

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra teorie obvodů  
Obor: Lékařská technika a bioinformatika



**Inaktivace bakterií pomocí oxidu  
titaničitého s využitím jeho  
fotokatalytických vlastností**

**Bacteria inactivation using  
photocatalytic properties of the titanium  
oxide**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Denis Stashkevich  
Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Jíra, CSc.  
Rok: 2022



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stashkevich** Jméno: **Denis** Osobní číslo: **491968**  
Fakulta/ústav **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**  
Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**

## I. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Inaktivace bakterií pomocí oxidu titaničitého s využitím jeho fotokatalytických vlastností**

Název bakalářské práce anglicky:

**Bacteria inactivation using photocatalytic properties of the titanium oxide**

Pokyny pro vypracování:

Výroba a aplikace různých druhů nanomateriálů a nanočástic zažívá bouřlivý rozvoj. Mezi tyto materiály patří také oxid titaničitý, který je využíván mimo jiné v potravinářství pro svou dobrou biokompatibilitu a antibakteriální vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou stimulovány zejména fotokatalyticky, a jejich prozkoumání bude náplní této práce. Pokyny k práci:

1. Prostudujte doporučenou literaturu a vypracujte přehled stavu problematiky.
2. Seznamte se s biocidními vlastnostmi oxidu titaničitého (TiO<sub>2</sub>) při využití jeho fotokatalytických vlastností vůči bakteriím *Escherichia coli* a *Staphylococcus aureus*.
3. Navrhněte a proveďte experimenty na bázi kultivace bakterií v roztoku a na Petriho miskách, jejichž cílem bude nalezení vhodných parametrů, jako je druh světelného zdroje, doba expozice a koncentrace TiO<sub>2</sub> v bakteriálním roztoku.
4. Zpracujte a analyzujte výsledky.

Seznam doporučené literatury:

E. Babaei, A. Dehnad et al.: *Applied Food Biotech.*, 2016, 3 (2):115-123, doi: 10.22037/afb.v3i2.10571  
K. Khashan, G. Sulaiman et al.: *Appl. Sci.* 2021, 11(10), 4623; doi: 10.3390/app11104623  
K. Gupta, R. Singh et al.: *Beilstein J. Nanotechnol.* 2013, 4, 345–351, doi: 10.3762/bjnano.4.40

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jaroslav Jíra, CSc. katedra fyziky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **24.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Jaroslav Jíra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....  
Denis Stashkevich

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Jaroslavovi Jírovi, CSc. za cenné připomínky, věcné rady, odborné vedení a pomoc při gramatické kontrole práce, dále pak panu Davidovi Rutherfordovi, Ph.D. za pomoc při výzkumné části práce. Nakonec srdečně děkuji své rodině a blízkým za neustálou podporu.

## **ABSTRAKT**

S rychlým rozvojem světového průmyslu, rostoucím znečištěním a vyčerpáním energetických zdrojů se zvýšilo povědomí o celosvětové krizi. V posledních letech zesílily snahy vyvinout účinnou metodu pro řešení těchto problémů. Mezi nimi je polovodičová fotokatalýza jednou z nejslibnějších technologií. Tato technologie ukazuje způsob, jak využít energii přirozeného slunečního světla nebo umělého osvětlení.

Dnes se oxid titaničitý používá jako vynikající ekologický a energetický fotokatalyzátor, včetně čištění vzduchu a vody, samočištění povrchu, antibakteriálního působení a separace vody. V současné době probíhají různé studie na zlepšení účinnosti fotokatalyzátoru oxidu titaničitého používaného pro fotokatalytické antibakteriální aplikace, včetně kombinace s kovovými ionty, ušlechtilými kovy, přísadami a dalšími materiály s nekovy. Modifikovaný fotokatalyzátor oxidu titaničitého významně inhibuje růst bakteriálních buněk v reakci na osvětlení viditelným světlem.

## **ABSTRACT**

With the rapid development of world industry, growing pollution and depletion of energy resources, awareness of the global crisis has increased. In recent years, attempts have intensified to develop an effective method for solving these problems. Among them, photocatalysis of semiconductors is one of the most promising technologies. This technology shows a way to use the energy of natural sunlight or artificial lighting.

Today, titanium dioxide is used as an excellent environmental and energy photocatalyst, including air and water purification, surface self-cleaning, antibacterial action, and water separation. Various studies are currently underway to improve the efficiency of titanium dioxide photocatalyst used for photocatalytic antibacterial applications, including combination with metal ions, noble metals, additives, and other materials with non-metals. The modified titanium dioxide photocatalyst significantly inhibits the growth of bacterial cells in response to visible light illumination.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotokatalýza, oxid titaničitý, ultrafialové světlo, inaktivace bakterií, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*

## **KEYWORDS**

Photocatalysis, titanium dioxide, ultraviolet light, bacterial inactivation, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*

# Obsah

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1	ÚVOD.....	1
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	2
2.1	Fotokatalýza.....	3
2.1.1	Objev fotokatalýzy.....	4
2.1.2	Světlo a spektra.....	5
2.1.3	Fotokatalytický proces na povrchu polovodiče.....	6
2.1.4	Použití fotokatalýzy.....	6
2.1.5	Fotokatalytický antibakteriální efekt.....	8
2.1.6	Sterilizující efekt.....	9
2.2	Oxid titaničitý.....	10
2.2.1	Hlavní polymorfní modifikace TiO <sub>2</sub> a jejich vlastnosti.....	10
2.2.2	Metody syntézy TiO <sub>2</sub> .....	12
2.2.3	Fotokatalytický efekt TiO <sub>2</sub> .....	13
2.2.4	Metody zesílení fotokatalytických vlastností TiO <sub>2</sub> .....	13
2.2.5	Použití TiO <sub>2</sub> .....	14
2.3	Bakterie.....	15
2.3.1	Gramnegativní a grampozitivní bakterie.....	16
2.3.2	Rod Escherichia.....	17
2.3.3	Rod staphylococcus.....	18
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	20
3.1	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ A CHEMIKÁLIE.....	20
3.1.1	Použitá zařízení.....	20
3.1.2	Použité chemikálie.....	20
3.1.3	Použitý software.....	20
3.2	Použité mikroorganismy.....	20
3.3	Metodika práce.....	20
3.3.1	Příprava kultivačního média.....	21
3.3.2	Příprava bakteriálního roztoku.....	21
3.3.3	Příprava konstrukcí pro experimenty.....	21
3.3.4	První experiment.....	21
3.3.5	Druhý experiment.....	22
3.3.6	Třetí experiment.....	24
4	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	26
4.1	CFU.....	26
4.2	Měření růstu bakterií.....	26
4.3	Inaktivace předem aktivovaným oxidem titaničitým.....	27
4.4	Inaktivace bakterií za přítomnosti TiO <sub>2</sub> v roztoku.....	29
4.5	OD.....	30
4.6	Inaktivace bakterií v bioreaktorech.....	31



4.6.1	Inaktivace <i>E.coli</i> v bioreaktorech .....	32
4.6.2	Inaktivace <i>S.aureus</i> v bioreaktorech .....	33
5	ZÁVĚR.....	35
6	SEZNAM LITERATURY .....	36



# Seznam použitých zkratek

<b>UV</b>	Ultrafialové světlo
<b>TBC</b>	Tuberkulóza
<b>ATB</b>	Antibiotika
<b>ROS</b>	Reaktivní formy kyslíku (Reactive Oxygen Species)
<b>PCB</b>	Polychlorované bifenyly
<b>LED</b>	Elektroluminiscenční dioda (Light-Emitting Diode)
<b>CFU</b>	Jednotky tvořící kolonie (Colony Forming Units)
<b>OD</b>	Absorbance (Optical Density)
<b>OBR</b>	Obrázek

# Seznam obrázků

1. Procesy na povrchu fotokatalyzátoru [36] .....	2
2. Honda–Fujishima efekt - štěpení vody pomocí TiO <sub>2</sub> [9].....	3
3. Světelné spektrum [37] .....	5
4. Schematické zobrazení fotofyzikálních procesů na polovodiči [46].....	6
5. Oblasti využití fotokatalýzy.....	6
6. Antibakteriální efekt TiO <sub>2</sub> na různé mikroorganismy [38].....	8
7. Chemické reakce na povrchu TiO <sub>2</sub> za přítomnosti mikroorganismů [39] .....	9
8. Fotokatalytické působení TiO <sub>2</sub> .....	10
9. Rutilová modifikace TiO <sub>2</sub> [32] .....	11
10. Anatasová modifikace TiO <sub>2</sub> [32] .....	11
11. Fotokatalytické procesy na povrchu TiO <sub>2</sub> .....	13
12. Různé typy bakterií [40] .....	15
13. Čárkové, vývrtové a spirálové tvary bakterií [41].....	16
14. Struktura grampozitivních a gramnegativních bakterií [42].....	17
15. Struktura <i>E.coli</i> [43] .....	18
16. Struktura a tvar <i>S. Aureus</i> [44, 45] .....	19
17. Kádinka s roztokem TiO <sub>2</sub> vystaveným UV světlu .....	22
18. Zkumavky umístěné v inkubátoru pod UV světlem.....	23
19. Zkumavky vystavené UV světlu v sterilním boxu .....	24
20. Plastové zkumavky s otvorem pro lepší pronikání LED světla.....	25
21. Zkumavky v bioreaktorech bez působení LED světla .....	25
22. Fáze života bakterií .....	27
23. Petriho misky s koloniemi <i>E.coli</i> .....	28
24. Zprůměrované hodnoty CFU pro <i>E.coli</i> .....	28
25. Růstové křivky <i>E.coli</i> .....	29
26. Růstové křivky <i>S.aureus</i> .....	30
27. Spektrální charakteristika použitého světla.....	31
28. Křivky absorbance <i>E.coli</i> .....	32
29. Křivky absorbance <i>S.aureus</i> .....	33
30. Hodnoty CFU pro <i>S.aureus</i> .....	33
31. Petriho misky s kolonií <i>S.aureus</i> .....	34
32. Diagram porovnání účinků působení světla a TiO <sub>2</sub> na <i>S.aureus</i> .....	34

# 1 ÚVOD

Antimikrobiální rezistence vůči některým antibiotikům a toxicita některých organických antimikrobiálních látek pro lidský organismus stále zvyšuje zájem o vývoj anorganických antimikrobiálních látek pro omezení šíření a účinnou léčbu bakteriálních infekcí. Mezi těmito sloučeninami přitahují významnou pozornost sloučeniny kovů a oxidů kovů díky svým širokospektrálním antibakteriálním aktivitám.

V posledních desetiletích díky svým výrazným fyzikálně-chemickým vlastnostem v biologických aplikacích byly široce používány nanočástice oxidů kovů, jako je oxid zinečnatý (ZnO), oxid manganu (MgO), oxid titaničitý (TiO<sub>2</sub>) a oxid železitý (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Mezi antimikrobiálními činidly na bázi oxidů kovů je TiO<sub>2</sub>, který je cenným polovodičovým materiálem vykazujícím speciální vlastnosti, jako je snadná kontrola, snížená cena, netoxicity a dobrá odolnost proti chemické erozi, které umožňují jeho použití v optice, solárních článcích, elektronice a mikrobiologii. Obecně se nanočástice TiO<sub>2</sub> vyznačují velkým povrchem, výbornou povrchovou morfologií a netoxicitou.

