

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Sudakova Daria

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická

Faktory ovlivňující účinnost fotokatalýzy  
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Daria Sudakova**  
Osobní číslo: **C18418**  
Studijní program: **B2807 Chemické a procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Ochrana životního prostředí**  
Téma práce: **Faktory ovlivňující účinnost fotokatalýzy**  
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

### Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši zaměřenou na fotokatalýzu a faktory, které ji ovlivňují. Zaměřte se hlavně na publikace za posledních 5 let.
2. Získané poznatky vyhodnoťte, důraz kladte na ty faktory, které ovlivňují fotokatalýzu nejvýznamněji. Uveďte také, jaké jsou praktické možnosti využití fotokatalýzy a kde se fotokatalýza již prakticky využívá.
3. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 7/2019 „Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací“ v platném znění.

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

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Palarčík, Ph.D.**  
Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **25. února 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. července 2021**

L.S.

---

**prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.**  
děkan

---

**prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2021

Prohlašuji:

Práci s názvem „Faktory ovlivňující účinnost fotokatalýzy“ 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

Sudakova Daria

## **PODĚKOVÁNÍ**

Zde bych chtěla poděkovat panu Ing. Jiřímu Palarčíkovi, Ph.D., za odborné vedení, pomoc a vstřícnost při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za věcné nápady a názory při psaní této bakalářské práce.

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce je literární rešerší na téma faktory ovlivňující účinnost fotokatalýzy. Je zde uvedeno využití fotokatalytické degradace za přítomnosti oxidu titaničitého jako katalyzátoru pro odstraňování znečišťujících látek. Jsou popsány hlavní faktory ovlivňující průběh a účinnost fotokatalytické degradace, dále jsou v práci uvedeny způsoby použití fotokatalýzy v praxi.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotokatalýza; oxid titaničitý; fotokatalytická degradace; organické polutanty

## **TITLE**

Factors affecting the photocatalytysis

## **ANNOTATION**

This bachelor thesis is a literary research on factors affecting the photocatalytysis. The paper summarizes the use of photocatalytic degradation in the presence of titanium dioxide as a catalyst for the removal of contaminants. Here described main factors that affect on progress and efficiency of photocatalytic degradation, and some methods used photocatalysis in practice.

## **KEYWORDS**

Photocatalysis; titanium oxide; photocatalytic degradation, organic pollutants

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 FOTOKATALÝZA</b> .....	<b>11</b>
1.1 Mechanismy heterogenní fotokatalytické reakce .....	11
1.2 Fotokatalytická degradace za přítomnosti TiO <sub>2</sub> .....	12
<b>2 KINETIKA FOTOKATALYTICKÉ REAKCE</b> .....	<b>14</b>
2.1 Reakční kinetika .....	14
2.1.1 Kinetika 0. řádu .....	14
2.1.2 Kinetika 1. řádu .....	15
2.1.3 Langmuir-Hinshelwoodův kinetický mechanismus .....	15
<b>3 FOTOKATALYZÁTORY</b> .....	<b>17</b>
3.1 Oxid titaničitý .....	17
3.1.1 Rutil a anatas .....	17
3.1.2 Modifikace TiO <sub>2</sub> .....	18
3.1.3 Morfologie TiO <sub>2</sub> .....	19
3.2 Oxid zinečnatý .....	19
3.2.1 Modifikace ZnO .....	20
<b>4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ FOTOKATALYTICKOU DEGRADACI</b> .....	<b>21</b>
4.1 Koncentrace fotokatalyzátoru.....	21
4.2 Koncentrace barviva.....	22
4.3 pH.....	23
4.4 Teplota.....	24
4.5 Intenzita záření .....	26
4.6 Zdroj záření .....	28
4.7 Fotoreaktor .....	30
<b>5 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ FOTOKATALÝZY</b> .....	<b>31</b>
5.1 Environmetální čištění půdy a vody .....	31
5.2 Čištění vzduchu .....	32
5.2.1 Oxidy dusíků .....	32
5.2.2 Těkavé organické sloučeniny a další .....	33
5.3 Antimikrobiální aktivita .....	33
5.4 TiO <sub>2</sub> jako fungicidní prostředek .....	34
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>36</b>



## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1	Znázornění principu fotokatalýzy .....	11
Obrázek 2	Struktura rutilu, anatasu a brookitu (Ti–modý, O–červený) .....	18
Obrázek 3	(a-c)nanotyčinky, (d-f)pole nanotyčinek, (g-i)rozvětvené nanotyčinky (j-l)nanorod@nanobowl .....	19
Obrázek 4	Znázornění fotokatalýzy kompozitu Ag/ZnO pod UV zářením .....	20
Obrázek 5	Účinek TiO <sub>2</sub> a ZnO na rychlost degradace kofeinu .....	21
Obrázek 6	Vliv množství katalyzátoru na počáteční rychlost fotokatalytické degradace kofeinu.....	22
Obrázek 7	Odstranění RTB barviva s casem pro různé počáteční koncentrace barviva.....	23
Obrázek 8	Procentní profil odstranění barvy, časový profil pro různé hodnoty pH roztoku	24
Tabulka 1	Vliv pH a teploty na účinnost degradace .....	25
Obrázek 9	Znázornění závislosti relativní koncentrace methylenové modři na čase pro heterogenní fotokatalytickou degradaci (použitý fotokatalyzátor AV01, koncentrace 0,1 g/l) .....	27
Obrázek 10	Znázornění závislosti relativní koncentrace methylenové modři na čase pro heterogenní fotokatalytickou degradaci (použitý fotokatalyzátor P25, koncentrace 0,1 g/l).....	27
Obrázek 11	Absorbance kongo červeň v reakční době bez přítomnosti fotokatalyzátoru ...	28
Obrázek 12	Absorbance kongo červeň v reakční době s přítomnosti fotokatalyzátoru .....	29
Obrázek 13	Srovnání degradace mezi UV lampou a slunečním zářením .....	29
Obrázek 14	Fotokatalytická inaktivace (a) E. coli a (b) S. aureus anatasem, rutilem a 0,5% CuTiO <sub>2</sub> .....	33
Obrázek 15	Fotokatalytická antibakteriální dezinfekční účinnost anatasu, rutilu a 0,5 % Cu-TiO <sub>2</sub> .....	34
Obrázek 16	Dlaždičky: (a) s mikrosféry 10% TiO <sub>2</sub> ; b) bez TiO <sub>2</sub> a (c) s 5% TiO <sub>2</sub> P25, po testu houbami(Monascus ruber) pod viditelným světlem .....	35

## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

OH•	hydroxylový radikál
LED	dioda emitující světlo
UV	ultrafialové záření
RTB	remazol turquoise blue
E <sub>ph</sub>	energie fotonu [eV]
E <sub>vb</sub>	energie valenčního pásu [eV]
E <sub>cb</sub>	energie vodivostního pásu [eV]
E <sub>bg</sub>	energie zakázaného pásu [eV]

## ÚVOD

Historie fotokatalýzy se datuje do roku 1967 kdy se jí začal zabývat chemik Akira Fujishima. Poprvé popsal a zkoumal fotokatalytické účinky oxidu titaničitého a tento jev pojmenoval. Avšak samotná fotoaktivita oxidu titaničitého byla poprvé pozorována již v roce 1929, bylo zjištěno, že se pigmenty  $\text{TiO}_2$  odbarvují vlivem slunečního záření.

V posledním desetiletí byly mechanismy fotokatalytické degradace rozsáhle zkoumány a díky tomu máme dnes důležité informace o tomto účinném způsobu ochrany životního prostředí. V dnešní době je fotokatalýza široce používána v různých oblastech, jakými jsou například degradace znečišťujících látek, čištění odpadních vod nebo vzduchu.

Jeden z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších fotokatalyzátorů je oxid titaničitý. Ten je znám svými vynikajícími fotokatalytickými účinky a je schopen degradovat velké množství znečišťujících látek. Kromě toho je  $\text{TiO}_2$  atraktivní díky nízké ceně, jednoduché výrobě a vysoké stabilitě.

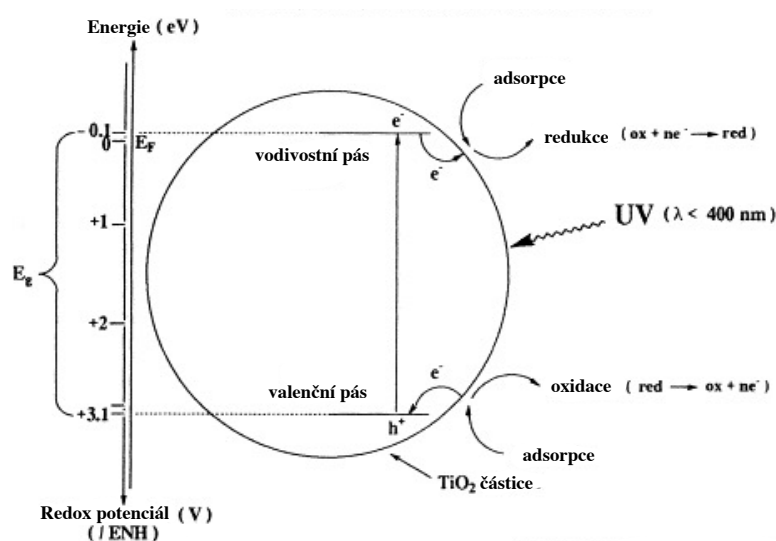
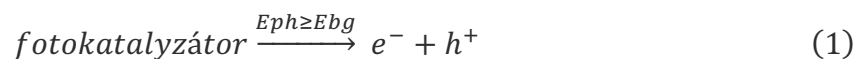
Hlavním cílem této bakalářské práce je popis faktorů, které mají významný vliv na fotokatalytickou degradaci a dále popsat možnosti využití fotokatalýzy v praxi.

# 1 FOTOKATALÝZA

## 1.1 Mechanismy heterogenní fotokatalytické reakce

Fotokatalytické reakce jsou reakce, které probíhají na povrchu některých polovodičů za přítomnosti světla. Princip reakce je založen na vzniku páru elektron – díra. Pro průběh této reakce musí být splněny tři podmínky: přítomnost oxidačního činidla, správná vlnová délka dopadajícího záření a fotoaktivní katalyzátor, například  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ . Volné hydroxylové radikály ( $\text{OH}^\bullet$ ) vznikající při tomto ději patří mezi silná oxidační činidla a oxidují organické látky, čímž dochází k jejich degradaci [1].

Fotokatalytický děj začíná, když foton ( $E_{\text{ph}}$ ), u kterého energie je rovna nebo je větší než energie zakázaného pásu ( $E_{\text{bg}}$ ) dosáhne povrchu katalyzátoru. Energie  $E_{\text{bg}}$  je určena jako rozdíl energií mezi posledním naplněným valenčním pásem ( $E_{\text{vb}}$ ) a prázdným vodivostním pásem ( $E_{\text{cb}}$ ) fotokatalyzátoru, v řádech několika elektronvoltů. Výsledkem této reakce je generování mobilních elektronů ve vyšších vrstvách vodivostního pásu ( $E_{\text{cb}}$ ) a tvorba elektronové díry v nižším energetickém valenčním pásem ( $E_{\text{vb}}$ ) katalyzátoru. Tento děj můžeme popsat následující rovnicí 1 [1].



Obrázek 1 Znáornění principu fotokatalýzy [2], upraveno autorem

Obrázek 1 znázorňuje fotokatalytický proces při kterém fotokatalyzátor na bázi  $\text{TiO}_2$  je vystaven vlivu záření, přičemž energie fotonu se rovná nebo je větší než šířka zakázaného pásu

a tím dochází k absorpci fotonu a tvorbě množství párů elektron – díra. Dochází tak ke vzniku volných fotoelektronů ve vodivostním pasu a děr ve valenčním pasu [2].

## 1.2 Fotokatalytická degradace za přítomnosti TiO<sub>2</sub>

Heterogenní fotokatalytická reakce probíhá podle určitých stupňů, kde excitovaný TiO<sub>2</sub> vygeneruje elektron a elektronovou díru.



