátoru. Mezi tyto úpravy, které zlepšují vlastnosti TiO_2 , patří dopování různými látkami (N_2 , F, Au, nanočástice), vytvoření kompozitu s popílkem a další. [24]

Průmyslové odpadní vody s vysokým pH, solemi a reaktivními barvivy ohrožujícími životní prostředí jsou komplikací textilního průmyslu. AOP procesy využívající jako činidlo O_3 byly vyzkoušeny při čištění odpadních vod spojených s textilním průmyslem. Konkrétně se tyto metody osvědčily pro předčištění vod obsahující barvivo Reactive Black 5 (RB5) a jeho průmyslovou formu Setzol Black DPT, kde bylo dosaženo téměř úplné redukce těchto barviv. Pro odstranění barviv byla použita i metoda využívající H_2O_2 , ale ta nebyla tak efektivní a účinná jako O_3/UV . Pomocí O_3/UV i $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ bylo dosaženo u tohoto čištění snížení toxicity a zvýšení biologické rozložitelnosti v následujícím biologickém čištění. Mimo jiné dochází těmito metodami i k mineralizaci. [25,26]

ZÁVĚR

Zpracovávání znečištěných odpadních vod a odstranění veškerých nebezpečných látek, které způsobují různorodé komplikace v životním prostředí, je v dnešní průmyslové době velmi rozšířeným tématem. Vlivem lidské činnosti se do koloběhu vody dostává řada znečišťujících látek. S některými si dokážou poradit čistírny odpadních vody nebo vodní mikroorganismy. Jiné se však ve vodě nerozkládají a dostávají se do těl rostlin i živočichů. Narušují tak rovnováhu ekosystému a potravním řetězcem mohou proniknout zpět k lidem. S rostoucím počtem obyvatel planety a se zvyšující se dostupností spotřebních výrobků chemického, farmaceutického a kosmetického průmyslu dochází k přibývání počtu různých látek, které ve vodě zůstávají i po vyčištění. Takovéto látky jsou vedeny pod souhrnným názvem PPCPs (léčiva a přípravky osobní hygieny – pharmaceuticals and personal care products) a patří mezi ně všechny účinné složky léků a drogistického zboží. Jedná se většinou o umělé, přírodě cizí látky (některá xenobiotika), jejichž odbourávání je problematické. Nalezneme je v běžně používaných čistících prostředcích, produktech osobní hygieny a samozřejmě v lécích. Tyto biologicky aktivní látky nadále působí i poté, co se dostanou do odpadních vod a následně i do koloběhu vody, kde mohou i v nepatrném množství napáchat velké škody. Další nepředvídatelné účinky mohou vznikat jejich synergickým působením nebo jejich dlouhodobou akumulací v prostředí. I když jsou výzkumy vlivu pronikání těchto látek do koloběhu vody teprve na svém počátku, jsou výsledky prvních dostupných studií znepokojivé. To, společně s potřebou získávat dostatečné množství kvalitní vody vyhovující průmyslu, zemědělství a v největším množství spotřebě obyvatelstva, vede k úsilí vyvíjet nové metody čištění a dezinfekce odpadních vod.

Cílem je získat metody schopné odstraňovat široké množství látek a snížit náklady na čištění těchto vod. Nové inovativní metody jsou zkoumány a porovnávány se stávajícími technologiemi využívanými pro čištění odpadních vod. AOPs se staly jedním z nových zkoumaných metod hlavně díky využívání alternativního zdroje, čímž je sluneční záření. Další výhodou těchto metod je, že do čištěné vody nejsou zanášeny žádné vedlejší látky či nečistoty, které by způsobovaly další komplikace. Díky nízkým nákladům potřebných na instalaci a průběh procesu čištění jsou tyto metody možností pro oblasti s nedostatkem pitné vody.

Uvedené AOPs byly porovnány s ostatními metodami používanými v čistírnách odpadních vod. Z porovnání jednotlivých metod vyplývá, že AOPs mají shodné výsledky jako používané metody a jejich velkou výhodou jsou levnější náklady na počáteční investici.

Nejčastěji využívanou metodou je fotokatalytická oxidace s TiO_2 a to hlavně díky jeho vlastnosti redukovat látky díky páru elektron-díra vznikajícího UV ozářením a jeho stabilitě v různých prostředích.