Antimikrobiální aktivita nanočástic je vysoce ovlivněna několika vnitřními faktory, jako je jejich morfologie, velikost, chemie, zdroj a nanostruktura. Konkrétně antimikrobiální aktivita TiO<sub>2</sub> je značně závislá na fotokatalytickém výkonu TiO<sub>2</sub>, který silně závisí na jeho morfologických, strukturních a texturních vlastnostech.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

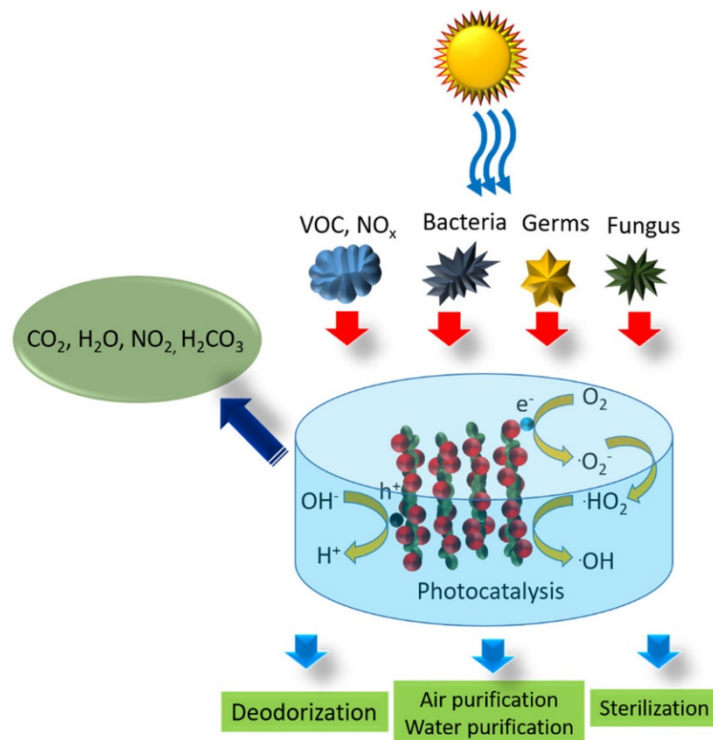
### 2.1 FOTOKATALÝZA

Fotokatalýzou (z řečtiny - "katalýza" (zničení) a "fotos" (světlo)) nazýváme změnu rychlosti nebo excitace chemických reakcí působením světla za přítomnosti fotokatalyzátorových látek, které absorbují světelná kvanta a podílejí se na chemických přeměnách reagentů, opakovaně s nimi vstupují do interakčních interakcí a po každém cyklu interakcí regenerují svoje chemické složení.

Fotokatalytické procesy lze realizovat za různých podmínek. Proto by homogenní a heterogenní fotokatalytické reakce měly být zvažovány odděleně. Homogenní fotokatalytické reakce probíhají za účasti iontů vzniklých při přenosu elektronu z excitovaného senzibilizátoru na akceptor.

Na povrchu pevných částic katalyzátoru probíhají heterogenní fotokatalytické reakce (Obr. č. 1), přičemž látky s nimi interagující mohou být jak v kapalně, tak v plynné fázi. Je třeba poznamenat, že existují dvě zásadně odlišné možnosti implementace procesu. V první variantě dochází k absorpci elektromagnetického záření molekulou látky za vzniku meziprojektu, který interaguje s částicí katalyzátoru. Tyto procesy jsou v podstatě podobné procesům probíhajícím při homogenní fotokatalýze [5, 9, 13].

Ve druhém případě, který se nejčastěji vyskytuje v případě heterogenní fotokatalýzy, je záření absorbováno částicemi katalyzátoru. Absorpce kvanta světla způsobuje fyzikální procesy vedoucí k výskytu redoxních reakcí na povrchu těchto částic [5, 9].



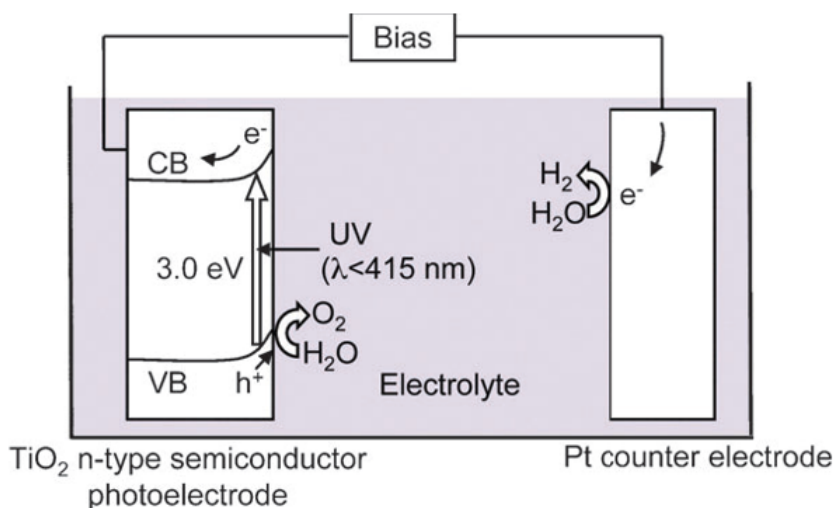
Obr. 1: Procesy na povrchu fotokatalyzátoru

## 2.1.1 Objev fotokatalýzy

V roce 1911 se ve vědecké literatuře poprvé objevilo klíčové slovo „fotokatalýza“. Vědci odkazovali na bělení pruskou modří pomocí ZnO při iluminační fotokatalýze. Toto pozorování inspirovalo následné experimenty s použitím ZnO jako fotokatalyzátor pro další reakce, jako je redukce  $\text{Ag}^+$  na  $\text{Ag}^-$  při ozařování v roce 1924. Je třeba poznamenat, že ačkoli byly fotosenzitivní reakce objeveny dlouho před těmito snahami, tyto procesy nezahrnovaly světlocitlivý katalyzátor [12].

Později bylo zjištěno, že  $\text{TiO}_2$  a  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  řídí fotokatalytickou redukci  $\text{AgNO}_3$  na  $\text{Ag}$  a  $\text{AuCl}_3$  na  $\text{Au}$  v roce 1932. Poté byl v roce 1938 zkoumán  $\text{TiO}_2$  jako fotosenzibilizátor k bělení barviv za přítomnosti  $\text{O}_2$ . Nicméně zájem o fotokatalýzu zůstal koníčkem kvůli nedostatku běžných praktických aplikací. Situace se změnila na začátku 70. let ze dvou důvodů. Zaprvé, „ropná krize“ přiměla vědce ke hledání alternativních dodávek energie k fosilním palivům. Zadruhé, obavy z dopadů velkých průmyslových provozů na životní prostředí motivovaly výzkumníky k hledání obnovitelných zdrojů energie. Během tohoto období bylo publikováno několik zásadních článků [12].

V roce 1972 oznámily Fujishima a Honda fotoasistovanou oxidaci  $\text{H}_2\text{O}$  s produkcí  $\text{H}_2$  pomocí elektrod  $\text{TiO}_2$  pod ozařováním UV světlem. Podobně, fotokatalytické štěpení vody pro výrobu vodíku ( $\text{H}_2$ ) a kyslíku ( $\text{O}_2$ ) v atmosféře argonu ve stechiometrickém poměru 2:1 bylo hlášeno v roce 1977. Princip takové metody je ukázán na Obr. č. 2. Je zajímavé, že v této práci bylo zjištěno, že se tvořil  $\text{O}_2$ , ale vývoj  $\text{H}_2$  byl inhibován v přítomnosti  $\text{N}_2$ . Autoři dospěli k závěru, že  $\text{N}_2$  byl redukován na  $\text{NH}_3$  a na stopové množství  $\text{N}_2\text{H}_4$  pomocí  $\text{TiO}_2$ . Tyto rané snahy rozšířily aplikace fotokatalýzy a přitáhly významnou výzkumnou pozornost v 80. letech 20. století na podobné reakce využívající zejména nanočástice  $\text{TiO}_2$  jako fotokatalyzátor. Od této doby se výzkum soustředil na pochopení základních principů, zvýšení fotokatalytické účinnosti, hledání nových fotokatalyzátorů a rozšíření rozsahu reakcí. Například fotoindukovaný superhydrofilní efekt byl objeven na  $\text{TiO}_2$  v roce 1997. V důsledku toho byl na stavební materiály aplikován  $\text{TiO}_2$  se samočisticími funkcemi a funkcemi proti zamlžování [12, 13].



Obr. 2: Honda–Fujishima efekt - štěpení vody pomocí  $\text{TiO}_2$  fotoelektrody

Při vývoji nových fotokatalyzátorů bylo prozkoumáno mnoho kandidátů s vyšší fotokatalytickou aktivitou než  $\text{TiO}_2$ , z nichž většina se vyznačuje širokým zákazným pásmem a je aktivní pouze pod UV světlem. Pro vyšší účinnost byly paralelně sledovány fotokatalyzátory absorbující viditelné světlo. Mezitím se výzkumníci postupně dozvěděli více o principech, kterými se řídí fotokatalýza, o kterých bude řeč později v tomto přehledu.

### 2.1.2 Světlo a spektra

Světlo je elektromagnetické vlnění ve viditelném spektru (Obr. č. 3). Viditelné spektrum zahrnuje elektromagnetické vlny ve frekvenčním rozsahu vnímaném lidským okem, tedy s vlnovou délkou 390 až 750 nanometrů.

Ve fyzice má pojem „světlo“ poněkud širší význam a je synonymem pro optické záření, to znamená, že zahrnuje infračervenou a ultrafialovou oblast spektra.

Jako libovolné elektromagnetické vlnění, světlo je charakterizováno frekvencí, vlnovou délkou, polarizací a intenzitou. Rychlost šíření světla v látce závisí na vlastnostech látky a je obecně menší než rychlost světla ve vakuu. Vlnová délka souvisí s frekvencí podle zákona rozptylu, který také určuje rychlost světla v médiu [6, 7].

Vyzařování a absorpce světla se děje kvanty: fotony, jejichž energie závisí na frekvenci:

$$E = h\nu$$

, kde  $E$  – kvantová energie,  $\nu$  – frekvence,  $h$  – Planckova konstanta

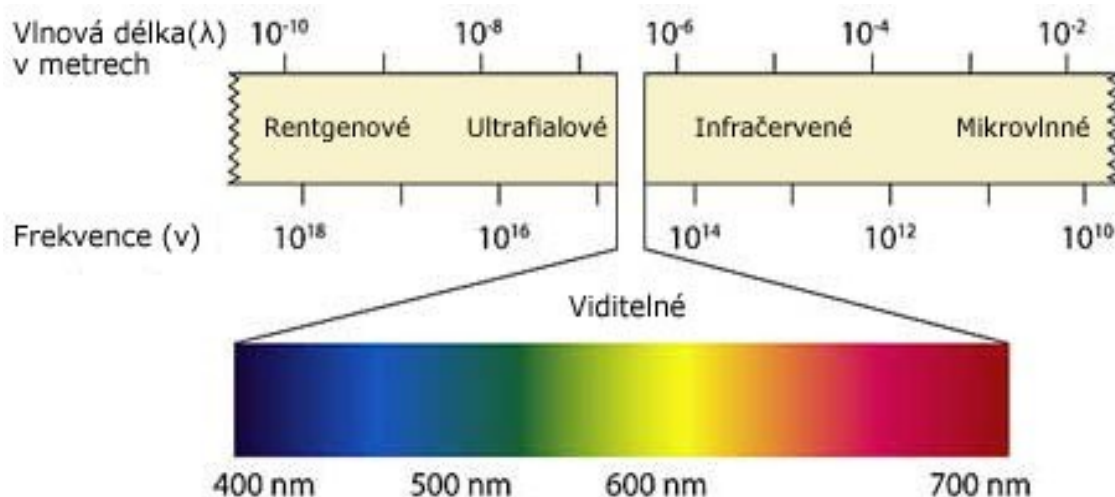
Při interakci elektromagnetického záření s látkou (při průchodu nebo odrazu) může dojít k pohlcení některých částí elektromagnetického spektra. Obdobně je možné, že určitý druh látky vyzařuje pouze určité části elektromagnetického spektra.

Spektra atomů plynů často obsahují pouze sadu ostrých čar, mezi kterými se nachází tmavé (neosvětlené) pásy. Taková spektra se označují jako čárová. Jednotlivé části čárového spektra získané jeho rozkladem se nazývají spektrální čáry. Spektrální čáry lze pozorovat při přechodech mezi energetickými hladinami atomů.

Pokud spektrum obsahuje sadu širších pruhů, jedná se o pásové spektrum. Pásy jsou tvořeny vzájemně se překrývajícími spektrálními čarami, které nelze vzájemně odlišit. Pásová spektra jsou obvykle pozorována u molekul [6, 7].

Pokud záření vznikne v určité látce (např. v zahřáté kapalině), hovoří se o spektru emisním. Emisní spektra prvků a jednoduchých látek jsou obvykle tvořena sadou spektrálních čar na tmavém pozadí. Pokud pozorujeme spektrum, které vzniklo absorpcí (průchodem) bílého světla určitou látkou, pak mluvíme o spektru absorpčním. Absorpční spektrum dané látky je vlastně doplňkem jejího emisního spektra. Tam, kde se u absorpčního čárového spektra nachází tmavé pruhy, jsou u emisního spektra stejné látky spektrální čáry a naopak [6, 7].