Následujícím krokem je elektronový přenos z adsorbovaného substrátu (RX<sub>ad</sub>), adsorbované vody (H<sub>2</sub>O<sub>ad</sub>) nebo adsorbovaného hydroxylového aniontu (OH<sup>-</sup><sub>ad</sub>) na elektronovou díru.



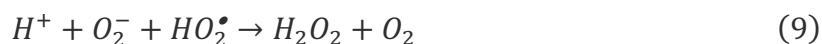
Třetí krok má velký význam, vyšší koncentrace OH<sup>-</sup> iontů vzniklých disociací vody (případně alkalické prostředí) významně podporuje vznik hydroxylových radikálů.



Molekulární kyslík se chová jako akceptor při přenosu elektronu.



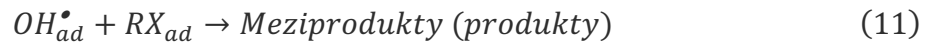
Superoxidové anionty mohou dále reagovat dle rovnice 8 a 9.



Fotokatalytická přeměna H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> poskytuje více volných OH<sup>•</sup> radikálů.



Posledním krokem je oxidace  $\text{OH}^\bullet$  radikály adsorbované organické látky ze znečištění ( $\text{RX}_{ad}$ ) na povrchu částic oxidu titaničitého.



$\text{OH}^\bullet$  radikály, jak je popsáno v rovnici (11), jsou velmi reaktivní a napadají molekuly sloučenin tvořící znečištění a rozkládají je na meziprodukty, případně až na finální produkty rozkladu jako jsou minerální kyseliny, oxid uhličitý a voda [1].

## 2 KINETIKA FOTOKATALYTICKÉ REAKCE

Heterogenní fotokatalytické reakce mohou probíhat v různých médiích, například v plynné fázi, ve vodných roztocích nebo v čistých organických kapalných fázích. Pokud budeme popisovat klasickou heterogenní katalýzu, můžeme tento proces rozdělit na pět na sobě nezávislých kroků:

- a) Přenos reaktantu v kapalně fázi na povrch katalyzátoru.
- b) Adsorpce alespoň jednoho z reaktantů na povrchu katalyzátoru.
- c) Reakce v adsorbované fázi.
- d) Desorpce produktů zpět do kapaliny.
- e) Odebrání produktů z oblasti rozhraní.

Fotokatalytická reakce se provádí ve adsorbované fázi (c) a hlavním rozdílem této reakce od katalytické reakce je způsob aktivace katalyzátoru pomocí fotonu, přičemž aktivace nemá žádnou závislost na ostatních krocích (a,b,d,e) [2].

### 2.1 Reakční kinetika

#### 2.1.1 Kinetika 0. řádu

Reakce nultého řádu jsou speciálním případem kinetických dějů, probíhající složitým systémem simultánních reakcí. Dochází k situacím, kdy se na pravé straně rovnice nevyskytují žádné koncentrace reagujících složek a jsou označeny na nultou mocninu. Proto se kinetický součin redukuje pouze na rychlostní konstantu [3]. Kinetická rovnice je

$$-\frac{dc_A}{d\tau} = kc_A^0 = k \quad (12)$$

Rychlost je konstantní po celou dobu reakce. Kinetickou rovnici můžeme integrovat s výsledkem

$$c_A = c_{A0} - k\tau \quad (13)$$

Poločas reakce pak můžeme vypočítat ze vztahu:

$$\tau_{1/2} = \frac{c_{A0}}{2k} \quad (14)$$

### 2.1.2 Kinetika 1. řádu

Kinetika prvního řádu popisuje obvykle reakce s jednou výchozí látkou



Kinetická rovnice je dána vztahem

$$-\frac{dc_A}{d\tau} = kc_A \quad (16)$$

ze které vyplývá, že rychlost reakce je přímo úměrná koncentraci výchozí látky. Poločas reakce má tvar:

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (17)$$

### 2.1.3 Langmuir-Hinshelwoodův kinetický mechanismus

Rychlost fotokatalytické reakce se popisuje Langmuir – Hinshelwoodovým mechanismem. Tento mechanismus se používá pro popis reakcí, které probíhají na rozhraní plynné a pevné fáze a můžeme ho použít i pro popis dějů na rozhraní kapalné a pevné fáze.

Mechanismus povrchových reakcí je založen na reakci atomů adsorbovaných na povrchu katalyzátoru a molekulových fragmentů.

Pro reakci popsanou danou rovnicí



Je rychlost reakce dana vztahem

$$v = -\frac{dc}{dt} = k \cdot \theta_A \cdot \theta_B \quad (19)$$

Kde  $\theta_A$  a  $\theta_B$  je stupeň pokrytí povrchu fotokatalyzátoru látkou A a B,  $k$  je rychlostní konstanta. Pomocí Langmuirovy rovnice (20) a (21) vyjádříme reakční rychlost (22).

$$\theta_A = \frac{K_A \cdot c_A}{1 + K_A \cdot c_A + K_B \cdot c_B} \quad (20)$$



$$\theta_A = \frac{K_B \cdot c_{AB}}{1 + K_A \cdot c_A + K_B \cdot c_B} \quad (21)$$

$$v = -\frac{dc}{dt} = k \cdot \theta_A \cdot \theta_B = \frac{k \cdot K_A \cdot K_B \cdot c_A \cdot c_B}{1 + K_A \cdot c_A + K_B \cdot c_B} \quad (22)$$

kde  $K_A$  a  $K_B$  jsou Langmuirovi adsorpční konstanty,  $c_A$  a  $c_B$  jsou koncentrace látek A, B a  $k$  je rychlostní konstanta.

Pro snadný popis kinetiky heterogenních fotokatalytických reakcí lze použít následující vztah reakční rychlosti:

$$-\frac{dc}{d\tau} = \frac{kK_A c_A}{1 + K_A c_A} \quad (22)$$

Při nižších koncentracích lze ve jmenovateli zanedbat výraz  $K_A c_A$ , čímž získáme vztah:

$$-\frac{dc}{d\tau} = kK_A c_A \quad (23)$$

Tímto usnadněním se vrátíme zpět na kinetiku 1. řádu [4].

## 3 FOTOKATALYZÁTORY

### 3.1 Oxid titaničitý

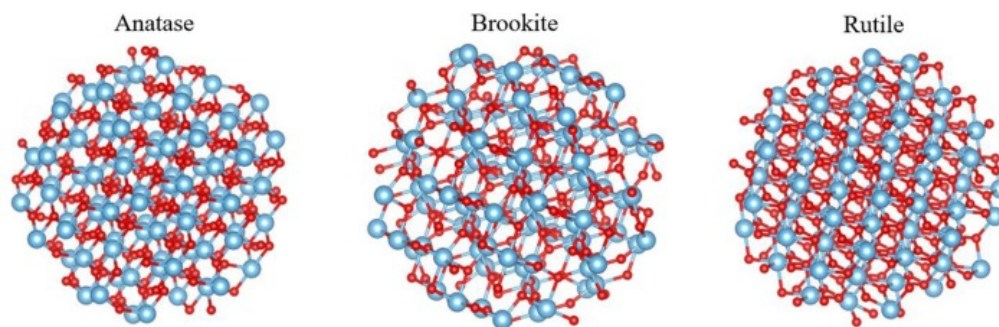
Oxid titaničitý, s chemickým vzorcem  $\text{TiO}_2$ , byl objeven v roce 1791 a nejčastěji se vyrábí z ilmenitu. Je také známý pod názvem titanová běloba a je označen E171 v potravinářských barvivech a bílý pigment 6 v stavebních barvivech [5]. Je jedním z nejdůležitějších materiálů pro využití ve fotokatalýze. To je díky jeho vynikající fotoaktivitě a stabilitě,  $\text{TiO}_2$  je netoxický a levný. V přírodě se vyskytuje ve formě rutilu, anatasu a brookitu [6].

Fotokatalytická aktivita  $\text{TiO}_2$  závisí na několika faktorech, například na uspořádání krystalické struktury a obsahu nečistot. Nejčastěji se používá  $\text{TiO}_2$  ve dvou krystalových formách: rutil a anatas, přičemž anatas obecně má vyšší fotokatalytickou aktivitu než rutil [7].

#### 3.1.2 Rutil a anatas

V přírodě se  $\text{TiO}_2$  vyskytuje ve formě rutilu, anatasu a brookitu, krystalové modifikace se od sebe liší také šířkou zakázaného pásu. Hodnota energie zakázaného pásu u rutilu je 3,0 eV, u anatasu 3,2 eV a u brookitu 3,3 eV [8].

Anatas i rutil mají schopnost absorbovat záření pouze v ultrafialové oblasti. Na rozdíl od anatasu rutil absorbuje záření, které je blíže k vlnové délce viditelného světla. Můžeme předpokládat, že rutilová forma je vhodnější pro použití jako katalyzátor díky tomu, že tato forma může absorbovat světlo širšího rozsahu. Ale není to pravda, anatasová forma vykazuje vyšší fotokatalytickou aktivitu. Hlavním důvodem je rozdíl v energetické struktuře, u obou typů v krystalické struktuře valenční pás je hluboko a výsledné pozitivní díry vykazují silné oxidační účinky. Vodivostní pás je však umístěn v blízkosti oxidačně-redukčního potenciálu vodíku, což naznačuje, že oba typy jsou relativně slabé s ohledem na sílu redukce. Víme, že vodivostní pás je v anatasové krystalické formě blíže k záporné hladině. Tudíž redukční efekt anatasu je silnější než u rutilového typu. Na závěr můžeme říct, že anatasová forma má vyšší fotokatalytickou aktivitu než rutilová forma [9].



Obrázek 2 Struktura rutilu, anatasu a brookitu (Ti–modř, O–červený) [10]

### 3.1.2 Modifikace TiO<sub>2</sub>

Jak už bylo řečeno, TiO<sub>2</sub> je jedním z nejvýznamnějších fotokatalyzátorů, ale navzdory tomu existuje hodně studií zabývajících se modifikací mikrostruktury čistého TiO<sub>2</sub> pro zmenšení šířky zakázaného pásu a prodloužení doby existence náboje [11].

Ke zlepšení fotokatalytického chování TiO<sub>2</sub> byly vypracovány následující strategie:

- Texturní a krystalický design, jako je výroba mezoporézního TiO<sub>2</sub> ke zlepšení adsorpce organických znečišťujících látek, dutá struktura TiO<sub>2</sub> pro zvětšení plochy fotoabsorpce a výroba vysokoenergetických nanokrystalu TiO<sub>2</sub>.
- Dopování TiO<sub>2</sub> kovovými nebo nekovovými prvky, které vede ke zmenšení šířky zakázaného pásu.
- Povrchová modifikace TiO<sub>2</sub>, jako je modifikace uhlíkovými materiály a depozice ušlechtilých kovů na povrch TiO<sub>2</sub> pro zlepšení jeho fotoaktivních vlastností.
- Vytvoření homojunkce a heterojunkce k dosažení prostorové segregace nosičů.

Povrchová fluorace byla úspěšně používána ke zlepšení fotokatalytických účinku TiO<sub>2</sub> což znamená, že fluor má pozitivní vliv na výslednou účinnost fotokatalýzy. Povrchová úprava TiO<sub>2</sub> fluorem má vliv na jeho chemickou strukturu a strukturu povrchu. Dále bylo prokázáno, že dopování TiO<sub>2</sub> fluorem zlepšuje jeho reaktivitu přizpůsobením struktury pásu. Dopování čistého TiO<sub>2</sub> vede ke vzniku Ti<sup>3+</sup> z Ti<sup>4+</sup>. Když takový TiO<sub>2</sub> je vystaven UV záření, fotoindukované elektrony z Ti<sup>3+</sup> mohou migrovat do absorbovaného molekulárního kyslíku na povrchu fotokatalyzátoru, zatímco díry se mohou hromadit ve valenčním pasu. Tímto způsobem je zabráněno rekombinaci párů e<sup>-</sup> a h<sup>+</sup>. Na závěr můžeme říct, že fluorace je jednoduchý způsob zvýšení fotoreaktivity TiO<sub>2</sub> a může být dosaženo pouhým přidáním malého množství NaF k suspenzi [11].