Při použití těchto metod je důležité zohlednit složení čištěné vody. Mezi faktory ovlivňující účinnost čištění patří pH, velikost a struktura katalyzátoru, plocha a povrch fotokatalyzátoru, teplota reakce, počáteční koncentrace znečištěných látek, intenzita záření, doba ozáření a dávka použitého fotokatalyzátoru.

Ze získaných poznatků vyplývá, že AOPs by měly v současných čistírnách využití jako předčišťovací metody, které zvyšují biologickou odbouratelnost látek a mineralizaci čištěné vody. Pokud jde o rozšiřující se trend LED zdrojů pro UV-VIS oblast, tak jejich cena vzhledem k poskytovanému výkonu a objemům čištěných vod ještě neumožňuje jejich masové nasazení. Přesto je velkou výhodou těchto zdrojů spočívající především v nižší spotřebě elektrické energie a možnosti častého spínání zdroje bez významného vlivu na jeho životnost. To umožňuje např. spínání v kaskádách a tím i regulaci jejich výkonu v závislosti na proměnlivém průtoku vody. LED technologie tak dávají fotochemickým čistícím technologiím nové možnosti využití.

Přestože materiály na bázi InGaN, BN, AlGaInN a AlN poskytují záření v ultrafialové oblasti spektra, jehož energie je 3,18–6,2 eV a je dostatečná pro aplikace foto-Fentonové reakce s reakčním systémem $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ či přímou fotolýzu v systému $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UVC}$, tak polovodičová skladba InGaN a ZnSe emitující v modré oblasti spektra je vhodná pro fotokatalytické systémy na bázi anatasového katalyzátoru, jež si vystačí s nižší energií záření a to 2,15–2,52 eV, jak je vidět v tabulce 2. Tato energie je dostačující také pro katalytický systém $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{3+}$, který využívá záření o vlnových délkách do 550 nm.

POUŽITÁ LITERATURA

1. Jaroslav Jásek, Jana Almerová. Historie kanalizace. Pražská vodohospodářská společnost a.s. [online]. [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <http://www.pvs.cz/historie/historie-kanalizace/>
2. Technologie terciárního dočištění pro opětovné využívání odpadních vod: Senát parlamentu ČR [online]. [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://www.senat.cz/xqw/webdav/pssenat/original/92839/77839>
3. AZBAR, N., T. YONAR a K. KESTIOGLU. Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. Chemosphere. 2004, **55**(1), 35-43. ISSN 00456535. Dostupné z: [doi:10.1016/j.chemosphere.2003.10.046](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.046)
4. Poškození UV zářením: Ultrafialové záření. Johnson and Johnson Vision Care [online]. c2018 [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://www.jnjvisioncare.cz/vzdelavani/rychle-uceni-podle-tematu/uv-poskozeni>
5. VESELÁ, Martina. Aplikace UV záření pro dezinfekci vyčištěných odpadních vod. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada hornicko-geologická [online]. 2005, **51**(1), 83-88 [cit. 2021-02-04]. ISSN 0474-8476. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/31578>
6. Hygienická problematika ultrafialového záření: Časopis světlo. Světlo [online]. 2000, 2000(03) [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/hygienicka-problematika-ultrafialoveho-zareni--16971>
7. Použití UV záření pro dezinfekci pitné vody: TZB-info [online]. 25.3.2013 [cit. 2021-01-31]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/9697-pouziti-uv-zareni-pro-dezinfekci-pitne-vody>
8. Světelné zdroje – vysokotlaké rtuťové výbojky, směšové výbojky: Časopis světlo. Světlo [online]. 2008, 2008(06), 56-58 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdroje-vysokotlake-rtutove-vybojky-smesove-vybojky--15927>