Obr. 3: Světelné spektrum

### 2.1.3 Fotokatalytický proces na povrchu polovodiče

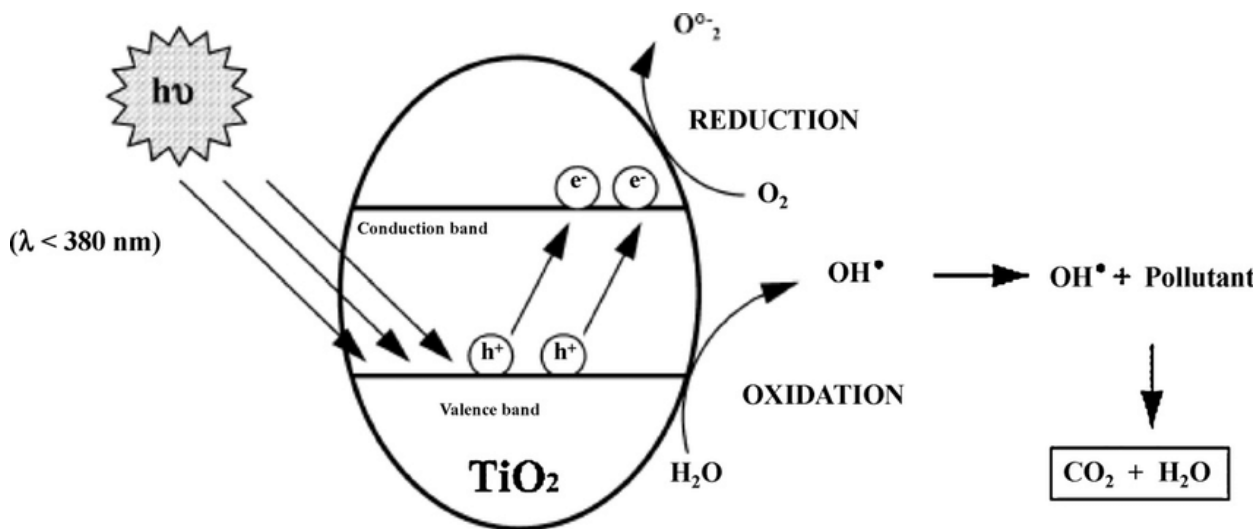
V polovodičích se elektrony mohou nacházet ve dvou stavech: volném a vázaném. Ve většině případů jsou elektrony vázány, což znamená, že jsou spojené s iontem krystalové mřížky látky, čímž vzniká silná chemická vazba.

Abychom dokázali „vytáhnout“ elektron z krystalové mřížky, je nutné použít alespoň 3,2 elektronvoltů (eV) energie (pro srovnání, kinetická energie létajícího komára je asi bilion eV). Právě toto množství energie nese kvanta světla o vlnové délce menší než 390 nm. Takže kvantum světla „vyrazí“ elektron z mřížky a vytváří elektronové prázdné místo, nebo jednodušeji „díru“ [27, 28].

Elektron (e-) a díra (h+) se aktivně pohybují uvnitř polovodičové částice. V důsledku pohybu se buď rekombinují, nebo vyrazí na povrch a jsou jím okamžitě zachyceny. Výše uvedené procesy jsou označeny na Obr. č. 4.

"Díra" a elektron jsou neuvěřitelně reaktivní. Celý povrch katalyzátoru je silným polem oxidace. Při kontaktu s povrchem katalyzátoru kyslík, přijímající volný elektron, umožňuje vznik oxidačního radikálu O-, který je schopen zničit (oxidovat) jakoukoli organickou sloučeninu. „Díra“ zase sama reaguje s první organickou sloučeninou, na kterou narazí na povrchu. „Díra“ vytáhne chybějící elektrony ze struktury sloučeniny, čímž se samotná sloučenina rozpadne na vodu a oxid uhličitý [27, 28].

Pokaždé, aby se nahradily "použité" páry, elektron - "díra" stoupá na povrch katalyzátoru a oxidační proces bude pokračovat, dokud bude na katalyzátor působit světlo [27, 28].

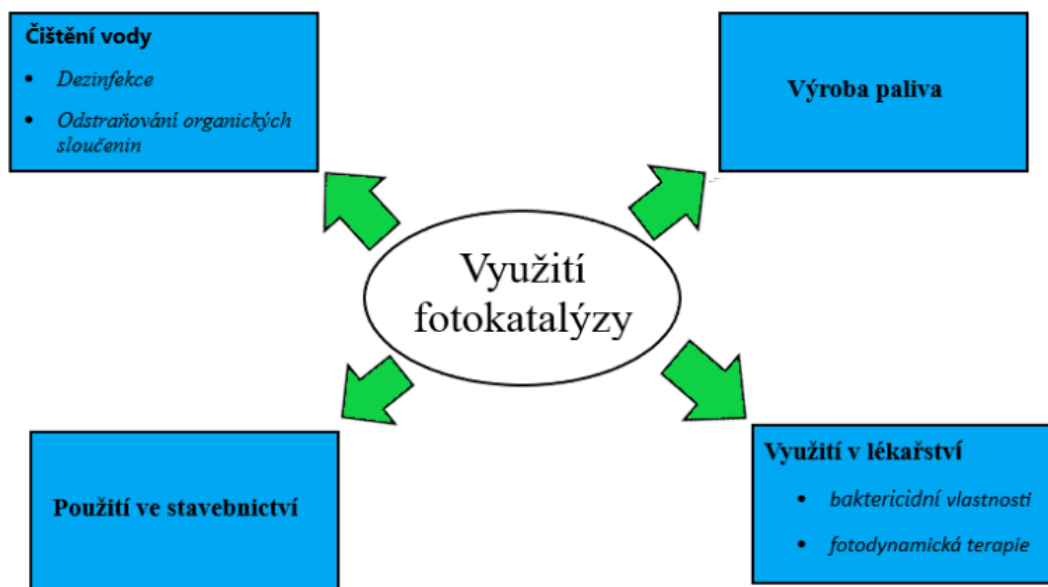


Obr. 4: Schematické zobrazení fotofyzikálních procesů na polovodiči

### 2.1.4 Použití fotokatalýzy

Fotokatalýza je levná a potenciální „autonomní“ technologie. Protože využívá sluneční nebo ultrafialové záření, je tato technologie levná, šetrná k životnímu prostředí a lze ji použít po celém světě. Pro fotokatalýzu je potřeba minimální vybavení, které může být vhodné pro rozvojové země, protože ji lze použít ve vzdálených místech bez přístupu k elektrině.

Fotokatalytické procesy se používají v různých oblastech, některé z nich jsou znázorněny na Obr. č. 5.



Obr. 5: Oblasti využití fotokatalýzy

## Dezinfekce

Dezinfekce je jedním z nejrychleji rostoucích segmentů trhu se širokým uplatněním nových technologií. Fotokatalýza s využitím nanokatalyzátorů je perspektivní dezinfekční metodou. Kromě toho mohou fotokatalyzátory v kombinaci s filtračními membránami snížit zanášení membrány, a tím výrazně zlepšit účinnost úpravy vody. Malé fotokatalytické systémy s umělým ultrafialovým světlem jsou na trhu již několik let, zatímco solární fotokatalytické čistírny jsou ve fázi demonstrací a pilotní projekty na úpravu pitné vody v rozvojových zemích právě začaly [20, 21].

## Odstraňování organických sloučenin

Fotokatalýza se používá k rozkladu organických sloučenin jako jsou alkoholy, karboxylové kyseliny, fenolické nebo chlorované aromatické sloučeniny na neškodné produkty jako je oxid uhličitý, voda a jednoduché minerální kyseliny. Vodu znečištěnou olejem také lze účinně upravovat pomocí fotokatalytické technologie [20, 21].

## Odstraňování těžkých kovů

Kovy jako rtuť (Hg), chrom (Cr), olovo (Pb) a další jsou považovány za velmi zdraví nebezpečné. Tyto kovy lze nalézt ve vodě jak v iontové formě, tak i ve formě stabilních komplexů, například s humáty, které k odstranění vyžadují předběžnou oxidační degradaci. Aplikace heterogenní fotokatalýzy zahrnují odstraňování těžkých kovů, jako je rtuť (Hg), chrom (Cr), olovo (Pb), kadmium (Cd), arsen (As), nikl (Ni) a měď (Cu) převedením ve vodě rozpustných iontů oxidací nebo redukcí do jiného oxidačního stavu s následným vysrážením ve formě hydroxidů a oxidů [20, 21].

## Výroba paliva

Kromě zlepšování kvality vody je důležitou oblastí poskytování čisté a obnovitelné energie, zejména v souvislosti s růstem spotřeby fosilní energie a zvyšováním obsahu CO<sub>2</sub> v atmosféře. Výroba „solárních“ paliv pomocí přeměny sluneční energie na chemikálie je slibným přístupem k vytváření dostupné a obnovitelné energie. Proces získávání paliva lze realizovat fotokatalytickou redukcí H<sub>2</sub>O na H<sub>2</sub> nebo CO<sub>2</sub> na uhlovodíky, které se také říká umělá fotosyntéza [18].

## Medicína



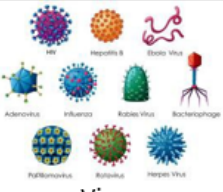


Fotokatalytický proces se využívá i v medicíně. Japonští vědci detailně prostudovali schopnost nanočástic TiO<sub>2</sub> ničit mikroby, viry a bakterie. Montérky pro zdravotnický personál obsahují inkluze TiO<sub>2</sub> přidávané do tkaniny při její výrobě. Kromě toho byl vyvinut speciální TiO<sub>2</sub> pro antibakteriální účel, působící pod viditelným světlem. Například TiO<sub>2</sub> dopovaný sírou ukazuje efekt odstranění bakterií *Escherichia coli* při ozařování světlem běžně používaným v nemocnicích [23].

Použití fotokatalyzátorů při výrobě stavebních materiálů začalo na začátku 90. let. V oblasti fotokatalytických konstrukcí a stavebních materiálů je nejrozšířenějším fotokatalyzátorem oxid titaničitý.  $\text{TiO}_2$  se používá jako bílý pigment v barvách, kosmetice a potravinách, a kromě toho je kompatibilní s tradičními stavebními materiály, jako je cement, aniž by se změnila jakákoli původní charakteristika. Všechny vlastnosti  $\text{TiO}_2$  jsou hlavním důvodem k jeho použití ve stavebních materiálech pro exteriérové a interiérové dekorace, jako je cementová malta, venkovní obklady, dlažební kostky, sklo [19].

### 2.1.5 Fotokatalytický antibakteriální efekt

V současné době existují různé systémy obrany proti patogenním mikroorganismům, například vakcíny, léky proti TBC, dezinfekční prostředky, hygienické postupy, dezinfekce a sterilizace. Tyto ochranné systémy jsou velmi účinné, ale neúplně. Mikroorganismy se vyvíjejí, vytvářejí si rezistenci k ATB a výzkum a vývoj trvá několik let, než se objeví nové a účinné antibiotikum proti mikroorganismům. Od objevu heterogenní fotokatalýzy a  $\text{TiO}_2$  došlo k velké revoluci v odstraňování mikroorganismů. Objev přinesl řadu výhod, finanční náklady nebyly tak vysoké, nedošlo k negativnímu vlivu na životní prostředí a byl prokázán fotokatalytický účinek na patogeny ve vodním prostředí [23].

Fotokatalýza je založena na redoxních vlastnostech fotogenerovaných nábojů zachycených na povrchu a vytvořených reaktivních forem kyslíku (ROS;  $\text{OH}\cdot$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2$  atd.). Existuje mnoho studií o cytotoxicitě reaktivních forem kyslíku fotogenerovaných na povrchu  $\text{TiO}_2$  působením UV záření. Jedním z nejtoxičtějších radikálů pro mikroorganismy je  $\text{OH}\cdot$  kvůli jeho schopnosti oxidovat mnoho organických substrátů, jako jsou sacharidy, lipidy, proteiny a nukleové kyseliny. Podporuje peroxidaci polynenasycené fosfolipidové složky lipidové membrány a způsobuje narušení buněčné membrány. Účinnost  $\text{TiO}_2$  na různé organismy a organické sloučeniny je znázorněna na Obr. č. 6 [23].