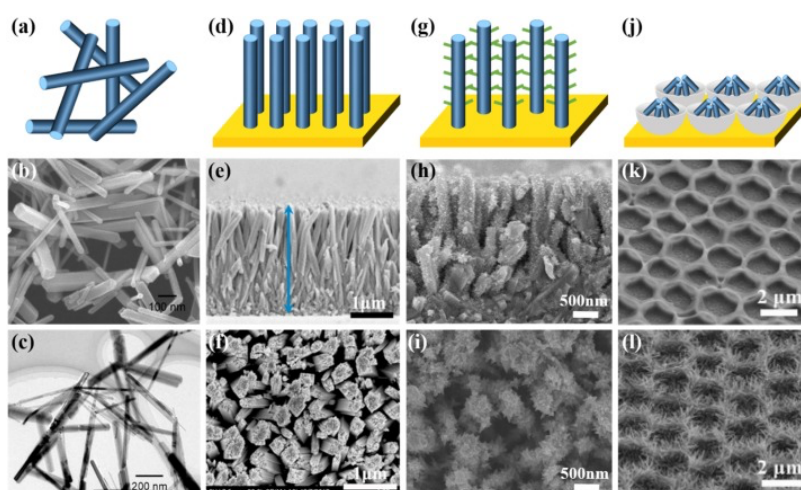
### 3.1.3 Morfologie TiO<sub>2</sub>

Pro větší účinnost fotokatalytické reakce jsou fotokatalyzátory na bázi TiO<sub>2</sub> obvykle vyráběny s nanostrukturální morfologií. Nanostrukturální fotokatalyzátory mohou zvětšovat absorpci světla pomocí rozptylu světla a usnadňují separaci fotoelektronů a děr.

Existuje hodně studií, které zkoumají různé morfologie nanostrukturálních TiO<sub>2</sub> pro zdokonalení výkonu fotokatalýzy. Je několik typů takových nanostruktur: nulorozměrné, jednorozměrné, dvojrozměrné a trojrozměrné (0D, 1D, 2D, 3D), všechny tyto nanostruktury mají různé vlastnosti díky své velikosti, tvaru a účinnosti absorpce světla [12].

1D struktury (například nanotrubičky) vykazují výborný výkon fotokatalytické reakce díky schopnosti rychle přenášet elektrony do zpětného kontaktu.

Byly studované nanočástice, nanotyčinky a rozvětvené nanotyčinky a bylo prokázáno, že rozvětvené pole má lepší schopnost přenosu náboje a absorpce světla a také větší reakční plochu.



Obrázek 3 (a-c)nanotyčinky, (d-f)pole nanotyčinek, (g-i)rozvětvené nanotyčinky (j-l)nanorod@nanobowl [12]

Nanotrubičky jsou také zajímavé pro fotokatalýzu díky své poréznosti, krystalinitě a samoorientované nanotubulární morfologii. Nanotrubičky TiO<sub>2</sub> zřetelně zkracují difuzní cesty nosičů náboje podél svých stěn, čímž dochází k minimalizaci ztráty náboje [12].

## 3.2 Oxid zinečnatý

Oxid zinečnatý (chemický vzorec ZnO) má fotokatalytické účinky podobné jako TiO<sub>2</sub>. ZnO pohlcuje UV záření o vlnové délce kratší než 368 nm. Podobně jako u TiO<sub>2</sub> vznikají

povrchově vázané hydroxylové radikály. Fotokatalytický účinek je ovlivněn velikostí částic, tvarem a měrným povrchem. Nejčastěji se používají nanočástice ZnO v rozmezí od 10 do 90 nm, ve formě prášku s povrchovou úpravou nebo ve formě suspenzí ve vodě nebo v organických rozpouštědlech [13].

### 3.2.1 Modifikace ZnO

ZnO má omezenou fotokatalytickou aktivitu kvůli své rychlé rekombinaci fotoexcitovaných nosičů náboje během fotokatalytického procesu. Pro řešení tohoto problému byly navrženy různé metody [14]:

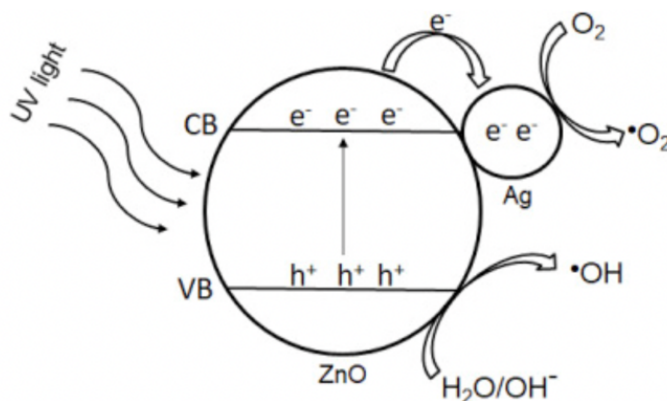
- Povrchová modifikace.
- Dopování.
- Kompozity.

Existuje hodně studií o syntéze hybridu sestávajícího ze ZnO a ušlechtilého kovu, což vede ke zlepšení fotokatalytického výkonu, protože ušlechtilé kovy způsobují přenos elektronu ze ZnO na kovový dopant [15,16].

Nejčastěji používaný kov je stříbro (Ag). Nanočástice stříbra na povrchu nanokrystalu ZnO působí jako akceptory pro elektrony. Tím podporují rychlost přenosu mezifázového náboje mezi kovem a polovodičem a zlepšují separaci elektron-díra, čímž zvětšují fotokatalytickou aktivitu.

Vyšší stupeň rozptýlení nanočástic Ag na povrchu krystalu ZnO může vest k vyšší fotokatalytické aktivitě fotokatalyzátoru Ag/ZnO a také povrchová plocha a velikost částic Ag budou mít na celý proces pozitivní vliv [14].

Schéma principu fotokatalytické reakce s použitím Ag/ZnO je znázorněno na obrázku 4.



Obrázek 4 Znázornění fotokatalýzy kompozitu Ag/ZnO pod UV zářením [14]

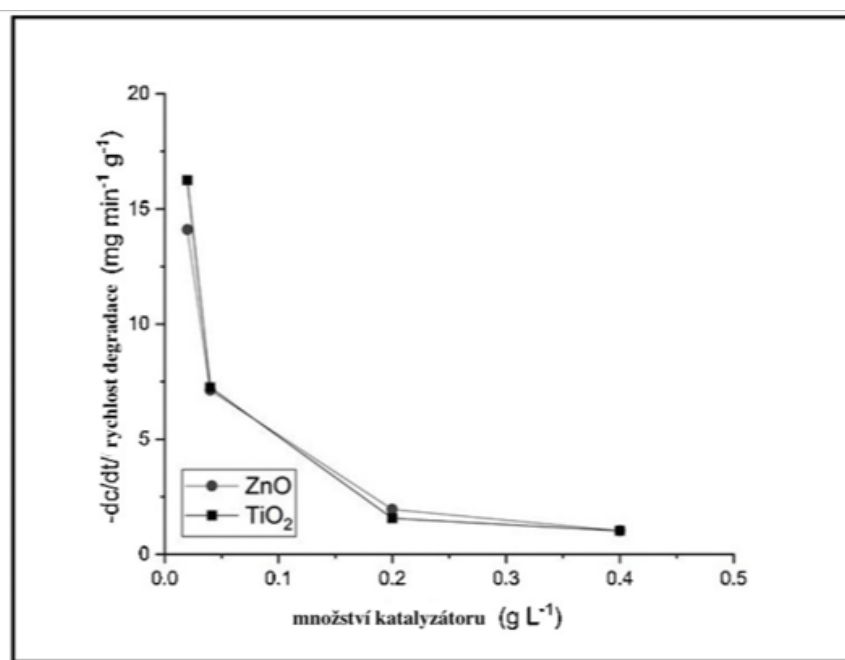
## 4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ FOTOKATALYTICKOU DEGRADACI

Existuje hodně faktorů, které mohou mít vliv na rychlost průběhu fotokatalytické reakce. Každý z těchto faktorů může ovlivňovat reakci samostatně, ale často se tyto faktory různě navzájem ovlivňují a jejich kombinace pak dává jiné výsledky, než jakých bylo dosaženo při studiu oddělených podmínek. V této kapitole bude uvedeno několik důležitých faktorů, které bereme v úvahu při stanovení účinnosti fotokatalytických experimentů.

### 4.1 Koncentrace fotokatalyzátoru

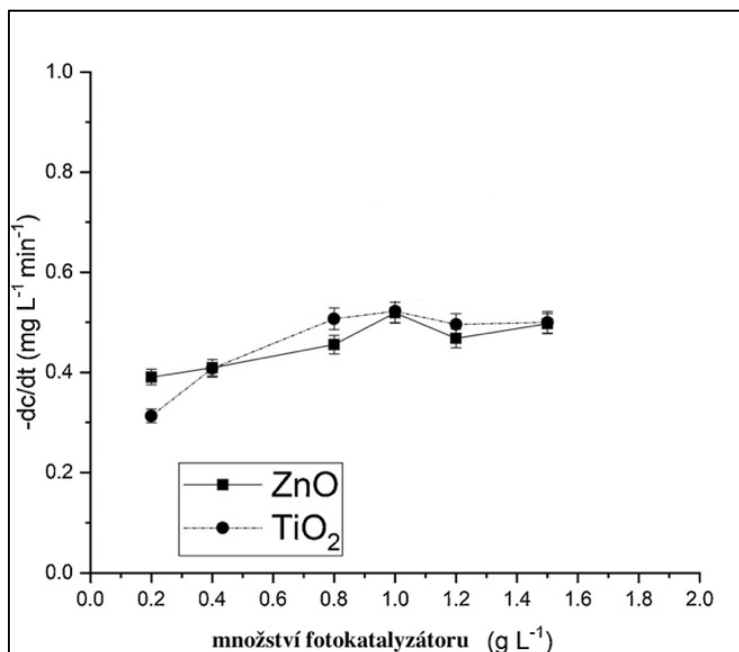
Vliv koncentrace fotokatalyzátoru je poměrně detailně popsán [17,18]. Experimentálně byla stanovena rychlost degradace barviva při různých koncentracích fotokatalyzátoru a bylo zjištěno, že rychlost začíná klesat při dosažení specifické koncentrace, která se nazývá optimální koncentrace. Po dosažení optimální koncentrace se účinnost fotokatalyzátoru snižuje [19]. Příčinou je přeplnění reakčního media nanomateriálem. Kromě toho se roztok zakalí a tím dochází k rozptylu světla, čím se snižuje účinnost procesu, protože světlo není použité na aktivaci fotokatalyzátoru [20].

Ghosh a kol. provedli experiment v průběhu kterého měnili počáteční koncentrace fotokatalyzátoru  $\text{TiO}_2$  a  $\text{ZnO}$ . Za degradovanou látku byl použit kofein a bylo stanoveno, že oba fotokatalyzátory mají stejnou schopnost degradovat danou látku, což je ukázáno na obrázku 5.



Obrázek 5 Účinek  $\text{TiO}_2$  a  $\text{ZnO}$  na rychlost degradace kofeinu [21], upraveno autorem

Dále bylo experimentálně zjištěno, že rychlost degradace kofeinu roste, pokud zvyšujeme koncentrace fotokatalyzátoru, dokud nedosáhne svého maxima. Následující zvýšení fotokatalyzátoru vede buď ke snížení nebo k již žádné změně rychlosti degradace kofeinu. Pro ZnO rychlost degradace dosahuje maximum při koncentraci 1 g/l, s následujícím zvětšováním koncentrace se rychlost snížila. Stejně podmínky byly studovány i pro TiO<sub>2</sub>, optimální koncentrace pro degradaci kofeinu je 1 g/l, při následujícím zvětšení koncentrace rychlost degradace již nerostla a byla prakticky totožná [21]. Toto je graficky znázorněno na následujícím obrázku 6.