9. Spectral emittance of low-pressure mercury UV lamp. In: Lux review [online]. London: lightspace, 2017 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.luxreview.com/2017/09/19/how-effective-are-uv-c-leds/>
10. UV - lampy, vytvrzování, dezinfekce...: Xenonové výbojky [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <http://uv-vybojky.cz/xenon/>
11. Encyklopedie laboratorní medicíny pro klinickou praxi 2015: Zdroje UV a viditelného záření [online]. 18.10.2004 [cit. 2021-01-31]. Dostupné z: <http://www.demo4.smitka.eu/encyklopedie/A/JVAFF.htm>
12. DIFFEY, Brian L. Sources and measurement of ultraviolet radiation. Methods [online]. 2002, **28**(1), 4-13 [cit. 2021-01-31]. ISSN 10462023. Dostupné z: [doi:10.1016/S1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00204-9)
13. HINDS, Laura M., Colm P. O'DONNELL, Mahbub AKHTER a Brijesh K. TIWARI. Principles and mechanisms of ultraviolet light emitting diode technology for food industry applications. Innovative Food Science & Emerging Technologies [online]. 2019, 2019(56), 1-9 [cit. 2021-4-24]. ISSN 14668564. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ifset.2019.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.04.006)
14. Recent Progress in AlGaN Deep-UV LEDs - Scientific Figure on ResearchGate. Researchgate [online]. c2008-2021 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/EL-spectra-on-a-log-scale-of-a-227-nm-AlGaN-DUV-LED-for-various-injection-currents_fig6_327781719
15. Energy of photon: PVEducation. Pveducation [online]. Sydney: Honsberg, 2019 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/energy-of-photon>
16. Dušek, L.. Čištění odpadních vod chemickou oxidací hydroxylovými radikály Chemické listy, 2010, **104**, 846-854 [cit. 2021-01-31]. ISSN 0009-2770
17. MATAFONOVA, Galina a Valeriy BATOEV. Recent advances in application of UV light-emitting diodes for degrading organic pollutants in water through advanced oxidation processes: A review. Water Research [online]. 2018, **132**, 177-189 [cit. 2021-01-31]. ISSN 00431354. Dostupné z: [doi:10.1016/j.watres.2017.12.079](https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.079)
18. PILE, David. Ultraviolet goes solid-state. Nature Photonics [online]. 2011, **5**(7), 394-395 [cit. 2021-01-30]. ISSN 1749-4885. Dostupné z: [doi:10.1038/nphoton.2011.136](https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.136)

19. DENG, Yang a Renzun ZHAO. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports* [online]. 2015, **1**(3), 167-176 [cit. 2021-02-04]. ISSN 2198-6592. Dostupné z: doi:10.1007/s40726-015-0015-z
20. Schematic of photocatalytic oxidation of an organic compound: Figure 1 - Photocatalytic oxidation on TiO₂ of methane from exhaust air of animal houses and liquid manure storages = Fotokatalytische oxidatie op TiO₂ van methaan uit stallen en drijfmestopslagen [online]. [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-photocatalytic-oxidation-of-an-organic-compound-Source-Saint-Gobain-Isover_fig1_40796150
21. LINSEBIGLER, Amy L., Guangquan LU a John T. YATES. Photocatalysis on TiO₂ Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Reviews* [online]. 1995, **95**(3), 735-758 [cit. 2021-02-04]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/cr00035a013
22. JO, Wan-Kuen a Rajesh J. TAYADE. Recent developments in photocatalytic dye degradation upon irradiation with energy-efficient light emitting diodes. *Chinese Journal of Catalysis* [online]. 2014, **35**(11), 1781-1792 [cit. 2021-02-04]. ISSN 18722067. Dostupné z: doi:10.1016/S1872-2067(14)60205-9
23. COMNINELLIS, Christos, Agnieszka KAPALKA, Sixto MALATO, Simon A PARSONS, Ioannis POULIOS a Dionissios MANTZAVINOS. Advanced oxidation processes for water treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* [online]. 2008, **83**(6), 769-776 [cit. 2021-4-26]. ISSN 02682575. Dostupné z: doi:10.1002/jctb.1873
24. AJIBOYE, Timothy O., Opeyemi A. OYEWO a Damian C. ONWUDIWE. Simultaneous removal of organics and heavy metals from industrial wastewater: A review. *Chemosphere* [online]. 2021, 2021(262), 1-20 [cit. 2021-4-26]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128379
25. BILIŃSKA, Lucyna, Marta GMUREK a Stanisław LEDAKOWICZ. Comparison between industrial and simulated textile wastewater treatment by AOPs – Biodegradability, toxicity and cost assessment. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2016, **306**, 550-559 [cit. 2021-4-26]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2016.07.100
26. TSYDENOVA, Oyuna, Valeriy BATOEV a Agniya BATOEVA. Solar-Enhanced Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Simultaneous Removal of Pathogens and Chemical Pollutants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*

[online]. 2015, 12(8), 9542-9561 [cit. 2021-4-26]. ISSN 1660-4601. Dostupné z:
doi:10.3390/ijerph120809542