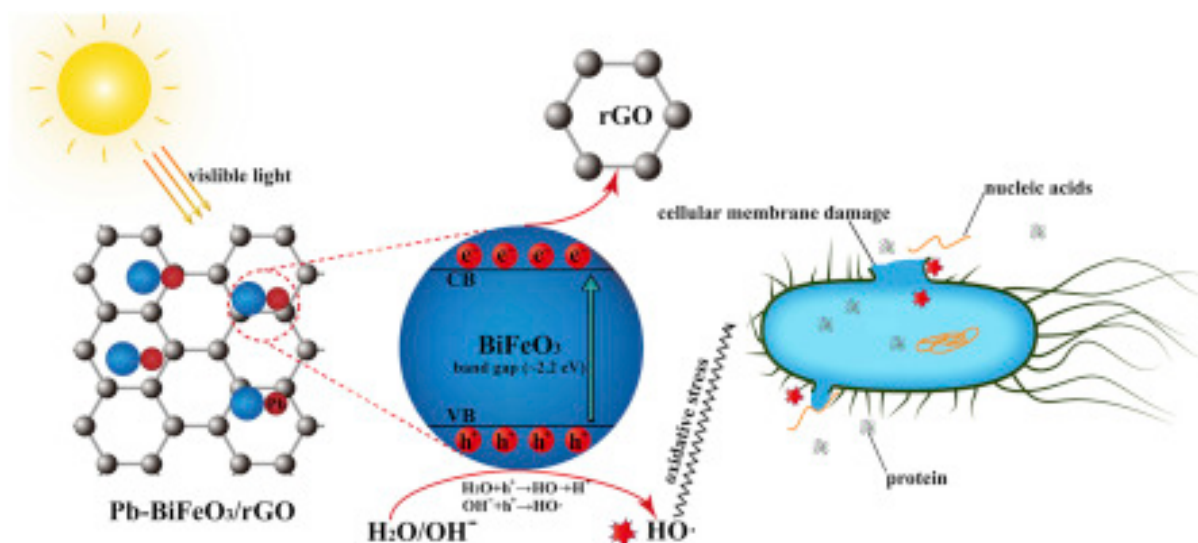
Objective	 Low molecular weight organic compound	 Macromolecule (protein, DNA)	 Virus	 Bacteria	 Cells
Photocatalysis effect	Degradation	Degradation	Degradation	Bacteriostatic and antibacterial effect	Anti-cancer effect

Obr. 6: Antibakteriální efekt  $\text{TiO}_2$  na různé mikroorganismy

## 2.1.6 Sterilizující efekt

Při kontaktu volných radikálů vzniklých fotokatalýzou s mikrobiologickým materiálem dochází k částečné degradaci buněčné stěny a následném průniku reaktivních forem kyslíku, které ničí cytoplazmatickou membránu, což může způsobit buněčnou smrt. Na fotokatalyticky upraveném povrchu tak dochází k oxidaci mikrobiálních buněk (Obr. č. 7), spór a biomolekul až na  $\text{CO}_2$ . Sterilizační účinek fotokatalyzátoru byl pravděpodobně poprvé pozorován Matsunagou a jeho týmem v roce 1985, kdy byly buňky *Lactobacillus acidophilus*, *Saccharomyces cerevisiae* a *Escherichia coli* fotoelektrochemicky usmrceny na oxidu titaničitém dopovaném platinou. Metodou zabíjení buněk je oxidace koenzymu A [20, 21].

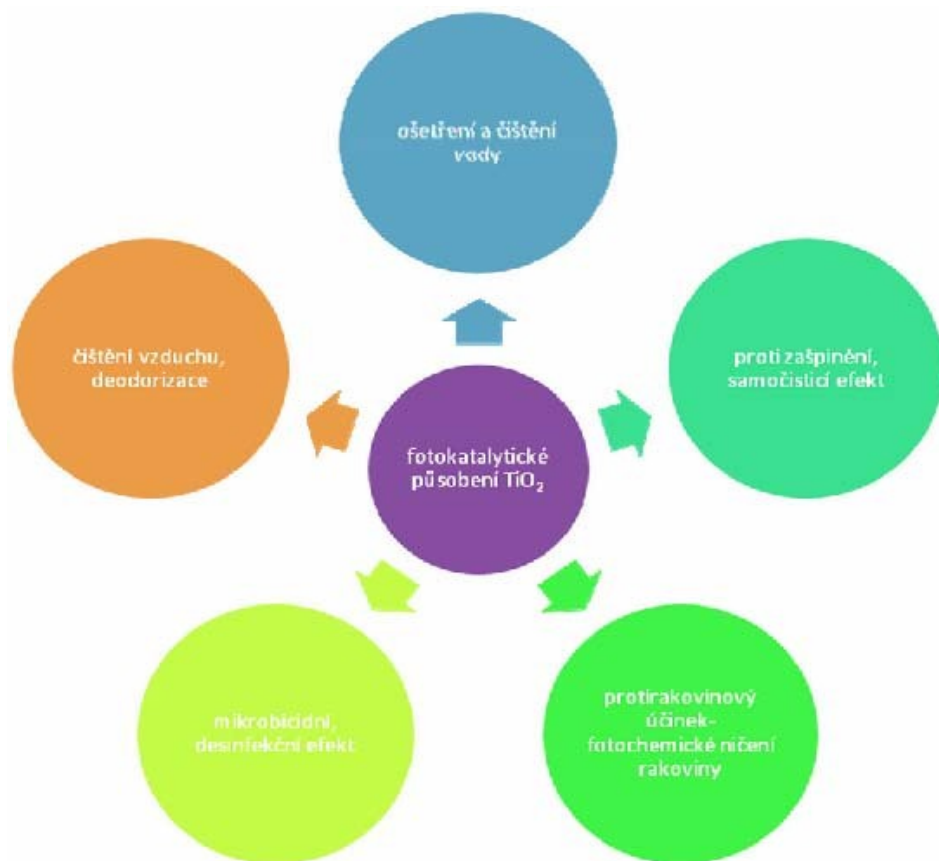
Postupně probíhají další studie zaměřené na studium antimikrobiálního účinku polovodiče  $\text{TiO}_2$ , který se osvědčil při zabíjení bakterií, virů, řas nebo rakovinných buněk vlivem UV záření. Oxid zinečnatý může být vhodným antimikrobiálním činidlem z několika důvodů. Jako polovodič vykazuje fotokatalytický antimikrobiální jev, jako sloučenina má biocidní účinky a ve formě nanočástic vykazuje vzhledem ke své malé velikosti určitou cytotoxicitu vůči mikroorganismům. Jak již bylo zmíněno dříve, přídavek stříbra do fotokatalyzátoru může mít také pozitivní vliv na zesílení baktericidního účinku při dostatečném osvětlení [20, 21].



Obr. 7: Chemické reakce na povrchu  $\text{TiO}_2$  za přítomnosti mikroorganismů

## 2.2 Oxid titaničitý

Oxid titaničitý ( $\text{TiO}_2$ ) je nanomateriál široce využívaný ve všech fotokatalytických aplikacích, uvedených na Obr. č. 8. Dioxid titanu má zakázané pásmo téměř 3,2 eV, kde vodivostní pás je tvořen orbitaly Ti 3d a valenční pás se skládá z orbitalů O 2p. Díky širokému pásmu může nedotčený  $\text{TiO}_2$  reagovat pouze pod ultrafialovým světlem, což je omezená část slunečního spektra (5 %). Navíc pro aplikace štěpení vody je potenciál vodivostního pásu  $\text{TiO}_2$  o něco menší než potenciál pro redukcí vody a potenciál valenčního pásu je mnohem větší než oxidační potenciál vody. Proto je velmi vhodným nanomateriálem při štěpení vody pod ultrafialovým osvětlením [16, 22].

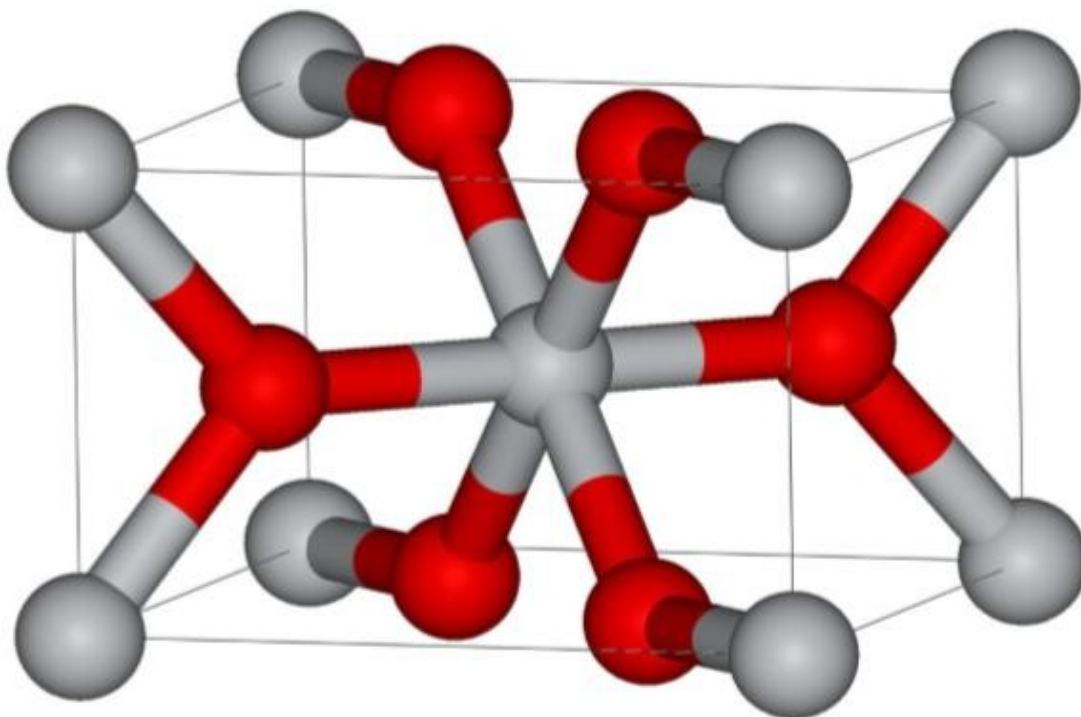


Obr. 8: Fotokatalytické působení  $\text{TiO}_2$

### 2.2.1 Hlavní polymorfní modifikace $\text{TiO}_2$ a jejich vlastnosti

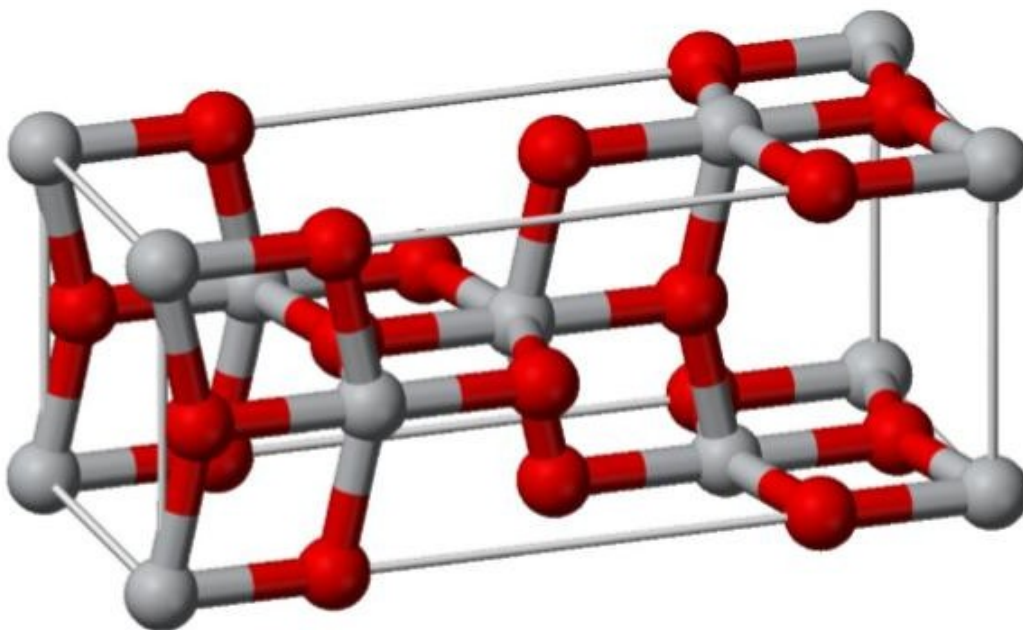
Oxid titaničitý se vyskytuje ve formě několika modifikací. První a druhá mají krystalovou mřížku s tetragonálním systémem (anatas, rutil), třetí má rombický systém (brookit). Kromě těchto tří modifikací nalezených v přírodě byly získány další dvě vysokotlaké kosočtverečné IV a hexagonální V modifikace.

Titan v rutilové mřížce je obklopen šesti atomy kyslíku. Dva atomy kyslíku jsou umístěny ve stejné rovině jako titan a dva atomy kyslíku jsou umístěny na površích umístěných nad a pod specifikovanou rovinou. Každá buňka obsahuje dvě molekuly  $\text{TiO}_2$ . Uspořádání atomů v prostoru je znázorněno na Obr. č. 9 [16, 22].