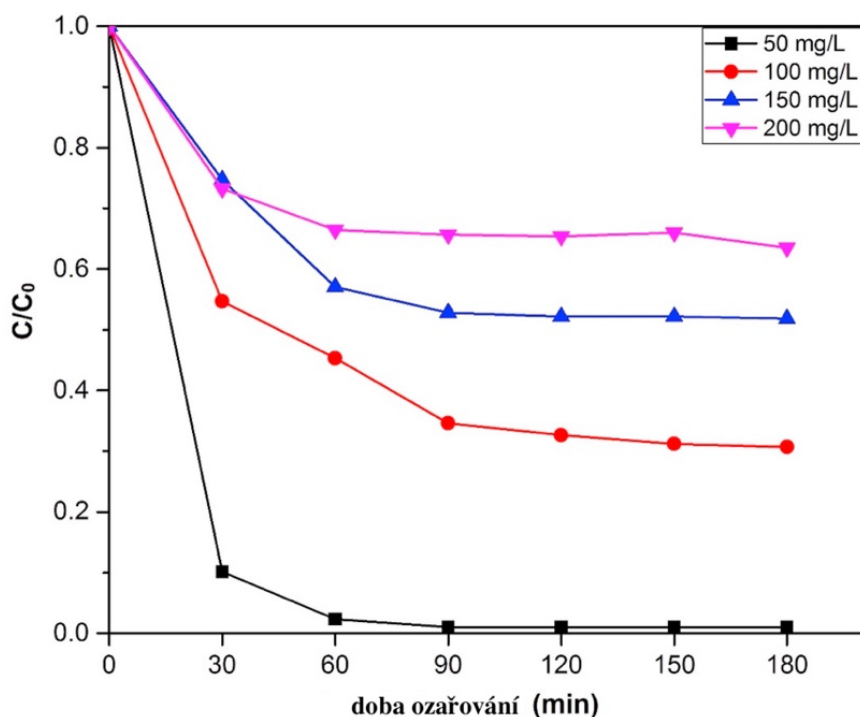
Obrázek 6 Vliv množství katalyzátoru na počáteční rychlost fotokatalytické degradace kofeinu [21], upraveno autorem

## 4.2 Koncentrace barviva

Analogicky jako u koncentrace katalyzátoru má množství degradovaného barviva vliv na rychlost průběhu reakce. Zvýšení koncentrace barviva po dosažení optimální koncentrace vede ke snížení fotokatalytické rychlosti reakce [17]. Počáteční zvýšení koncentrace barviva podporuje adsorpci většího množství barviva na povrchu fotokatalyzátoru. Avšak následující zvýšení koncentrace barviva (nad optimální koncentraci) způsobilo, že reakční médium je více koncentrovanější a průnik světla pro aktivaci fotokatalyzátoru je tak znesnadněn. Kromě toho vyšší koncentrace barviva potřebuje pro účinnou degradaci zvýšení tvorby oxidačních / volných radikálů [20, 22].

Sakarkar a kol. zkoumali vliv koncentrace barviva na účinnost fotokatalytického procesu. Jako degradované barvivo byl použit remazol turquoise blue (RTB) v koncentracích od 50 mg/l do 200 mg/l a membrány s vrstvou oxidu titaničitého. Bylo prokázáno, že analogicky jako u

koncentrace katalyzátoru má množství barviva vliv na rychlost průběhu reakce. Na obrázku 7 je ukázáno, že zvýšení koncentrace barviva po dosažení optimální koncentrace vede k snížení rychlosti fotokatalytické reakce. Naopak počáteční zvýšení koncentrace barviva podporuje adsorpci většího množství barviva na povrchu fotokatalyzátoru [22].



Obrázek 6 Odstranění RTB barviva v závislosti na čase pro různé počáteční koncentrace barviva [22], upraveno autorem

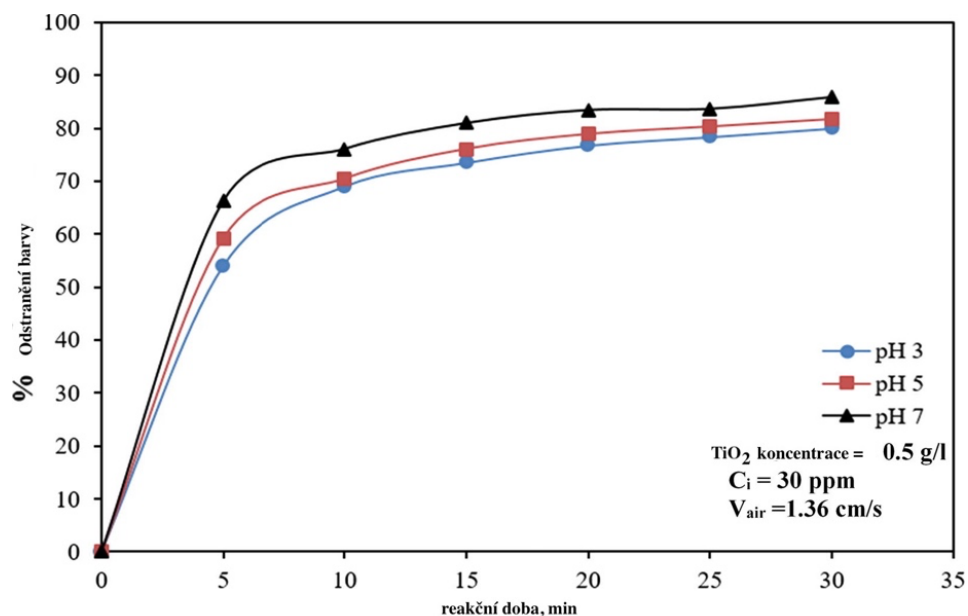
### 4.3 pH

Typ použitého nanomateriálu a barviva má velký vliv na volbu optimální hodnoty pH a kvůli tomu nemůžeme stanovit tak snadno stejnou závislost jako u předešlých faktorů. Některé studie ukazují, že optimální hodnotou pH je 8,5 a to konkrétně pro fotokatalýzu s použitím TiO<sub>2</sub> a methylenovou modří [20].

Avšak jak již bylo uvedeno, vliv pH je velmi komplikovaný a složitý. Proto by optimální hodnota pH pro konkrétní aplikaci měla být vybrána na základě předběžných experimentů [23]. Podle charakteru barviva musí být vybrána vhodná hodnota pH pro zlepšení průběhu reakce. Heterogenní fotokatalytická reakce se obecně skládá z několika kroků. Barvivo difunduje z hlavní části roztoku na povrch katalyzátoru, který působí jako adsorbent a udržuje reaktant na svém povrchu. Pokud systém bude ozařován vhodným světlem s dostatečnou energií k aktivaci fotokatalyzátoru, začne degradační reakce. Po ukončení reakce se reakční produkty desorbují z povrchu katalyzátoru zpět do roztoku. Hodnota pH má vliv na povrchový náboj katalyzátoru a také míru sorpce reaktantů na jeho povrchu.



Abdellah a kol. studovali vliv různých faktorů na proces fotokatalýzy. Jako katalyzátor byl používán oxid titaničitý, který byl aktivován ultrafialovým zářením. V této studii byl zkoumán vliv pH roztoku v rozmezí od 3 do 7 na účinnost fotodegradace. Na obrázku 8 je znázorněn proces odstranění barviva methylenové modři na čase při různých hodnotách pH [24].



Obrázek 7 Odstranění barviva methylenová modř pro různé hodnoty pH roztoku [24], upraveno autorem

Zvýšení účinnosti fotodegradace bylo pozorováno při zvyšování pH od 3 do 7. Tento účinek lze připsat charakteru methylenové modři v kombinaci s amfoterními vlastnostmi TiO<sub>2</sub>. V kyselých roztocích s hodnotami pH nižší než 5,8 povrch částic TiO<sub>2</sub> získává kladný náboj, mezitímco při pH od 6,8 získává záporný náboj [24].

#### 4.4 Teplota

Obvykle se fotokatalytické reakce provádějí při laboratorní teplotě a atmosférickém tlaku [20]. Je známo, že teplota má velký vliv na kinetiku reakce, a proto optimální teplota nesmí být tak nízká, aby aktivační energie nemohla být předaná do systému, a také nesmí být mimořádně vysoká, aby nebyla narušena rovnováha v systému [25]. Tudíž výběr teploty je důležitý pro získání maximální účinnosti procesu. Analogicky jako pH musí i teplota být optimalizovaná pro konkrétní aplikace. Bylo zjištěno, že pro fotokatalytickou reakci s použitím methylenové modři je nejvhodnější teplota 25 °C, přičemž vysoká teplota vedla ke snížení rychlostní konstanty a stanovení rovnováhy bylo komplikované kvůli zvýšení kinetické energie v systému [26].

Ariza-Tarazona a kol. zkoumali vliv teploty společně s pH. Tyto dvě proměnné byly vybrány pro jejich velký vliv na průběh fotokatalytické reakce. Hodnoty pH byly v rozsahu od 3 do 11, aby byl zohledněn účinek v kyselém, neutrálním i zásaditém prostředí. Hodnoty teploty byly zvoleny v rozmezí od 0 °C do 40 °C. Účinnost fotodegradace byla vyhodnocena jako ztráta hmotnosti degradované látky. Výsledky daného experimentu jsou uvedeny v tabulce 1.

№	Teplota, A (°C)	pH, B	ztráta hmotnosti, Y (%)
1	40	3	12,79
2	0	3	70,66
3	40	11	0,90
4	40	3	12,10
5	0	3	69,21
6	0	11	1,40
7	40	3	12,38
8	40	11	0,10
9	20	7	0,15
10	0	3	75,44
11	0	11	1,45
12	20	7	0,70
13	20	7	0,55
14	40	11	0,45
15	0	11	2,15

Tabulka 1 Vliv pH a teploty na účinnost degradace [27], upraveno autorem

Při experimentu byly jako degradované látky použity mikroplasty, konkrétně polyetylen s vysokou hustotou. Z tabulky 1 vidíme, že nejvyšší degradační účinnost je pro pH 3 a teplotu 0 °C. Tento efekt je dosažen díky fragmentaci mikroplastu vlivem nízké teploty a tím se

zvětšuje reakční plocha. Přítomné ionty  $H^+$  také podporují degradaci plastu. Druhého nejlepšího výsledku bylo dosaženo při pH 3 a teplotě 40 °C, ale ztráta hmotnosti již byla značně menší. To je spojeno s tím, že při teplotě 40 °C již nedochází k plastické fragmentaci, degradace je způsobena pouze interakcí mikroplastu s fotokatalyzátorem za kyselých podmínek, které podporují plastickou degradaci. Ostatní pokusy nevykazují žádné pozitivní výsledky degradace.

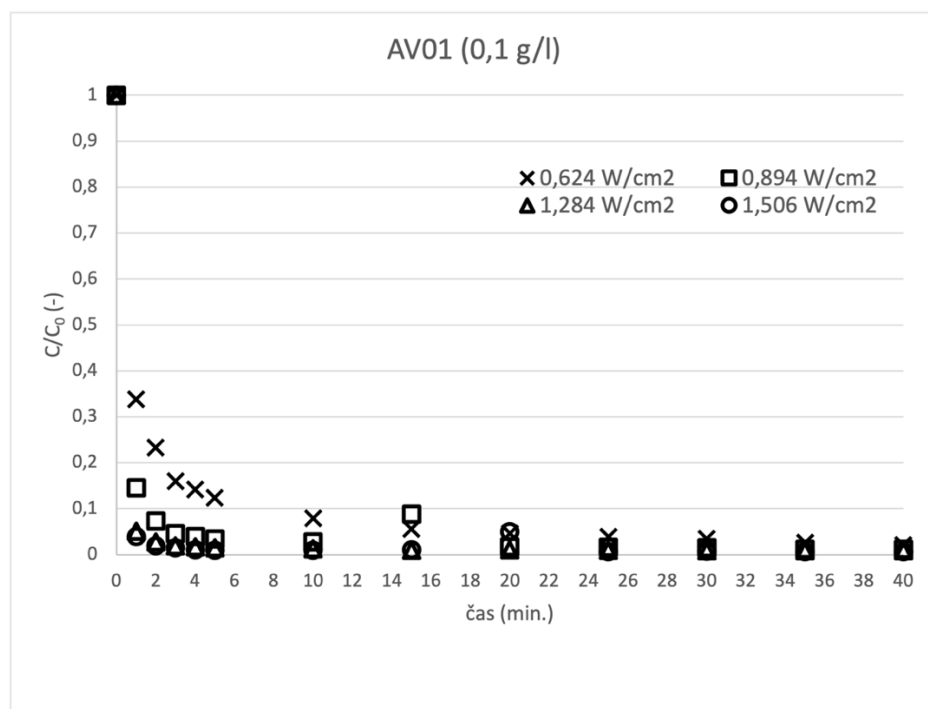
Z tohoto experimentu je zřejmé, že teplota společně s pH vykazuje kombinovaný účinek na fotokatalytickou degradaci. Nižší hodnoty pH vnášejí do systému  $H^+$  ionty, které usnadňují degradaci plastu a podporují vyšší interakci s fotokatalyzátorem. Nízká teplota vede k fragmentaci mikroplastu, čím se zvyšuje jeho povrchová plocha [27].