Obr. 9: Rutilová modifikace  $\text{TiO}_2$

Anatas se také skládá z kyslíkového oktaedru s atomy Ti ve středu oktaedru. Anatasové oktaedry se od rutilových liší pouze vzdáleností mezi atomy Ti a kyslíku ležícími ve stejné rovině. Anatasová buňka obsahuje čtyři molekuly  $\text{TiO}_2$ . Energie mřížky rutilu se liší od energie mřížky anatasu o 0,5 %. Uspořádání atomů anatasu v prostoru je znázorněno na Obr. č. 10 [11, 22].



Obr. 10: Anatasová modifikace  $\text{TiO}_2$

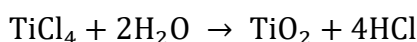
Při zahřátí se anatas nevratně přemění na rutil. Přejchod je pozorován v teplotním rozmezí od 300 do 1000 °C a v případě různých vzorků TiO<sub>2</sub> probíhá různou rychlostí, což je vysvětleno vlivem mnoha faktorů, jako je obsah různých nečistot v anatasu velikost částic a doba zahřívání [25].

### 2.2.2 Metody syntézy TiO<sub>2</sub>

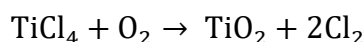
Hlavními metodami průmyslové výroby oxidu titaničitého jsou metody kyseliny sírové a chloridu titaničitého. Metoda kyseliny sírové je založena na zpracování titanových koncentrátů (používá se především ilmenit FeTiO<sub>3</sub>) a titanové strusky s kyselinou sírovou k získání roztoku titanylsulfátu TiOSO<sub>4</sub>, který se podrobí hydrolýze za vzniku hydroxidu titaničitého Ti(OH)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O, následně vzniklá sraženina kalcinuje a získá se práškový oxid titaničitý s anatasovou nebo rutilovou strukturou [29].

Chloridová metoda pro průmyslovou výrobu práškového oxidu titaničitého s nanorozměry je založena na vysokoteplotních reakcích chloridu titaničitého v plynné fázi. Existují dva druhy chloridových procesů: hydrolýza v plynné fázi a oxidace.

Hydrolýza v plynné fázi je založena na reakci:

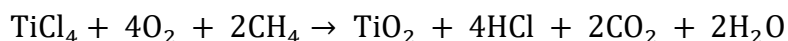


Oxidace je slibnější metoda, která umožňuje vytvořit uzavřený cyklus pro chlór:



Složitější možností jsou sol-gel metody, při kterých dochází k hydrolýze prekurzoru a následně i ke kondenzaci. Prekurzory v tomto případě mohou být alkoholáty titanu (isopropylát, n-butylát), karboxyláty a β-diketonáty. Široký výběr prekurzorů a podmínek hydrolýzy umožňuje řídit fázové složení a morfologii produktu. Kromě toho může být syntéza provedena v roztoku obsahujícím povrchově aktivní látky (templátová metoda). To umožňuje cílenou syntézu mezoporézních materiálů, včetně těch s uspořádanými póry. Může být také provedena hydrolýza prekurzorů v emulzích voda/olej. Hlavní nevýhodou těchto metod je obtížnost úplného odstranění organických látek z produktu, nejčastěji se k tomu používá dodatečné žíhání [29].

Kromě toho může být krystalizace produktu nebo části procesu hydrolýzy prováděna za hydrotermálních nebo solvotermálních podmínek. Řízení složení roztoku a způsobu tepelného zpracování umožňuje získání produktu daného složení a morfologie. Jako prekurzor se používá výše zmíněný TiCl<sub>3</sub>, titanylsulfát, laktátové komplexy a další. Hydrotermální úprava amorfního gelu TiO<sub>2</sub> n H<sub>2</sub>O umožňuje získání nanokrystalického TiO<sub>2</sub>. Ze způsobů získávání nanokrystalických prášků oxidu titaničitého v plynné fázi je zajímavá plamenová syntéza díky vysoké krystalinitě výsledného produktu a relativní snadnosti tvorby škálování. Oxid titaničitý lze získat zejména vstříkáváním chloridu titaničitého do plamene hořáku podle reakce [29]:





### 2.2.3 Fotokatalytický efekt TiO<sub>2</sub>

Při fotokatalýze se ozařuje polovodič TiO<sub>2</sub> zářením s energií větší, než je energie jeho zakázaného pásu (3.2 eV). To vede k absorpci fotonu a excitaci elektronu z valenčního pásu do vodivostního pásu polovodiče a při tom se tvoří kladně nabitá díra ve valenčním pásu (Obr. č. 11). Nosiče náboje mohou podlehnout rekombinaci a disipovat přebytek energie neradiačním mechanismem [9, 10, 26].

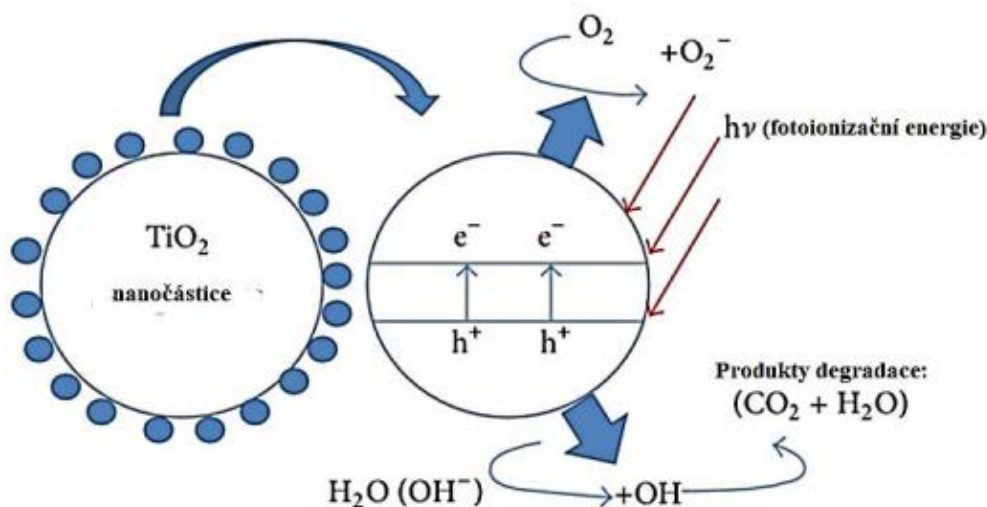
Tuto fáze fotokatalytického procesu na TiO<sub>2</sub> je možné vyjádřit následujícími rovnicemi:



Elektrony vodivostního pásu reagují s kyslíkem za vzniku superoxidových iontů. Fotoredukční reakci popisuje rovnice 2:



Díry (h<sup>+</sup>) ve valenčním pásu mohou oxidovat donorové molekuly a reagovat s molekulami vody za vzniku hydroxylových radikálů (hydroxylové radikály mají silnou oxidační schopnost). Fotooxidační reakci popisuje rovnice 3 [9, 10, 26].



Obr. 11: Fotokatalytické procesy na povrchu TiO<sub>2</sub>

### 2.2.4 Metody zesílení fotokatalytických vlastností TiO<sub>2</sub>

Modifikace ke zlepšení fotokatalytických vlastností TiO<sub>2</sub> mohou být prováděny mnoha různými způsoby, které zahrnují kovové a nekovové dopování, senzibilizaci barvivem, povrchovou úpravu, výrobu kompozitů s jinými materiály a imobilizaci a stabilizaci na nosných

konstrukcích. Vlastnosti modifikovaného  $\text{TiO}_2$  jsou vždy zásadně odlišné od čistého  $\text{TiO}_2$ , pokud jde o absorpci světla, separaci náboje, adsorpci organických polutantů, stabilizaci částic  $\text{TiO}_2$  a snadnost separace částic  $\text{TiO}_2$ .

Chemicky čistý  $\text{TiO}_2$  obvykle má nepříznivou dynamiku přenosu náboje a šířku zakázaného pásu. Pro zlepšení fotokatalytické aktivity je proto nutné změnit chemický stav povrchu  $\text{TiO}_2$ . Na základě mechanismu fotokatalýzy lze identifikovat následující základní strategie povrchové modifikace pro vývoj vysoce aktivních fotokatalyzátorů na bázi  $\text{TiO}_2$  [30, 31]:

- 1) zmenšení šířky zakázaného pásu dotováním
- 2) vrstvení fotosenzibilizátorů pro viditelné světlo na  $\text{TiO}_2$  pro zvýšení dostupné části slunečního spektra
- 3) vytvoření povrchových heteropřechodů pro zlepšení dynamiky nosiče náboje
- 4) plnění nanorozměrných kokatalyzátorů pro inhibici procesů rekombinace povrchového náboje
- 5) zvětšení dostupných povrchových ploch pro zlepšení fotokatalytické aktivity
- 6) zavedení povrchových F-efektů v  $\text{TiO}_2$  ke zvýšení koncentrace volných radikálů  $\text{OH}\bullet$ , čímž se zvýší účinnost fotodegradace
- 7) ozařování vysoce reaktivních ploch pro zvýšení povrchově aktivních oblastí a redoxní kapacity

## 2.2.5 Použití $\text{TiO}_2$

Oxid titaničitý je široce využíván v různých průmyslových odvětvích. Většina vyrobeného oxidu titaničitého se používá k výrobě olejových barev jako bílý pigment. V průmyslu nátěrových hmot se  $\text{TiO}_2$  používá ve formě anatasu a rutilu s plnivý.

Oxid titaničitý s velikostí částic 10-60 mikronů díky své vysoké fotochemické aktivitě našel uplatnění pro matování vláken umělého hedvábí (celulózy). Stejně jako křída, kaolin, sádra a další minerální pigmenty se oxid titaničitý používá při výrobě bílého papíru.  $\text{TiO}_2$  je široce používán jako katalyzátor, zejména při reakcích dehydratace ethylalkoholu a propylalkoholu, oxidace methylenové modři, kondenzaci acetaldehydu a mnoha dalších. Kromě toho se oxid titaničitý používá k výrobě adsorbentů, polovodičových materiálů a usměrňovačů [24].

Jednou z aplikací  $\text{TiO}_2$  jsou anorganické membrány, které jsou široce používány pro mikrofiltrační a ultrafiltrační separační procesy. Keramické membrány na bázi oxidu titaničitého jsou nepochybně zajímavé, protože mají katalytické a fotokatalytické vlastnosti spolu s dalšími výhodami keramických membrán. Mohou být tedy použity jak pro katalýzu, tak i pro odstraňování reakčních produktů díky separační funkci v plynné nebo kapalně fázi. Díky své fotochemické aktivitě jsou membrány na bázi  $\text{TiO}_2$  schopné degradovat složité organické molekuly, jako jsou PCB a další látky znečišťující životní prostředí. Kromě toho jsou membrány na bázi oxidu titaničitého typicky čiré nebo mírně zbarvené, což z nich dělá dobré kandidáty v určitých aplikacích, kde jsou požadovány určité optické vlastnosti. Tyto membrány mají také dostatečně vysokou mechanickou pevnost. Velice zajímavé jsou fotochemické vlastnosti oxidu titaničitého, konkrétně možnost mineralizace toxických odpadů a dalších škodlivých látek jejich fotokatalytickou oxidací na povrchu  $\text{TiO}_2$  na vodu a  $\text{CO}_2$ .

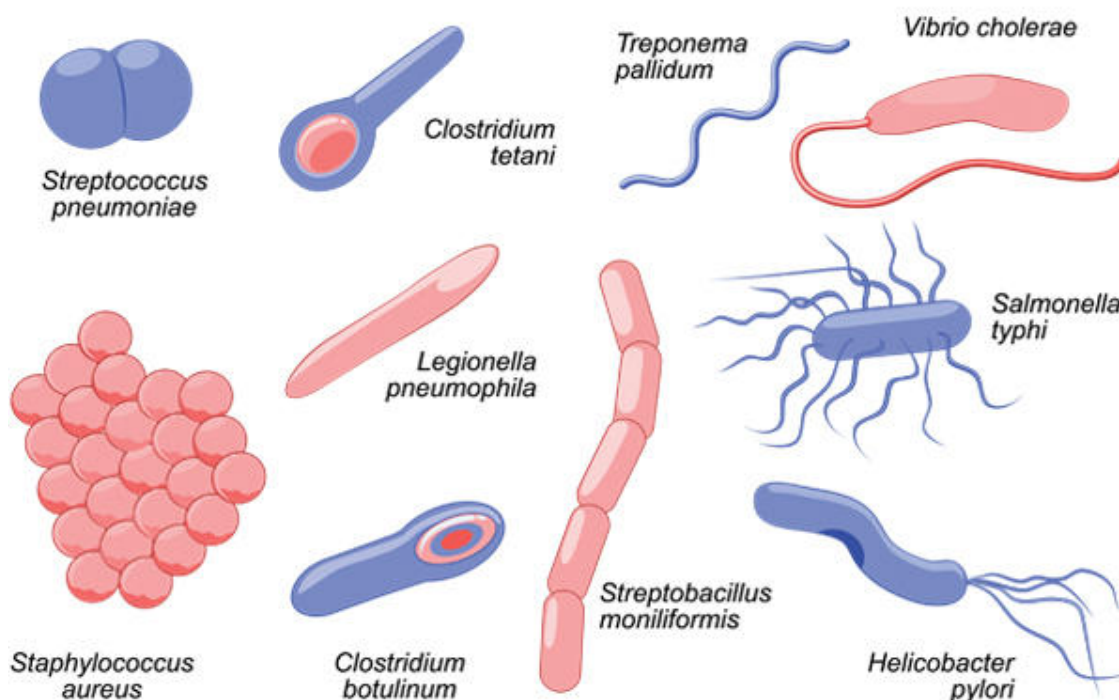
Další perspektivní oblastí aplikace oxidu titaničitého je jeho použití jako nosiče pro katodové katalyzátory se sníženým obsahem platiny. Můžeme tedy konstatovat, že oxid

titaničitý je velmi slibným materiálem pro použití v moderních oborech vědy a techniky a vyžaduje širokou výrobu [32].

## 2.3 BAKTERIE

Bakterie jsou všudypřítomné, většinou volně žijící organismy, které se často skládají z jedné biologické buňky (viz. Obr. č. 12). Tvoří velkou doménu prokaryotických mikroorganismů. Bakterie, typicky několik mikrometrů dlouhé, byly mezi prvními formami života, které se objevily na Zemi, a jsou přítomny na většině míst. Bakterie obývají půdu, vodu, kyselé horké prameny, radioaktivní odpad a hlubokou biosféru zemské kůry. Bakterie jsou životně důležité v mnoha fázích cyklu živin tím, že recyklují živiny, čímž zajišťují fixaci dusíku v atmosféře [14,15].

V biologických komunitách obklopujících hydrotermální průduchy a studené průsaky se vyskytují extrémofilní bakterie živiny potřebné k udržení života přeměnou rozpuštěných sloučenin, jako je sirovodík a metan, na energii. Většina bakterií ještě nebyla charakterizována a existuje mnoho druhů, které nelze kultivovat v laboratoři [14,15].

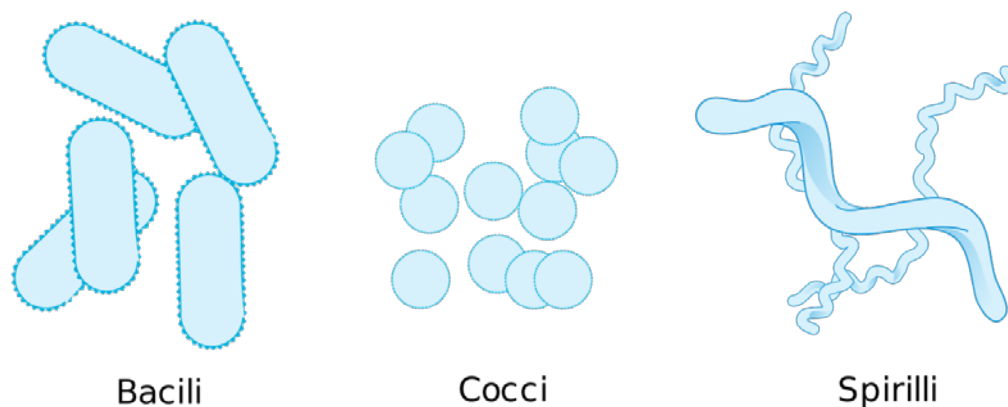


Obr. 12: Různé typy bakterií

Zatímco některé jsou škodlivé, většina není – a některé jsou dokonce prospěšné lidskému zdraví. V mnoha případech lidé žijí v symbióze s bakteriemi a udržují vzájemně prospěšný vztah, aniž by o tom věděli [14,15].

Bakterie se vyskytují v pěti základních tvarech: kulových, válcových, čárkovitých, vývrtkových a spirálových. Vědecké názvy pro tyto tvary jsou cocci (kulaté), bacily (válcové), vibrios (ve tvaru čárky), spirochaetes (vývrtka) a spirilla (spirála). Tvary a konfigurace bakterií

se často odrážejí v jejich jménech. Například *Lactobacillus acidophilus* srážející mléko jsou bacily a *Streptococcus pneumoniae* způsobující zápal plic jsou řetězce koků. Na Obr. č. 13 jsou ukázány typické tvary bakterií. [14,15]



Obr. 13: Čárkové, vývrtové a spirálové tvary bakterií

Bakteriální buňky jsou obecně obklopeny vnější buněčnou stěnou a vnitřní buněčnou membránou. Některé bakterie, jako mykoplazmata, nemají buněčnou stěnu vůbec. Některé bakterie mohou mít dokonce třetí, nejvzdálenější ochrannou vrstvu, zvanou kapsle. Nástavce podobné bičíkům často pokrývají povrch bakterií – dlouhých, nazývaných bičíky, nebo krátkých, nazývaných pili – a pomáhají bakteriím pohybovat se a přichycovat se k hostiteli [14,15].

Bakterie lze klasifikovat podle složení jejich buněčných stěn pomocí testu zvaného Gramovo barvení, podle Science Education Resource Center Carleton College. V roce 1884 vytvořil bakteriolog Christian Gram test, který dokázal určit, zda má bakterie silnou, síťovitou membránu zvanou peptidoglykan. Bakterie s hustým peptidoglykanem se nazývají grampozitivní. Pokud vrstva peptidoglykanu je tenká, je klasifikována jako gramnegativní [14,15].

### 2.3.1 Gramnegativní a grampozitivní bakterie

Grampozitivní bakterie (pravá část Obr.č. 14) nemají vnější buněčnou stěnu za peptidoglykanovou membránou. Jejich peptidoglykanová vrstva je mnohem silnější než peptidoglykanová vrstva u gramnegativních bakterií. Lze je také charakterizovat podle toho, zda tvoří spory a zda k přežití potřebují kyslík [33].

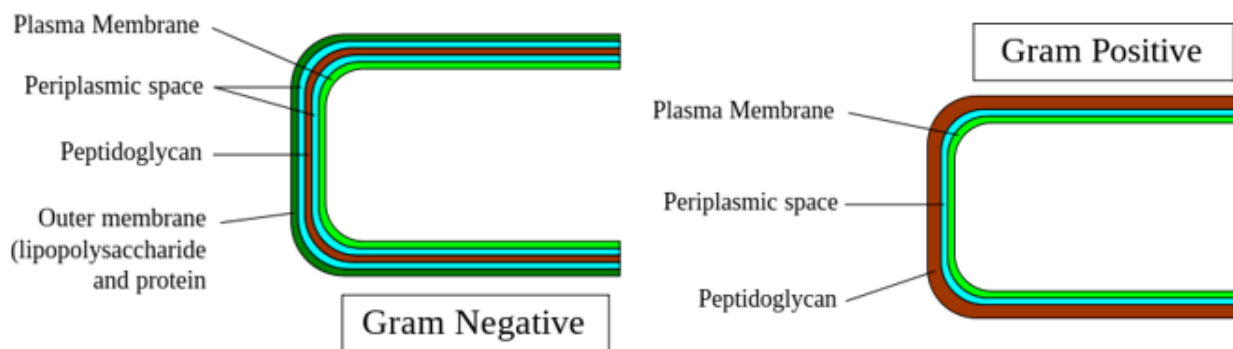
Infekce grampozitivními bakteriemi se léčí antibiotiky. Penicilin, cloxacilin a erythromycin ničí více než 90 % grampozitivních bakterií.

Rezistence na antibiotika se však u grampozitivních infekcí stává vážným problémem. Vytvářejí se nové léky, které mají s tímto problémem pomoci. Antibiotika by měla být užívána pouze tehdy, když je nezbytně potřebujete. Standardy kontroly infekcí je třeba pečlivě dodržovat, aby se zabránilo rozvoji a šíření infekcí rezistentních na antibiotika [33].

Gramnegativní bakterie (levá část Obr.č. 14) mají tvrdou, ochrannou vnější membránu. Jejich peptidoglykanová vrstva je mnohem tenčí než u grampozitivních bacilů. Gramnegativní

Bakterie se hůře zabíjejí kvůli jejich tvrdší buněčné stěně. Když je jejich buněčná stěna narušena, gramnegativní Bakterie uvolňují endotoxiny, které mohou zhoršit stav pacienta [33].

Gramnegativní bakterie mají vysokou odolnost vůči antibiotikům. Jsou jedním z nejzávažnějších problémů veřejného zdraví na světě. Gramnegativní bakterie mají schopnost způsobit u lidí spoustu nemocí. Mohou dosáhnout téměř všech orgánových systémů [33].

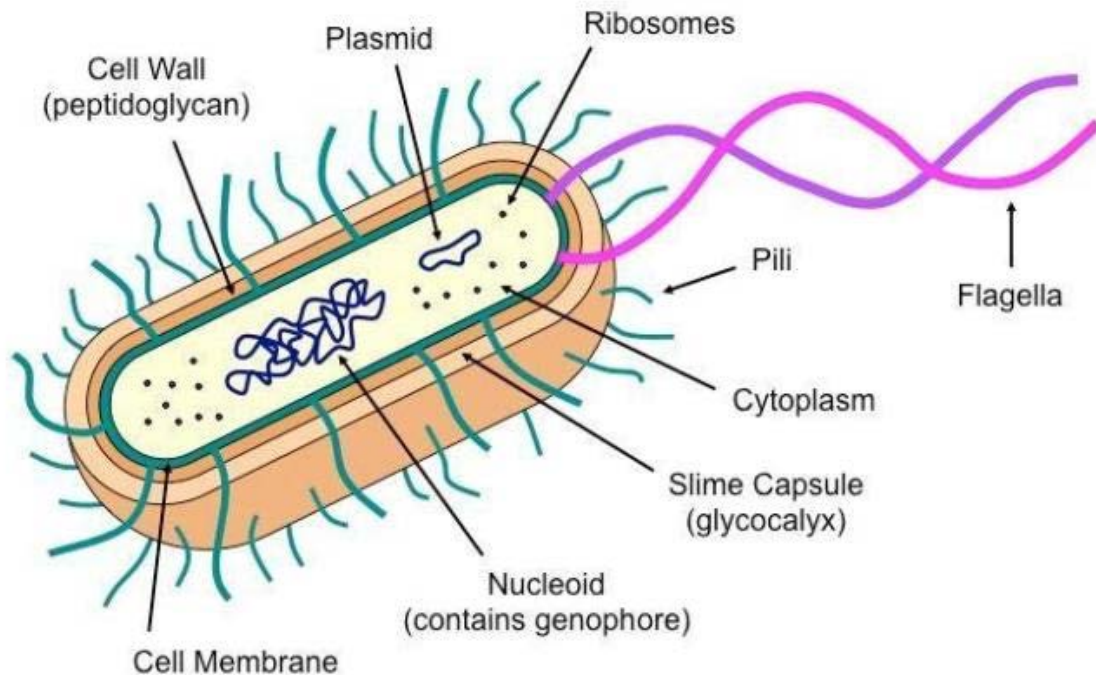


Obr. 14: Struktura grampozitivních a gramnegativních bakterií

### 2.3.2 Rod *Escherichia*

*Escherichia* je kmen gramnegativních, nesporetvorných, fakultativně anaerobních, tyčinkovitých bakterií z třídy *Enterobacteriaceae*. Pokud tyto bakterie jsou součástí gastrointestinálního traktu teplokrevných živočichů, druhy *Escherichia* mohou poskytovat svému hostiteli část mikrobiálně získaného vitamínu K. Řada druhů *Escherichia* je patogenní. Rod je pojmenován po Theodoru *Escherichovi*, objeviteli *Escherichia coli*. *Escherichia* jsou fakultativní aeroby, s aerobním i anaerobním růstem a optimální teplotou 37 °C. *Escherichia* jsou obvykle pohyblivé bičíky, produkují plyn z fermentovatelných sacharidů a nedekarboxylují lysin ani nehydrolyzují arginin. Druhy zahrnují *E. albertii*, *E. fergusonii*, *E. hermannii*, *E. marmotae* a především modelový organismus a klinicky relevantní *E. coli*. *Shimwellia blattae* byla dříve řazena do tohoto rodu [14].