#### **4.5 Intenzita záření**

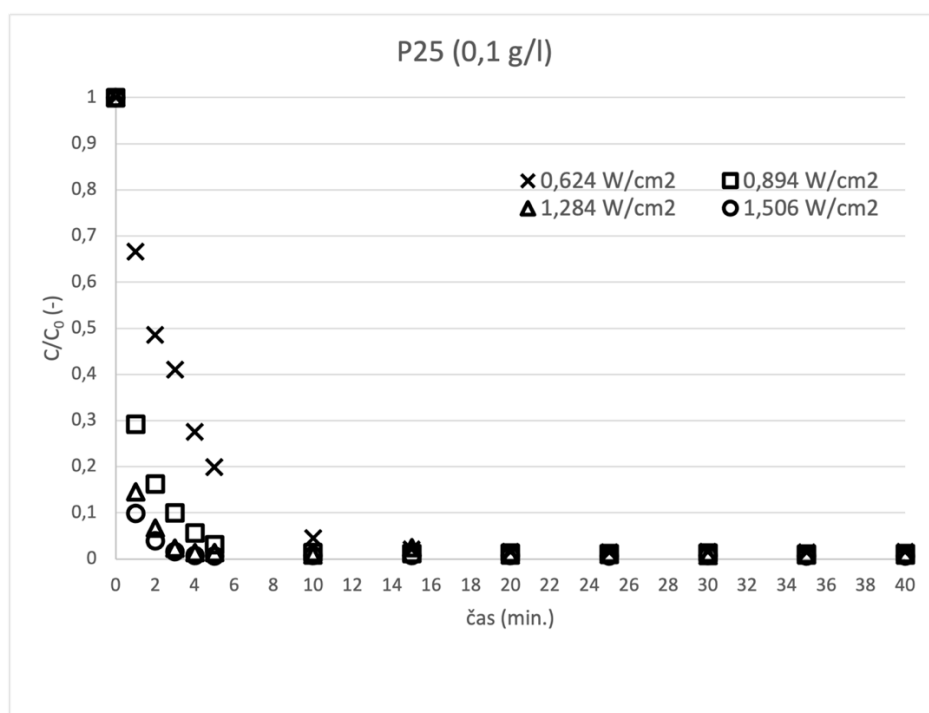
Intenzita záření je jedním z nejdůležitějších faktorů, který má vliv na průběh fotokatalytické reakce, protože hraje hlavní roli v aktivaci fotokatalyzátoru [20]. Čím větší množství fotonů interaguje s fotokatalyzátorem, tím větší bude produkce nosičů náboje a následně se zvýší fotokatalytická degradace. Proto při studiu fotokatalytického procesu musí být vždy brána v úvahu intenzita záření [28].

Byl proveden experiment, při kterém byl stanovován vliv intenzity záření na účinnost fotokatalytické degradace. Bylo použito barvivo methylenová modř a dva typy  $TiO_2$  (s označením AV-01 a P 25). jako zdroj záření byla použita UV-A LED lampa, intenzita záření byla nastavována na 4 různých úrovních a to 0,624, 0,894, 1,284 a 1,506  $W/cm^2$ .

Výsledky tohoto experimentu jsou v grafické formě uvedeny na obrázcích 9 a 10.



Obrázek 9 Znáornění závislosti relativní koncentrace methylenové modři na čase pro heterogenní fotokatalytickou degradaci (použitý fotokatalyzátor AV01, koncentrace 0,1 g/l) [29]



Obrázek 10 Znáornění závislosti relativní koncentrace methylenové modři na čase pro heterogenní fotokatalytickou degradaci (použitý fotokatalyzátor P25, koncentrace 0,1 g/l) [29]

Z výsledků je zřejmé, že při rostoucím výkonu UV-A lampy dochází k rychlejšímu odstraňování barviva z roztoku. Největší rozdíl v účinnosti degradace je mezi nejnižším a druhým nejnižším nastaveným výkonem lampy, tj mezi 0,624 W/cm<sup>2</sup> a 0,894 W/cm<sup>2</sup>. Následné zvýšení

výkonu lampy již nevedlo k velkému zvýšení efektivity odstranění barviva. Podle těchto výsledků byl stanoven optimální výkon lampy 0,894 W/cm<sup>2</sup> [29].

## 4.6 Zdroj záření

Nejčastěji se pro fotokatalytické reaktory používají halogenové lampy, které mohou produkovat nepřetržité spektrum záření od UV oblasti (300 nm) do infračervené oblasti (2500 nm). Pro praktické účely je atraktivní využití slunečního záření k minimalizaci spotřeby energie a provozních nákladů [30]. Bohužel tento typ záření není stabilní a je závislý na počasí, podnebí a denní době. Pro fotokatalyzátor TiO<sub>2</sub> je vhodné jen UV záření, které zaujímá pouze cca 4 % dopadajícího slunečního světla [31]. I když sluneční záření je alternativním světelným zdrojem, umělé UV záření s vysokou intenzitou světla je konkurenceschopnější a používá se pro fotokatalytickou degradaci nejčastěji [30]. Ultrafialová elektroluminiscenční dioda (LED angl. Light-emitting diode) představuje slibný alternativní zdroj záření. Je několik výhod používání UV-LED, například výkon diody je snadno nastavitelný a během záření generují méně tepla než obyčejné UV lampy, což minimalizuje vliv teploty na průběh fotokatalytické reakce [32].

Harun a kol. zkoumali fotodegradaci látky kongo červeně s použitím fotokatalyzátoru pod UV lampou a slunečním zářením. Bylo zjištěno, že degradace pod vlivem slunečního záření je mnohem pomalejší než degradace za využití UV lampy. Na obrázku 11 jsou uvedeny výsledky experimentu, kde byl studován vliv obou druhů záření na degradaci barviva kongo červeně bez vnášení fotokatalyzátoru do reakčního média.

reakční doba (min)	Absorbance	
	sluneční záření	UV záření
0	0.309	0.309
5	0.306	0.225
10	0.306	0.224
15	0.305	0.224
20	0.305	0.223
25	0.302	0.220
30	0.284	0.211

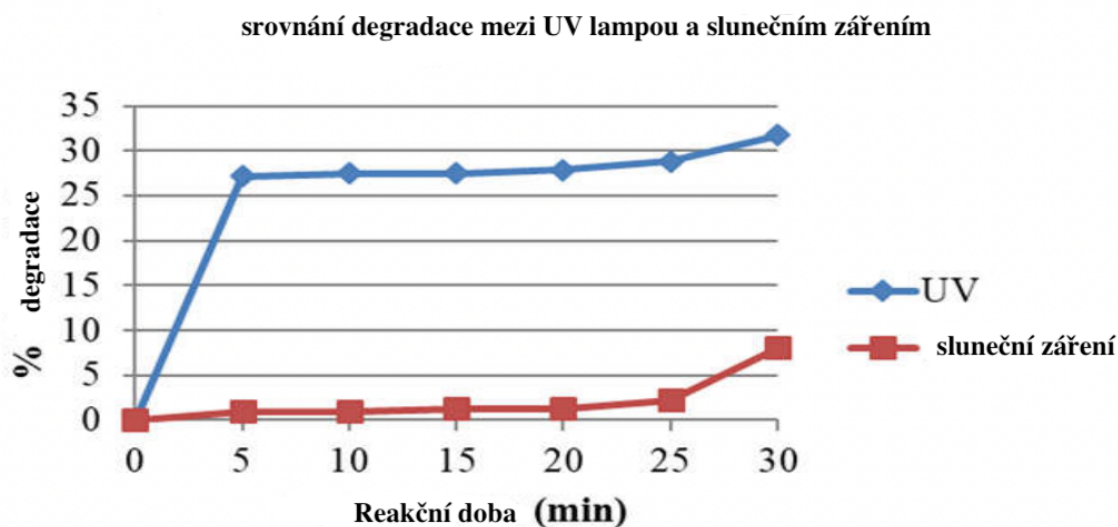
Obrázek 11 Závislost absorbance barviva kongo červeně na reakční době bez přítomnosti fotokatalyzátoru [33], upraveno autorem

Je patrné, že degradační účinek pod UV zářivkou je vyšší ve srovnání se slunečním zářením. Na obrázku 12 jsou uvedeny výsledky stejného experimentu, ale s použitím fotokatalyzátoru, což vedlo ke značnému urychlení procesu degradace barviva.

reakční doba (min)	Absorbance	
	sluneční záření	UV záření
0	0.309	0.309
5	0.132	0.124
10	0.120	0.117
15	0.120	0.117
20	0.118	0.116
25	0.114	0.110
30	0.109	0.102

Obrázek 12 Závislost absorbance kongo červeně na reakční době s přítomnosti fotokatalyzátoru [33], upraveno autorem

Porovnáním výsledků na obrázcích 11 a 12 vidíme, že UV zářivka je účinnější než přirozený zdroj záření. Při reakčním čase 30 minut je za použití UV lampy degradováno 31,72 % barviva, zatímco při použití slunečního záření je degradováno pouze 8,09 %, což je patrné ze závislosti znázorněné na obrázku 13.



Obrázek 13 Srovnání degradace mezi UV lampou a slunečním zářením [33], upraveno autorem

Výsledky těchto experimentů jednoznačně prokázaly, že použitý zdroj záření má zásadní vliv na rychlost fotokatalytické reakce a je výhodné používat zdroje UV záření [33].

## **4.7 Fotoreaktor**

Použitý typ fotoreaktoru také ovlivňuje průběh fotokatalytické reakce. Pro vědecké experimenty se používají různé druhy fotoreaktorů, zpravidla reaktory můžeme rozdělit na dva základní typy podle uspořádání fotokatalyzátoru v reaktoru. První typ s mobilním umístěním fotokatalyzátoru a druhý typ reaktoru má imobilní umístění. V případě imobilizovaného reaktoru je fotokatalyzátor umístěn na specifickém podkladu po celou dobu průběhu reakce. Tento typ reaktoru má výhodu v odstranění kroku separace fotokatalyzátoru od reakčního roztoku, takže není potřeba provádět separační postupy jako je například centrifugace, filtrace, magnetická separace, mechanická separace, vakuová filtrace atd. Při používání tohoto typu reaktoru není třeba odstraňovat fotokatalyzátor z reakčního media.

Nicméně každý typ fotoreaktoru má své výhody a nevýhody. Pro studie, které popisují fotokatalytické děje se nejčastěji používají obyčejné fotokatalytické reaktory se suspendovanou formou fotokatalyzátoru. Naopak pro studie, které se zaměřují na vývoj technologie péče o zdraví se používají imobilizované reaktory ke zvýšení trvanlivosti fotokatalyzátoru a aby se předešlo kroku separace. Avšak imobilizované reaktory také vykazují některé problémy ve srovnání s mobilizovaným reaktorem. Imobilizované reaktory na bázi membrány vykazují problémy se znečištěním a degradací syntetické membrány v důsledku ozařování při zapojení do procesu fotokatalytické reakce. Tudíž správný výběr typu fotokatalytického reaktoru je důležitý pro dosažení optimální fotokatalytické účinnosti [20].

## 5 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ FOTOKATALÝZY

Nejvýznamnější oblastí využití fotokatalýzy, za pomoci  $\text{TiO}_2$ , je fotokatalytická degradace organických sloučenin.  $\text{TiO}_2$  může fotokatalyticky rozkládat a mineralizovat velké množství znečištění životního prostředí, například škodlivé organické a anorganické látky může rozkládat až na  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  a neškodné anorganické ionty [5].