*E. coli* jsou většinou neškodné bakterie, avšak konzumace nebo pití jídla nebo vody kontaminované určitými typy *E. coli* může způsobit mírné až těžké gastrointestinální onemocnění. Některé typy patogenních (nemoc způsobujících) *E. coli*, jako je *E. coli* produkující Shiga toxin, mohou být život ohrožující. Typická struktura *E. coli* je znázorněna na Obr.č. 15 [14].



Obr. 15: Struktura *E.coli*

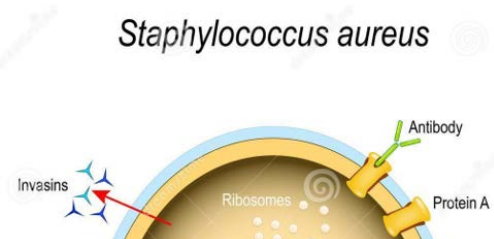
### 2.3.3 Rod staphylococcus

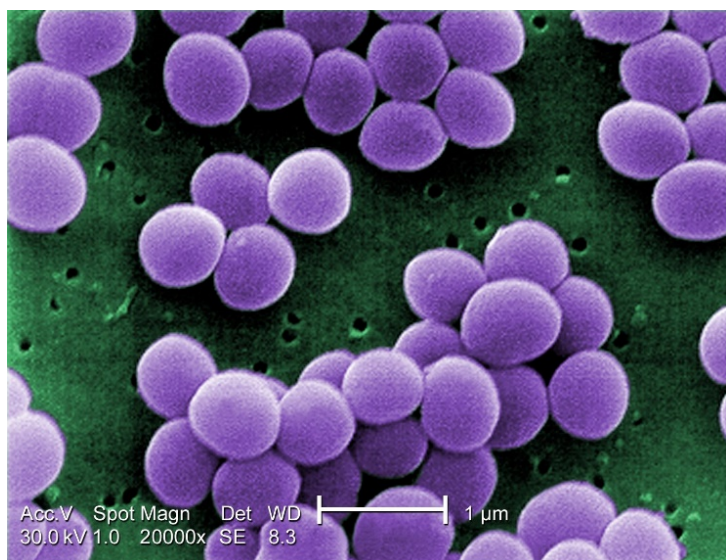
Stafylokoky jsou grampozitivní fakultativně anaerobní kulovité bakterie, které mohou způsobit řadu infekčních onemocnění v různých tkáních těla. Onemocnění související se stafylokoky mohou být jak mírné a nevyžadující žádnou léčbu, tak i závažné a potenciálně smrtelné [34].

Název *Staphylococcus* pochází z řeckého «staphyle», což znamená hrozen, a «kokkos», tedy bobule, a tak vypadají stafylokoky pod mikroskopem jako hrozen nebo malé kulaté bobule.

*Staphylococcus* zahrnuje nejméně 40 druhů. Z nich devět má dva poddruhy, jeden má tři poddruhy a jeden má čtyři poddruhy. Největší význam pro různého typů experimenty získal *Staphylococcus aureus* nebo zlatý stafylokok. Pokud tělo napadne bakterie *Staphylococcus aureus*, záleží zejména na odolnosti organismu a místě napadení. Je-li organismus oslaben, zlatý stafylokok může v těle způsobit různé infekční hnisavé procesy, a to na kůži, ale i na sliznicích, vnitřních orgánech a může též zapříčinit sepsi (lidově „otravu krve“). V případě závažnějších komplikací může způsobit i trvalé poškození srdce, ledvin, jater, střev a mozku, přičemž nejtěžší případy mohou dokonce končit smrtí [34].

Patogenita této bakterie je výsledkem produkce toxinů (exfoliativní toxiny, enterotoxiny atd.), které způsobují ničení tkáně nemocného. Tvoří žlutý pigment (od toho odvozeno druhové jméno *aureus* – zlatý), zkvašuje mannitol a přibližně u třetiny lidské populace je přirozeně přítomen na kůži a sliznicích. Přenos genů antibiotikové rezistence (např. na plasmidech) mezi kmeny *S. aureus* se uskutečňuje nejčastěji transdukci prostřednictvím temperovaných bakteriofágů. Typická struktura a tvar *S.aureus* je znázorněny na Obr.č 16 [34].





Obr. 16: Struktura a tvar *S. Aureus*

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

## 3.1 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ A CHEMIKÁLIE

### 3.1.1 Použité zařízení

- Ultrafialová lampa Ecoplanet 15 W, 50-60 Hz
- BioSan Mini-Bioreactor RTS-1
- Laminární box ALPINA 989 W
- Kalibrátor Biosan 12 V
- Ultrazvukový čistič Bandelin Sonorex
- Elektrické váhy Kern ABT 320-4M
- Mikropipety 10–100 µl, 100–1000 µl, 1000 µl - 5000 µl
- Petřího misky o průměru 6 cm a 9 cm
- Inkubátor s termostatem 37°C
- Zdroj bílého světla LED SCHOTT KL 2500

### 3.1.2 Použité chemikálie

- Praškový TiO<sub>2</sub>, čistota vzorku 99,5 %, velikost částic 21 nm, dodavatel Sigma-Aldrich
- Mueller-Hinton bujón
- Mueller-Hinton Agar
- Demineralizovaná voda

### 3.1.3 Použitý software

- Microsoft Word 2021
- Microsoft Excel 2021
- RTS control program, version 2.7.4.5.
- Open CFU

## 3.2 POUŽITÉ MIKROORGANISMY

- *Escherichia coli* – bakteriální kmen číslo CCM 3954 (Czech Collection of Microorganisms)
- *Staphylococcus aureus* - bakteriální kmen číslo CCM 3953 (Czech Collection of Microorganisms)



### **3.3 METODIKA PRÁCE**

#### **3.3.1 Příprava kultivačního média**

Pro experimenty na začátku byl připraven Mueller-Hintonův bujón a roztok agaru s demineralizovanou vodou v poměru 38 mg na 1 l. Po sterilizaci v autoklávu byl horký roztok agarů vylit na Petriho misky průměru 6 cm (10 ml) resp. 9 cm (20 ml), a nechal se ztuhnout.

#### **3.3.2 Příprava bakteriálního roztoku**

Vzorky *E. coli* a *S. aureus* byly odebrány z koncentrovaného roztoku, skladovaného v mrazáku laboratoře, následně v množství 1 ml inokulovány na 9 cm Petriho misku, a poté kultivovány 24 hodiny v termostatu při teplotě 37 °C.

Po nárůstu a pomnožení v termostatu byly bakterie seškrabány a přemístěny do kádinky objemu 30 ml s předem připraveným Mueller-Hintonovým bujonem objemu 5ml. Tím nám vznikl koncentrát, který jsem označil jako koncentrace  $10^0$ . Poté bylo 0.5 ml tohoto koncentrátu přeneseno do zkumavky s 4.5 ml bujonu, čímž se dosáhlo zředění koncentrátu v poměru 1:10. Toto ředění bylo provedeno celkem třikrát, čímž jsem dosáhl pracovní koncentrace  $10^{-3}$ , kterou jsem používal pro experimenty.

#### **3.3.3 Příprava konstrukcí pro experimenty**

Na začátku bylo rozhodnuto použít několik způsobů zkoumání fotokatalytické aktivity. Základem prvního a druhého experimentu byla závislost antibakteriálního efektu  $\text{TiO}_2$  při ozařování ultrafialovou lampou za různých podmínek. Ve třetím experimentu inaktivace bakterií se zkoumala v bioreaktorech při světle a ve tmě.

#### **3.3.4 První experiment**

V prvním experimentu byl roztok  $\text{TiO}_2$  umístěn přímo pod UV lampou a aktivace probíhala ve sterilním boxu po dobu 30 resp. 60 minut, čímž vznikl aktivovaný roztok  $\text{TiO}_2$ . Princip aktivace je ukázán na Obr. č. 17.

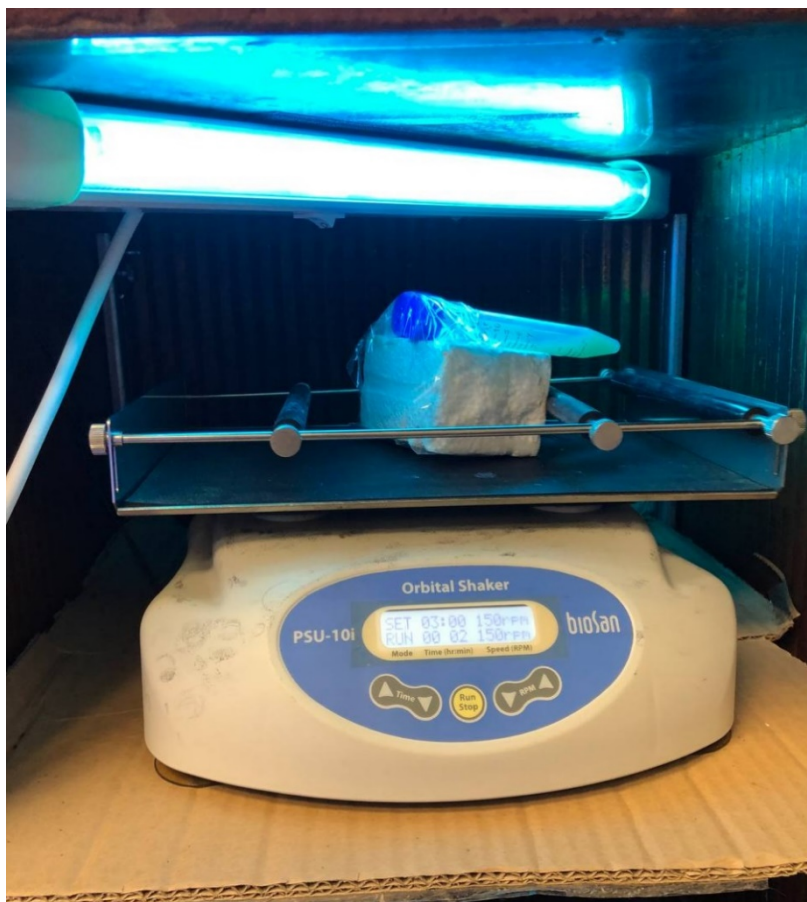


Obr. 17: Kádinka s roztokem  $\text{TiO}_2$  vystaveným UV světlu

Poté jsem vždy 0.5 ml pracovního bakteriálního roztoku napipetoval do třech plastových průhledných zkumavek s připravenou demineralizovanou sterilní vodou objemu 2 ml. Poté jsem do první zkumavky přidal 0.5 ml aktivovaného roztoku  $\text{TiO}_2$ , do druhé 0.5 ml neaktivovaného roztoku  $\text{TiO}_2$  a do třetí 0.5 ml demineralizované vody, což byl kontrolní vzorek – reference pro porovnání. Všechny zkumavky byly umístěny do inkubátoru na 3 hodiny při teplotě 37 °C. Pak ze všech vzorků bylo odebráno 100  $\mu\text{l}$  a následně naředěno pomocí eppendorfků až do koncentrace 10–8. Poté jsem z každé eppendorfky pipetou odebral 500  $\mu\text{l}$  roztoku a přenesl na Petriho misky, které jsem následně kultivoval po dobu 24 hodin.

### 3.3.5 Druhý experiment

Hlavní myšlenkou druhého experimentu bylo zkoumání předem připravených bakteriálních roztoků při rovnoměrném třepání v podmínkách vhodných pro kultivaci pod UV lampou. - viz Obr. č. 18. Výsledky jsem následně porovnal se vzorky ve stejných podmínkách, ale bez vystavení přímému ultrafialovému záření. Do dvou sterilních průhledných zkumavek jsem nejprve napipetoval 2 ml bakteriálního roztoku do každé, a poté jsem do první přidal 2 ml demineralizované vody (reference) a do druhé 2 ml roztoku  $\text{TiO}_2$ . Poté jsem totéž zopakoval s další dvojicí zkumavek, které však byly následně zabaleny do alobalu.



Obr. 18: Zkumavky umístěné v inkubátoru pod UV světlem

Každé půl hodiny se ze čtyř zkumavek se odebíraly vzorky 100  $\mu$ l roztoku pro následnou kultivaci v Petriho miskách. Odběry byly provedeny v časech 30, 60 a 90 minut.