Existuje značný počet studií, které se zabývají použitím fotokatalytické degradace v praxi, například dekontaminace odpadních vod, čištění vzduchu nebo vytváření samočisticích povrchů [34].

Díky své samočisticí schopnosti, ochraně proti zamlžování a dezinfekčnímu účinku se oxid titaničitý používá také při výrobě oken, dlaždiček a automobilových zrcátek [35].

### 5.1 Environmetální čištění půdy a vody

Fotokatalyzátory mají velký potenciál v průmyslové technologii pro detoxikaci nebo úpravu vod a půdy díky několika důležitým faktorům [36]:

- Při fotokatalytické dekontaminaci pomocí  $\text{TiO}_2$  se používá jenom přírodní kyslík a sluneční světlo. Postup dekontaminace probíhá za běžných podmínek.
- Fotokatalytická dekontaminace je závislá na vlnové délce a lze ji urychlit UV zářením.
- Fotokatalyzátory  $\text{TiO}_2$  jsou levné, snadno dostupné, netoxické a chemické stabilní. Mají silnou oxidační schopnost.
- Při průběhu fotokatalytické dekontaminace většinou nepotřebujeme žádná další chemická činidla a v ideálním případě nevznikají žádné degradační meziprodukty.

Látkami, které způsobují znečištění vody, jsou často kontaminanty vyskytující ve průmyslových vodách, například barviva z textilního a kosmetického průmyslu, ionty těžkých kovů z automobilového a elektrotechnického průmyslu atd. [37].  $\text{TiO}_2$  byl úspěšně použit pro fotokatalytickou redukci iontů  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ , přičemž reakce probíhala podle kinetiky prvního řádu [38].  $\text{TiO}_2$  má také velký potenciál pro odstranění rtuti z odpadních vod [39]. Společné dopování  $\text{TiO}_2$  stříbrem a manganem má vynikající výsledky při odstraňování iontů  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$  z vody. Dopovaný katalyzátor má schopnost redukovat i stopové množství iontů těžkých kovů, což představuje velmi nadějný způsob čištění [40]. Je známo, že oxid titaničitý může být



široce používán i v zemědělství, především v čištění půd kontaminovaných těžkými kovy. Tento fotokatalyzátor má antagonistické a synergické účinky na akumulaci těžkých kovů a růst rostlin za různých podmínek prostředí [41,42].

Přítomnost farmaceutických přípravků v odpadních vodách také představuje velké nebezpečí pro vodní organismy a okolní prostředí, a také vykazuje negativní účinek na lidské zdraví [43]. Obvyklé metody čištění odpadních vod nejsou vhodné pro úplné odstraňování persistentních látek z vody a je vyžadováno nalezení účinnější metody jejich odstraňování [44]. Je známo, že oxid titaničitý vykazuje skvělou účinnost v odstranění léků proti bolesti, například paracetamolu. Degradční účinek je nejlepší při pH 9 a vnášení fotokatalyzátoru je možné ve formě suspenze nebo na imobilizovaném nosiči [45].

Extrémně vysokou toxicitu vykazují také zbytky pesticidů v odpadní vodě [46]. Oxid titaničitý je možné použít při odstraňování pesticidů. Pomocí TiO<sub>2</sub> pod slunečním zářením bylo úspěšně odstraněno šest nejběžněji používaných insekticidů a pesticidů, konkrétně šlo o malathion, fenotrothion, quinalphos, vinclozolin, dimethoát a fenarimol [47]. Je známo, že chlorpyrifos, pesticid na bázi fosfátu, je také dobře degradovatelný fotokatalýzou za použití TiO<sub>2</sub>, kdy jeho použitím bylo odstraněno skoro 80 % tohoto pesticidu během jednoho dne [48].

## 5.2 Čištění vzduchu

Katalyzátory TiO<sub>2</sub> byly zabudovány do venkovních stavebních materiálů, například do dlažebních kostek nebo do barev, za účelem podstatného snížení koncentrace škodlivých látek, jako jsou oxidy dusíku a těkavé organické sloučeniny [5].

### 5.2.2 Oxidy dusíku

Oxidace oxidů dusíku probíhá za normálních podmínek velmi pomalu kvůli jejich nízkým koncentracím. Fotokatalyzátor TiO<sub>2</sub> může urychlit fotochemickou oxidaci na vzduchu.

Fotoprodukované hydroxylové radikály OH• jsou silná oxidační činidla a mohou oxidovat oxid dusičitý na dusičnanové ionty přímo na povrchu TiO<sub>2</sub>.



Fotoprodukované superoxidové ionty •O<sub>2</sub><sup>-</sup> jsou schopné také oxidovat oxid dusnatý na dusičnanové ionty na fotokatalyzátoru TiO<sub>2</sub>, jak je uvedeno v rovnici 25.



Poté vznikají relativně neškodné dusičnanové ionty, které mohou být odplavované například deštěm [49].

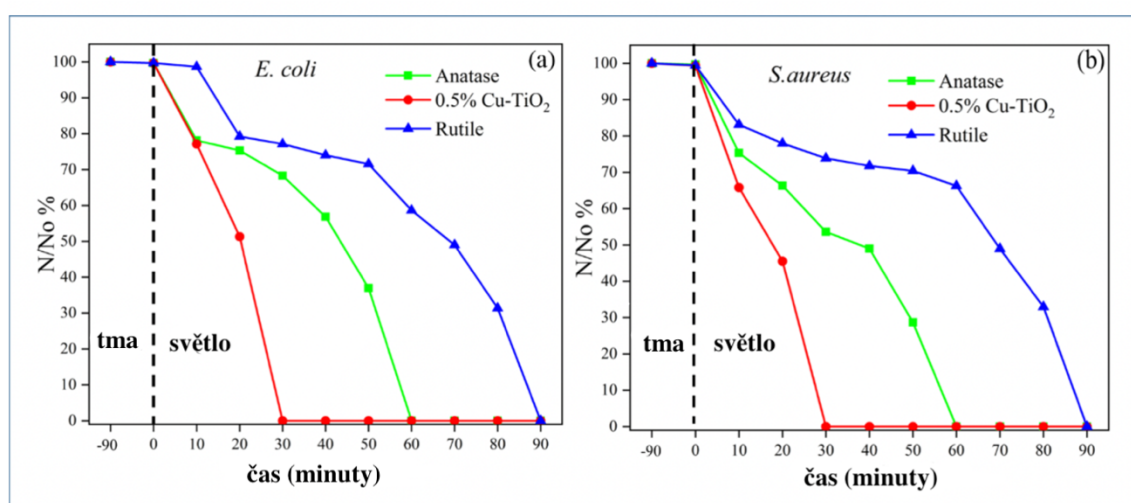
### 5.2.3 Těkavé organické sloučeniny

Fotokatalyzátor  $\text{TiO}_2$  může degradovat různé těkavé organické sloučeniny, například aceton, methanol, trichlorethylen, butylmethylether atd. Fotokatalytická oxidace v plynné fázi vykazuje vysoký potenciál pro použití v průmyslových technologických ventilačních zařízeních a pro úpravu vzduchu ve vnitřních prostorech, včetně eliminace těkavých organických sloučenin [5].

## 5.3 Antimikrobiální aktivita

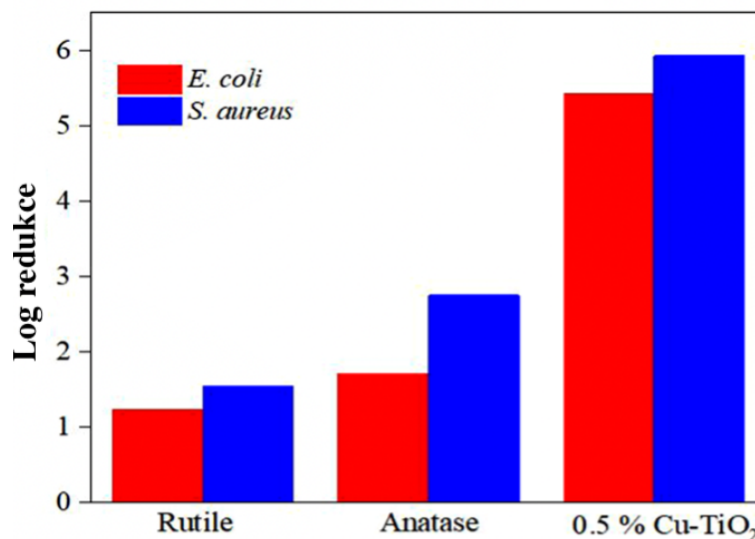
Vytváření mikrobiálních kolonií uvnitř vlhké místnosti je jedním z hlavních faktorů přispívajících ke zhoršení kvality vnitřního ovzduší [50]. Tyto organismy mají schopnost produkovat škodlivé látky, například spory, alergeny a toxiny, které mají vliv na lidské zdraví [51]. Fotokatalýza je jedna z nenadějných a nejjednodušších metod, kterou můžeme použít pro snížení mikrobiální kontaminace ovzduší ve vnitřních prostorech [52].

Mathew a kol. zkoumali vliv fotokatalytické dezinfekce pomocí několika fotokatalyzátorů. Byly použity dvě formy  $\text{TiO}_2$  (anatas a rutil) a syntetizovaný  $\text{Cu-TiO}_2$ . Experiment byl hodnocen ve vztahu ke dvěma různými bakteriálními kmenům (*E. coli* a *S. aureus*). K prokázání účinnosti za použití viditelného světla byly experimenty prováděny ve tmě a za osvětlení viditelným světlem. Jak je patrné ze závislostí uvedených na obrázku 14, růst obou dvou kmenů bakterií přetrvával za neosvětlených podmínek, zatímco po osvětlení začal klesat.



Obrázek 14 Fotokatalytická inaktivace (a) *E. coli* a (b) *S. aureus* anatasem, rutilem a 0,5%  $\text{CuTiO}_2$  [53], upraveno autorem

Ve tmě byl růst bakterií v průběhu 90 minut poměrně stálý, zatímco za použití viditelného záření růst významně poklesl, během prvních 30 minut až o 99,99 % v porovnání s počátečním množstvím, což vidíme na obrázku 15. Účinnost je vydařena pomocí Log redukce počtu mikroorganismů, která vyjadřuje míru redukce bakterií (čím vyšší je hodnota Log redukce, tím účinnější byla degradace mikroorganismů).



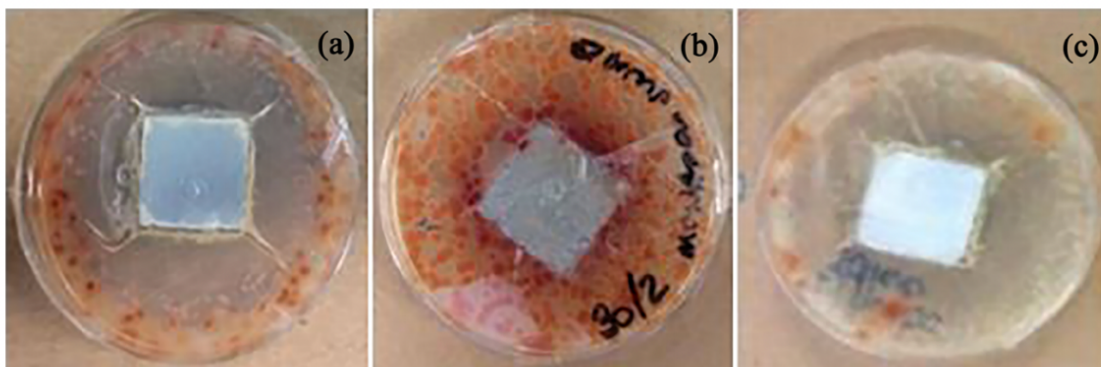
Obrázek 15 Fotokatalytická antibakteriální dezinfekční účinnost anatasu, rutilu a 0,5 % Cu-TiO<sub>2</sub> vzorky s *E. coli* a *S. aureus* [53], upraveno autorem

Výsledkem daného experimentu je prokázání vysoké fotokatalytické účinnosti různých forem TiO<sub>2</sub> a možnost jejich použití v antimikrobiálních aplikacích [53].

#### 5.4 TiO<sub>2</sub> jako fungicidní prostředek

Jeden z rozšířených problémů dnešní doby je také růst kvasinek a plísní v místnostech bez větrání nebo s vysokou vlhkostí, což je velkým zdravotním rizikem pro lidské zdraví [54].

Amorim a kol. vytvořili fotokatalytické barvivo, které obsahuje mikrosféry TiO<sub>2</sub>. Toto barvivo bylo nanášeno na cementové dlaždičky, poté byly vzorky umístěny v různých Petriho miskách s obsahem hub *Monascus ruber*. Vzorky hub byly inkubovány při 30 °C po dobu 24 hodin. Byly provedeny také kontrolní experimenty ve tmě, ale žádný fungicidní účinek nebyl pozorován. Na obrázku 16 vidíme výsledky experimentu, který proběhl za podmínek viditelného záření. V tomto případě fotoaktivita přispěla k inhibici růstu mikroorganismů působením radikálů, které jsou generovány za použití TiO<sub>2</sub> pod viditelným světlem [55].



Obrázek 16 Dlaždičky: (a) s mikrosféry 10%  $\text{TiO}_2$ ; b) bez  $\text{TiO}_2$  a (c) s 5%  $\text{TiO}_2$  P25, po testu houbami (*Monascus ruber*) pod viditelným světlem [55]

## ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo popsat faktory ovlivňující účinnost fotokatalýzy. Fotokatalýza je považována za velmi slibnou metodu odstraňování škodlivých látek z různých složek životního prostředí, například půdy, ovzduší a vody.

V první části práce byly popsány základní mechanismy fotokatalytických reakcí a nejběžněji používané fotokatalyzátory. Nejčastěji používaným fotokatalyzátorem je oxid titaničitý, který má vysokou účinnost, je lehce dostupný, levný a ekologicky nezávadný. Pro zvýšení účinnosti se tento fotokatalyzátor dále různě modifikuje.

V další části práce byly popsány základní faktory, které ovlivňují průběh fotokatalytické degradace. Jedná se o pH, koncentraci barviva, koncentraci fotokatalyzátoru, teplotu, intenzitu a druh záření a typ fotoreaktoru. Experimenty dokázaly, že koncentrace barviva a koncentrace fotokatalyzátoru mají podobný vliv na účinnost degradace, pro oba faktory existuje optimální koncentrace, po její dosazení rychlost degradace se začíná klesat. Avšak nemůžeme stanovit přesnou závislost pH kvůli tomu, že na účinnost budou mít vliv i jiné faktory, například vyber barviva nebo teplota. Intenzitu záření považujeme za jeden z nejdůležitějších faktorů a je prokázáno že při rostoucím výkonu UV-A lampy roste i rychlost degradace barviva z roztoku. Také v průběhu experimentu s použitím barviva kongo červen bylo stanoveno že účinek UV zářivky je mnohem působivější než použití slunečního záření.

Je důležité brát v úvahu i spolupůsobení těchto faktorů, které se navzájem mnohdy ovlivňují. Vemí často je proto potřeba najít optimální podmínky pro daný proces experimentálně.

V práci jsou dále uvedeny některé praktické aplikace a možnosti využití fotokatalýzy. Jedná se zejména o čištění vzduchu a odstranění kontaminujících látek z vodného prostředí, ale fotokatalýza je také použitelná jako dezinfekční prostředek.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DE LASA, Hugo I., Benito. SERRANO a Miguel. SALAICES. *Photocatalytic reaction engineering*. New York: Springer, c2005. ISBN 0387234500.
- [2] HERRMANN, Jean-Marie. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today* [online]. 1999, **53**(1), 115-129 [cit. 2021-6-7]. ISSN 09205861. Dostupné z: doi:10.1016/S0920-5861(99)00107-8.
- [3] ŠOLC, Zdeňek, Vratislav VELICH. *Aplikovaná reakční kinetika*. První vydání. Pardubice: Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, 1989, 207 s. ISBN 80-85113-04-X.
- [4] ATKINS, Petr, Julio DE PAULA. *Atkins' Physical Chemistry*. Seventh Ed. Oxford: Oxford University Press, 2002. ISBN 0-19-879285-9.
- [5] LAN, Yucheng, Yalin LU a Zhifeng REN. Mini review on photocatalysis of titanium dioxide nanoparticles and their solar applications. *Nano Energy* [online]. 2013, **2**(5), 1031-1045 [cit. 2021-6-7]. ISSN 22112855. Dostupné z: doi:10.1016/j.nanoen.2013.04.002.
- [6] O'REGAN, Brian, Michael GRAETZEL a Donald FITZMAURICE. Optical electrochemistry. 2. Real-time spectroscopy of conduction band electrons in a metal oxide semiconductor electrode. *The Journal of Physical Chemistry* [online]. 1991, **95**(26), 10525-10528 [cit. 2021-6-29]. ISSN 0022-3654. Dostupné z: doi:10.1021/j100179a00.
- [7] KAWAHARA, Tetsuro, Yasuhiro KONISHI, Hiroaki TADA, Noboru TOHGE, Junji NISHII a Seishiro ITO. A Patterned TiO<sub>2</sub>(Anatase)/TiO<sub>2</sub>(Rutile) Bilayer-Type Photocatalyst: Effect of the Anatase/Rutile Junction on the Photocatalytic Activity. *Angewandte Chemie* [online]. 2002, **114**(15), 2935-2937 [cit. 2021-6-7]. ISSN 0044-8249. Dostupné z: doi:10.1002/1521-3757(20020802)114:152935::AID-ANGE29353.0.CO;2-6.
- [8] ZHANG, Liwu, Hanan H. MOHAMED, Ralf DILLERT a Detlef BAHNEMANN. Kinetics and mechanisms of charge transfer processes in photocatalytic systems: A review. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* [online]. 2012, **13**(4), 263-276 [cit. 2021-6-7]. ISSN 13895567. Dostupné z: doi:10.1016/j.jphotochemrev.2012.07.002.
- [9] Titanium-Oxide Photocatalysis. *Wayback Machine* [online]. Tokyo 193-8533, Japan, 2004 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20070112210620/http://www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech62.pdf>.

- [10] KURBAN, Hasan, Mehmet DALKILIC, Selçuk TEMIZ a Mustafa KURBAN. Tailoring the structural properties and electronic structure of anatase, brookite and rutile phase TiO<sub>2</sub> nanoparticles: DFTB calculations. *Computational Materials Science* [online]. 2020, **183** [cit. 2021-6-7]. ISSN 09270256. Dostupné z: doi:10.1016/j.commatsci.2020.109843.
- [11] LI, Xiaofang, Xiaofeng WU, Shengwei LIU, Yuhan LI, Jiajie FAN a Kangle LV. Effects of fluorine on photocatalysis. *Chinese Journal of Catalysis* [online]. 2020, **41**(10), 1451-1467 [cit. 2021-6-7]. ISSN 18722067. Dostupné z: doi:10.1016/S1872-2067(20)63594-X.
- [12] ZU, Meng, Xiaosong ZHOU, Shengsen ZHANG, Shangshu QIAN, Dong-Sheng LI, Xia-nhu LIU a Shanqing ZHANG. Sustainable engineering of TiO<sub>2</sub>-based advanced oxidation technologies: From photocatalyst to application devices. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2021, **78**, 202-222 [cit. 2021-6-7]. ISSN 10050302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2020.10.061.
- [13] HOCHMANNOVÁ, Libuše, Jarmila VYTRÁSOVÁ.: „Vliv nanočástic TiO<sub>2</sub> a ZnO na fotokatalytické a antimikrobiální účinky silikátových nátěrů“. *Chem. Listy*, 104, 940–944, 2010.
- [14] PHURUANGRAT, Anukorn, Sineenat SIRI, Paweena WADBUA, Somchai THONGTEM a Titipun THONGTEM. Microwave-assisted synthesis, photocatalysis and antibacterial activity of Ag nanoparticles supported on ZnO flowers. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [online]. 2019, **126**, 170-177 [cit. 2021-6-8]. ISSN 00223697. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpics.2018.11.007.
- [15] CHEN, Peng, Li GU, Xiudong XUE, Yingying SONG, Lianwen ZHU a Xuebo CAO. Facile synthesis of highly uniform ZnO multipods as the supports of Au and Ag nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2010, **122**(1), 41-48 [cit. 2021-6-29]. ISSN 02540584. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchemphys.2010.03.001.
- [16] PAWINRAT, Pongsapak, Okorn MEKASUWANDUMRONG a Joongjai PANPRANOT. Synthesis of Au–ZnO and Pt–ZnO nanocomposites by one-step flame spray pyrolysis and its application for photocatalytic degradation of dyes. *Catalysis Communications* [online]. 2009, **10**(10), 1380-1385 [cit. 2021-6-29]. ISSN 15667367. Dostupné z: doi:10.1016/j.cattcom.2009.03.002.
- [17] AGNIHOTRI, Shekhar, Devendra SILLU, Garima SHARMA a Raj Kumar ARYA. Photocatalytic and antibacterial potential of silver nanoparticles derived from pineapple waste: process optimization and modeling kinetics for dye removal. *Applied Nanoscience* [online].

2018, **8**(8), 2077-2092 [cit. 2021-6-29]. ISSN 2190-5509. Dostupné z: doi:10.1007/s13204-018-0883-9.

[18] FOURA, Ghania, Nawel CHOUCOU, Ahcène SOUALAH, Kahina KOUACHI, Matteo GUIDOTTI a Didier ROBERT. Fe-Doped TiO<sub>2</sub> Supported on HY Zeolite for Solar Photocatalytic Treatment of Dye Pollutants. *Catalysts* [online]. 2017, **7**(11) [cit. 2021-6-29]. ISSN 2073-4344. Dostupné z: doi:10.3390/catal7110344.

[19] ALSHEHRI, Abdulmohsen Ali a Maqsood Ahmad MALIK. Biogenic fabrication of ZnO nanoparticles using *Trigonella foenum-graecum* (Fenugreek) for proficient photocatalytic degradation of methylene blue under UV irradiation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2019, **30**(17), 16156-16173 [cit. 2021-6-29]. ISSN 0957-4522. Dostupné z: doi:10.1007/s10854-019-01985-8.

[20] DIN, Muhammad Imran, Rida KHALID, Jawayria NAJEEB a Zaib HUSSAIN. Fundamentals and photocatalysis of methylene blue dye using various nanocatalytic assemblies- a critical review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, **298** [cit. 2021-6-8]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2021.126567.

[21] GHOSH, Malini, Kyriakos MANOLI, Xin SHEN, Jihao WANG a Ajay K. RAY. Solar photocatalytic degradation of caffeine with titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* [online]. 2019, **377**, 1-7 [cit. 2021-6-27]. ISSN 10106030. Dostupné z: doi:10.1016/j.jphotochem.2019.03.029.

[22] SAKARKAR, Shruti, Shobha MUTHUKUMRAN a Veeriah JEGATHEESAN. Factors affecting the degradation of remazol turquoise blue (RTB) dye by titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) entrapped photocatalytic membrane. *Journal of Environmental Management* [online]. 2020, **272** [cit. 2021-6-27]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2020.111090.

[23] MOZIA, Sylwia. Photocatalytic membrane reactors (PMRs) in water and wastewater treatment. A review. *Separation and Purification Technology* [online]. 2010, **73**(2), 71-91 [cit. 2021-6-8]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2010.03.021.

[24] ABDELLAH, M.H., S.A. NOSIER, A.H. EL-SHAZLY a A.A. MUBARAK. Photocatalytic decolorization of methylene blue using TiO<sub>2</sub>/UV system enhanced by air sparging. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2018, **57**(4), 3727-3735 [cit. 2021-6-26]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2018.07.018.



- [25] KHAN, Muhammad Isa, Muhammad Naseem AKHTAR, Naveed ASHRAF, Jawayria NAJEEB, Hira MUNIR, Tahir Iqbal AWAN, Muhammad Bilal TAHIR a Mohammad Reda KABLI. Green synthesis of magnesium oxide nanoparticles using Dalbergia sissoo extract for photocatalytic activity and antibacterial efficacy. *Applied Nanoscience* [online]. 2020, **10**(7), 2351-2364 [cit. 2021-6-29]. ISSN 2190-5509. Dostupné z: doi:10.1007/s13204-020-01414-x.
- [26] LEI, Yun, Jiajia DING, Pengfei YU, Guangyu HE, Yanguang CHEN a Haiqun CHEN. Low-temperature preparation of magnetically separable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO-RGO for high-performance removal of methylene blue in visible light. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2020, **821** [cit. 2021-6-29]. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2019.153366.
- [27] ARIZA-TARAZONA, Maria Camila, Juan Francisco VILLARREAL-CHIU, Juan Manuel HERNÁNDEZ-LÓPEZ, Javier RIVERA DE LA ROSA, Virginia BARBIERI, Cristina SILIGARDI a Erika Iveth CEDILLO-GONZÁLEZ. Microplastic pollution reduction by a carbon and nitrogen-doped TiO<sub>2</sub>: Effect of pH and temperature in the photocatalytic degradation process. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2020, **395** [cit. 2021-6-27]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122632.
- [28] OSUNTOKUN, Jejenija, Damian C. ONWUDIWE a Eno E. EBENSO. Green synthesis of ZnO nanoparticles using aqueous Brassica oleracea L. var. italica and the photocatalytic activity. *Green Chemistry Letters and Reviews* [online]. 2019, **12**(4), 444-457 [cit. 2021-6-29]. ISSN 1751-8253. Dostupné z: doi:10.1080/17518253.2019.1687761.
- [29] SUDAKOVA, Daria, Jiří PALARČÍK. Vliv intenzity záření a fotokatalyzátoru na odstranění methylenové modři z vodného roztoku. In *Studentská vědecká odborná činnost 2019/2020 : sborník příspěvků*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2020. s. 201-205 s. ISBN 978-80-7560-333-3.
- [30] ZU, Meng, Xiaosong ZHOU, Shengsen ZHANG, Shangshu QIAN, Dong-Sheng LI, Xianhu LIU a Shanqing ZHANG. Sustainable engineering of TiO<sub>2</sub>-based advanced oxidation technologies: From photocatalyst to application devices. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2021, **78**, 202-222 [cit. 2021-6-7]. ISSN 10050302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2020.10.061.
- [31] LI, Chao, Weiyi YANG a Qi LI. TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts prepared by oxidation of TiN nanoparticles and their photocatalytic activities under visible light illumination. *Journal of*

*Materials Science & Technology* [online]. 2018, **34**(6), 969-975 [cit. 2021-6-29]. ISSN 10050302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2017.06.010.

[32] NATARAJAN, Kalithasan, Thillai Sivakumar NATARAJAN, H.C. BAJAJ a Rajesh J. TAYADE. Photocatalytic reactor based on UV-LED/TiO<sub>2</sub> coated quartz tube for degradation of dyes. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2011, **178**, 40-49 [cit. 2021-6-29]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2011.10.007.

[33] HARUN, N.H., RAHMAN, M.N.A, KAMARUDIN, W.F.K, IRWAN Z., MUHAMMUD, A., AKHIR, N.E.F.M., YAAFAR, M.R. Photocatalytic degradation of Congo red dye based on titanium dioxide using solar and UV lamp J. Funda. Appl. Sci., 10 (2018), pp. 832-846 dostupne z <https://www.ajol.info/index.php/jfas/article/view/168470>.

[34] SHAHAM-WALDMANN, Nurit a Yaron PAZ. Away from TiO<sub>2</sub>: A critical minireview on the developing of new photocatalysts for degradation of contaminants in water. *Materials Science in Semiconductor Processing* [online]. 2016, **42**, 72-80 [cit. 2021-6-28]. ISSN 13698001. Dostupné z: doi:10.1016/j.mssp.2015.06.068.

[35] WAGHMODE, Meghmala S., Aparna B. GUNJAL, Javed A. MULLA, Neha N. PATIL a Neelu N. NAWANI. Studies on the titanium dioxide nanoparticles: biosynthesis, applications and remediation. *SN Applied Sciences* [online]. 2019, **1**(4) [cit. 2021-6-29]. ISSN 2523-3963. Dostupné z: doi:10.1007/s42452-019-0337-3.

[36] KONSTANTINOOU, Ioannis K a Triantafyllos A ALBANIS. TiO<sub>2</sub>-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: kinetic and mechanistic investigations. *Applied Catalysis B: Environmental* [online]. 2004, **49**(1), 1-14 [cit. 2021-6-28]. ISSN 09263373. Dostupné z: doi:10.1016/j.apcatb.2003.11.010.

[37] GOPINATH, Kannappan Panchamoorthy, Nagarajan Vikas MADHAV, Abhishek KRISHNAN, Rajagopal MALOLAN a Goutham RANGARAJAN. Present applications of titanium dioxide for the photocatalytic removal of pollutants from water: A review. *Journal of Environmental Management* [online]. 2020, **270** [cit. 2021-6-28]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2020.110906.

[38] MAHDAVI, Shahriar, Mohsen JALALI a Abbas AFKHAMI. HEAVY METALS REMOVAL FROM AQUEOUS SOLUTIONS USING TiO<sub>2</sub>, MgO, AND Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NANOPARTICLES. *Chemical Engineering Communications* [online]. 2013, **200**(3), 448-470 [cit. 2021-6-28]. ISSN 0098-6445. Dostupné z: doi:10.1080/00986445.2012.686939.

- [39] SKUBAL, L.R. a N.K. MESHKOV. Reduction and removal of mercury from water using arginine-modified TiO<sub>2</sub>. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* [online]. 2002, **148**(1-3), 211-214 [cit. 2021-6-28]. ISSN 10106030. Dostupné z: doi:10.1016/S1010-6030(02)00045-X.
- [40] GULLIPILLI, Sandhya a Ravichandra Babu RUPAKULA. Adsorption studies of Cr(VI) and Cu(II) metal ions from aqueous solutions by synthesized Ag and Mg co-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Separation Science and Technology* [online]. 2019, **54**(18), 2983-2992 [cit. 2021-6-28]. ISSN 0149-6395. Dostupné z: doi:10.1080/01496395.2018.1555594.
- [41] DA SILVA, Evandro B., Wendy A. MUSSOLINE, Ann C. WILKIE a Lena Q. MA. Anaerobic digestion to reduce biomass and remove arsenic from As-hyperaccumulator *Pteris vittata*. *Environmental Pollution* [online]. 2019, **250**, 23-28 [cit. 2021-6-28]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2019.03.117.
- [42] LIAN, Wanli, Li YANG, Stephen JOSEPH, et al. Utilization of biochar produced from invasive plant species to efficiently adsorb Cd (II) and Pb (II). *Bioresource Technology* [online]. 2020, **317** [cit. 2021-6-28]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2020.124011.
- [43] JONES, Oliver A., John N. LESTER a Nick VOULVOULIS. Pharmaceuticals: a threat to drinking water? *Trends in Biotechnology* [online]. 2005, **23**(4), 163-167 [cit. 2021-6-28]. ISSN 01677799. Dostupné z: doi:10.1016/j.tibtech.2005.02.001.
- [44] RATOLA, Nuno, Alessandra CINCINELLI, Arminda ALVES a Athanasios KATSOYIANNIS. Occurrence of organic microcontaminants in the wastewater treatment process. A mini review. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2012, **239-240**, 1-18 [cit. 2021-6-28]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2012.05.040.
- [45] JALLOULI, Nabil, Kais ELGHNIJI, Hassen TRABELSI a Mohamed KSIBI. Photocatalytic degradation of paracetamol on TiO<sub>2</sub> nanoparticles and TiO<sub>2</sub>/cellulosic fiber under UV and sunlight irradiation. *Arabian Journal of Chemistry* [online]. 2017, **10**, S3640-S3645 [cit. 2021-6-28]. ISSN 18785352. Dostupné z: doi:10.1016/j.arabjc.2014.03.014.
- [46] VELA, Nuria, Gabriel PÉREZ-LUCAS, José FENOLL a Simón NAVARRO. Recent Overview on the Abatement of Pesticide Residues in Water by Photocatalytic Treatment Using TiO<sub>2</sub>. JANUS, Magdalena, ed. *Application of Titanium Dioxide* [online]. InTech, 2017, 2017-07-26 [cit. 2021-6-28]. ISBN 978-953-51-3429-9. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.68802.

- [47] VELA, Nuria, May CALÍN, María J. YÁÑEZ-GASCÓN, Isabel GARRIDO, Gabriel PÉREZ-LUCAS, José FENOLL a Simón NAVARRO. Photocatalytic oxidation of six pesticides listed as endocrine disruptor chemicals from wastewater using two different TiO<sub>2</sub> samples at pilot plant scale under sunlight irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* [online]. 2018, **353**, 271-278 [cit. 2021-6-28]. ISSN 10106030. Dostupné z: doi:10.1016/j.jphotochem.2017.11.040.
- [48] FARNER BUDARZ, Jeffrey, Ellen M. COOPER, Courtney GARDNER, Emina HODZIC, P. Lee FERGUSON, Claudia K. GUNSCH a Mark R. WIESNER. Chlorpyrifos degradation via photoreactive TiO<sub>2</sub> nanoparticles: Assessing the impact of a multi-component degradation scenario. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2019, **372**, 61-68 [cit. 2021-6-28]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2017.12.028.
- [49] DALTON, J.S, P.A JANES, N.G JONES, J.A NICHOLSON, K.R HALLAM a G.C ALLEN. Photocatalytic oxidation of NO<sub>x</sub> gases using TiO<sub>2</sub>: a surface spectroscopic approach. *Environmental Pollution* [online]. 2002, **120**(2), 415-422 [cit. 2021-6-29]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/S0269-7491(02)00107-0.
- [50] JONES, A.P. Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment* [online]. 1999, **33**(28), 4535-4564 [cit. 2021-6-28]. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/S1352-2310(99)00272-1.
- [51] ROBBINS, Coreen A., Lonie J. SWENSON, Marrk L. NEALLEY, Bruce J. KELMAN a Ronald E. GOTS. Health Effects of Mycotoxins in Indoor Air: A Critical Review. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* [online]. 2010, **15**(10), 773-784 [cit. 2021-6-28]. ISSN 1047-322X. Dostupné z: doi:10.1080/10473220050129419.
- [52] HUANG, Yu, Steven HO, Yanfeng LU, Ruiyuan NIU, Lifeng XU, Junji CAO a Shuncheng LEE. Removal of Indoor Volatile Organic Compounds via Photocatalytic Oxidation: A Short Review and Prospect. *Molecules* [online]. 2016, 21(1) [cit. 2021-6-28]. ISSN 1420-3049. Dostupné z: doi:10.3390/molecules21010056.
- [53] MATHEW, Snehamol, Priyanka GANGULY, Stephen RHATIGAN, et al. Cu-Doped TiO<sub>2</sub>: Visible Light Assisted Photocatalytic Antimicrobial Activity. *Applied Sciences* [online]. 2018, **8**(11) [cit. 2021-6-29]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8112067
- [54] SIVASUBRAMANI, S. K., R. T. NIEMEIER, T. REPONEN a S. A. GRINSHPUN. Assessment of the aerosolization potential for fungal spores in moldy homes. *Indoor Air* [online].

2004, **14**(6), 405-412 [cit. 2021-6-29]. ISSN 09056947. Dostupné z: doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00262.x.

[55] AMORIM, Suélen Maria de, Joice Cristine SAPATIERI, Denise Esteves MORITZ, Michele Di DOMENICO, Leticia Alves da Costa LAQUA, Camilla Daniela MOURA-NICKEL, Gláucia Maria Falcão ARAGÃO a Regina de Fátima Peralta Muniz MOREIRA. Antifungal and Photocatalytic Activity of Smart Paint Containing Porous Microspheres of TiO<sub>2</sub>. *Materials Research* [online]. 2019, **22**(6) [cit. 2021-6-29]. ISSN 1980-5373. Dostupné z: doi:10.1590/1980-5373-mr-2019-0470.