Kromě toho byla vyzkoušena konstrukce pro stejný experiment, která avšak se nacházela ve laminárním boxu místo v inkubátoru. - viz Obr. č. 19.



Obr. 19: Zkumavky vystavené UV světlu v sterilním boxu

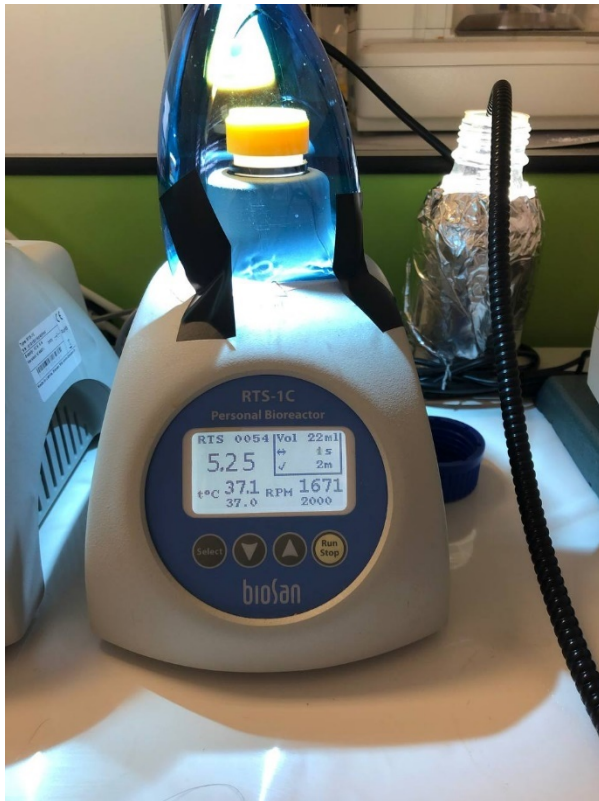
### 3.3.6 Třetí experiment

Na rozdíl od výše uvedených experimentů se ve třetím používal zdroj bílého světla s LED diodami, a kultivace probíhala v bioreaktorech.

Nejprve byly připraveny čtyři plastové zkumavky, z toho dvě s otvorem ve víčku pro lepší pronikání světla během kultivace (viz Obr. č. 20). Do každé zkumavky jsem nejprve připravil demineralizovanou vodu objemu 18 ml, poté jsem do každé přidal 2 ml koncentrovaného bakteriálního roztoku. Následně jsem do dvou zkumavek přidal 2 ml roztoku  $\text{TiO}_2$  v koncentraci 10 mg/ml (čímž vznikla výsledná koncentrace  $\text{TiO}_2$  1 mg/ml), a do druhých dvou jsem přidal 2 ml demineralizované vody (reference). Všechny zkumavky jsem umístil do bioreaktorů. Potom jsem vzorky s otvorem ve víčku vystavil přímému působení bílého světla, druhé dva vzorky byly bez působení LED světla, přičemž vzorek sousedící s ozařovanými byl pro jistotu přikryt alobalem (viz Obr. č. 21).

Bioreaktor využívá technologii neinvazivního, mechanicky poháněného míchání, kdy zkumavka se vzorkem rotuje střídavě oběma směry, což vede k vysoce účinnému míchání a okysličení pro aerobní kultivaci. Pomocí prosvěcovacího infračerveného optického systému (850 nm) je možné registrovat kinetiku růstu buněk neinvazivně v reálném čase.

V bioreaktorech se vzorky kultivovaly při teplotě 37 °C se změnou směru rotace každou 1 s po dobu 24 hodin. Měření kinetiky růstu (prosvícení) probíhalo každých 10 minut a z toho se vytvářely grafy, které budou uvedeny v příští kapitole.



Obr. 20: Plastové zkumavky s otvorem pro lepší pronikání LED světla



Obr. 21: Zkumavky v bioreaktorech bez působení LED světla

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 4.1 CFU

Pro hodnocení výsledků je důležité povšimnout si pojmu CFU (anglicky „Colony Forming Units“, tedy jednotky tvořící kolonie). CFU je jednotka používaná v mikrobiologii, která odhaduje počet bakterií nebo buněk hub ve vzorku, které jsou životaschopné, tedy schopné se množit binárním štěpením za kontrolovaných podmínek. Počítání s jednotkami tvořícími kolonie vyžaduje kultivaci mikrobů a počítá pouze životaschopné buňky. Vizuální vzhled kolonie v buněčné kultuře vyžaduje významný růst a při počítání kolonií není jisté, zda kolonie vznikla z jedné buňky nebo skupiny buněk. Vyjádření výsledků jako jednotky tvořící kolonie odráží tuto nejistotu [35].

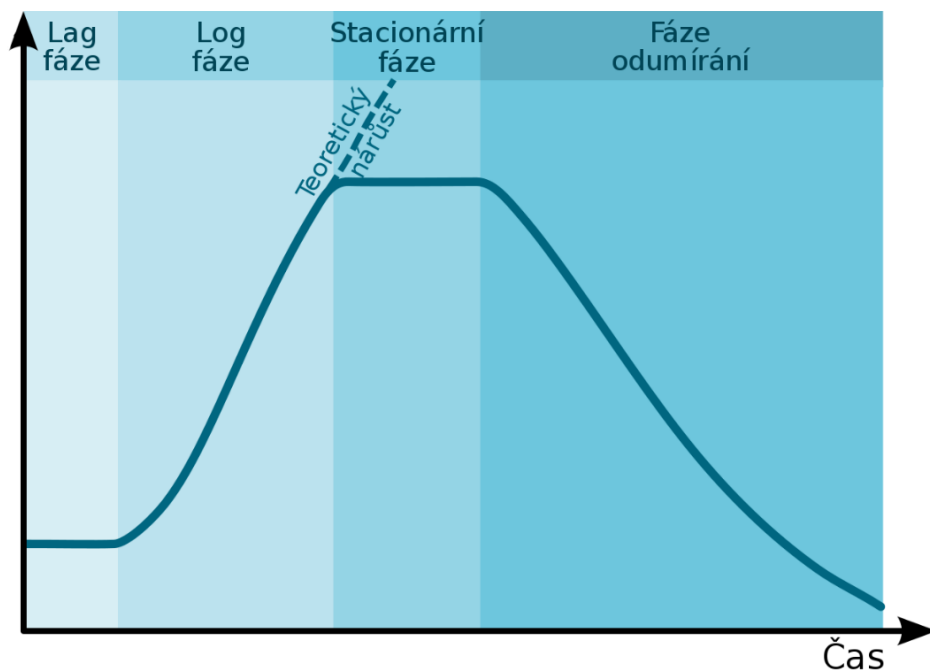
V experimentech bylo použito několik metod pro počítání kolonií. Nejprve se kolonie počítaly ručně, později pomocí programu «ImageJ», a nakonec byl použit profesionální software «OpenCFU».

### 4.2 Měření růstu bakterií

V průběhu experimentů jsem sledoval rozmnožování bakterií podle růstových křivek. Růstová křivka bakterií reprezentuje počet živých buněk v bakteriální populaci za určité časové období. Klasicky křivka zahrnuje čtyři fáze růstu mikroorganismů (viz. Obr. č. 22) [17]:

1. Klidová fáze (lag fáze) – bakterie se adaptují na nové prostředí, počet buněk se nezvyšuje.
2. Exponenciální fáze (log fáze/logaritmická fáze) - bakterie se intenzivně množí, rychlost růstu je největší a populace exponenciálně roste.
3. Stacionární fáze – zpomaluje se rychlost množení buněk, vzniká stav rovnováhy, kdy se počet buněk zhruba nemění.
4. Fáze odumírání – počet odumřelých buněk je větší než počet nově vzniklých.

Vzorky pro kultivace se odebíraly po třech hodinách při aktivním dělení bakterii, tedy během log fází.

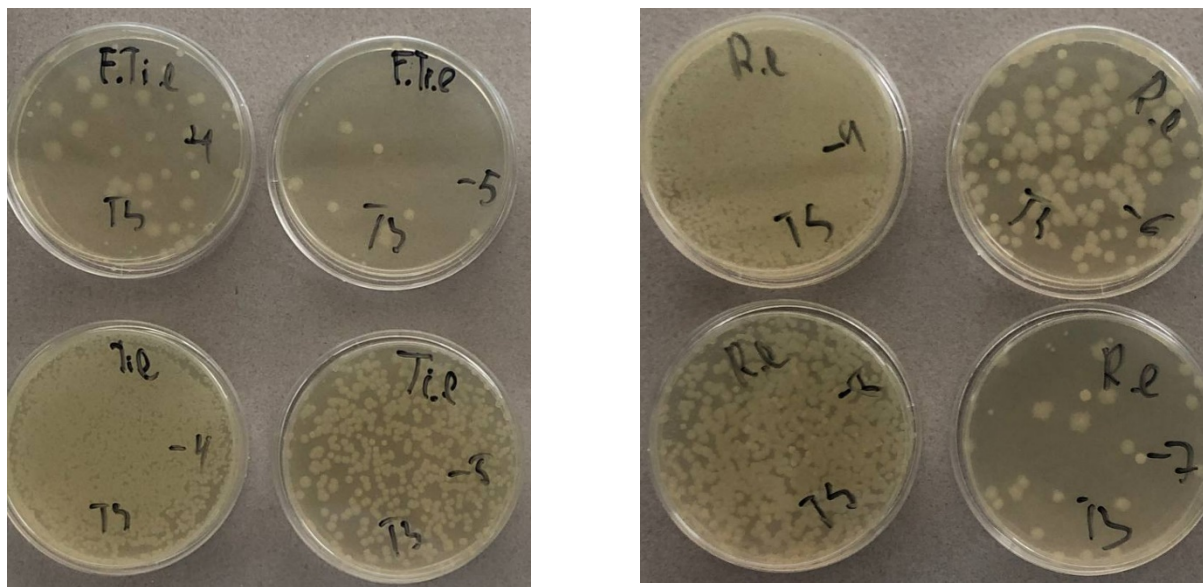


Obr. 22: Fáze života bakterií

### 4.3 Inaktivace předem aktivovaným oxidem titaničitým

V prvním experimentu jsme zkoumali metodu kultivace roztoku  $\text{TiO}_2$  v koncentraci 1 mg/ml bez bakterií přímým UV světlem po dobu 30 resp. 60 minut. Aktivace po dobu 30 minut, a následné smíchání s bakteriálním roztokem neprokázala žádnou efektivitu, jak v případě *E. coli* tak i *S. aureus*. Výsledky se dostavily u aktivace 60 minut.

Aktivované vzorky  $\text{TiO}_2$  jsem smíchal s bakteriálním roztokem, a výsledný roztok jsem kultivoval v inkubátoru s třepáním po dobu 3 hodin. Po této době byly odebrány vzorky a v různých ředěních byly kultivovány na Petriho miskách. Na Obr. č. 23 vidíme počty kolonií na Petriho miskách pro experiment s *E. coli* a aktivací 60 minut. Levá část obrázku ukazuje fotoaktivovaný  $\text{TiO}_2$  (horní dvě misky, koncentrace  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$ ), a neaktivovaný  $\text{TiO}_2$  (dolní dvě misky, koncentrace  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$ ). Pravá část obrázku ukazuje počty kolonií pro referenci (koncentrace  $10^{-4}$  až  $10^{-7}$ ).



Obr. 23: Petriho misky s koloniemi *E.coli*

Z Obr. č. 23 je i bez počítání vidět, že radikály OH vzniklé při fotokatalýze zabily významnou část kolonií *E.coli*.

Čas [hodiny]	Reference	TiO <sub>2</sub>	Foto TiO <sub>2</sub>
0	5,85E+06	5,85E+06	5,85E+06
3	4,05E+08	1,03E+08	1,73E+06

Obr. 24: Zprůměrované hodnoty CFU pro *E.coli*

Tabulka na obrázku číslo 24 ukazuje koncentrace CFU/ml na miskách z Obr.č. 23. Je zřejmé, že koncentrace CFU v roztoku s 60 minut aktivovaným TiO<sub>2</sub> je o dva řády nižší než u roztoku s neaktivovaným TiO<sub>2</sub>. Ve všech experimentech bylo použito několik dříve zmíněných metod pro určení počtu kolonií. Nejprve se kolonie počítaly ručně, posléze pomocí zvýšení kontrastu v programu «ImageJ», a nakonec byl použit profesionální software «OpenCFU».

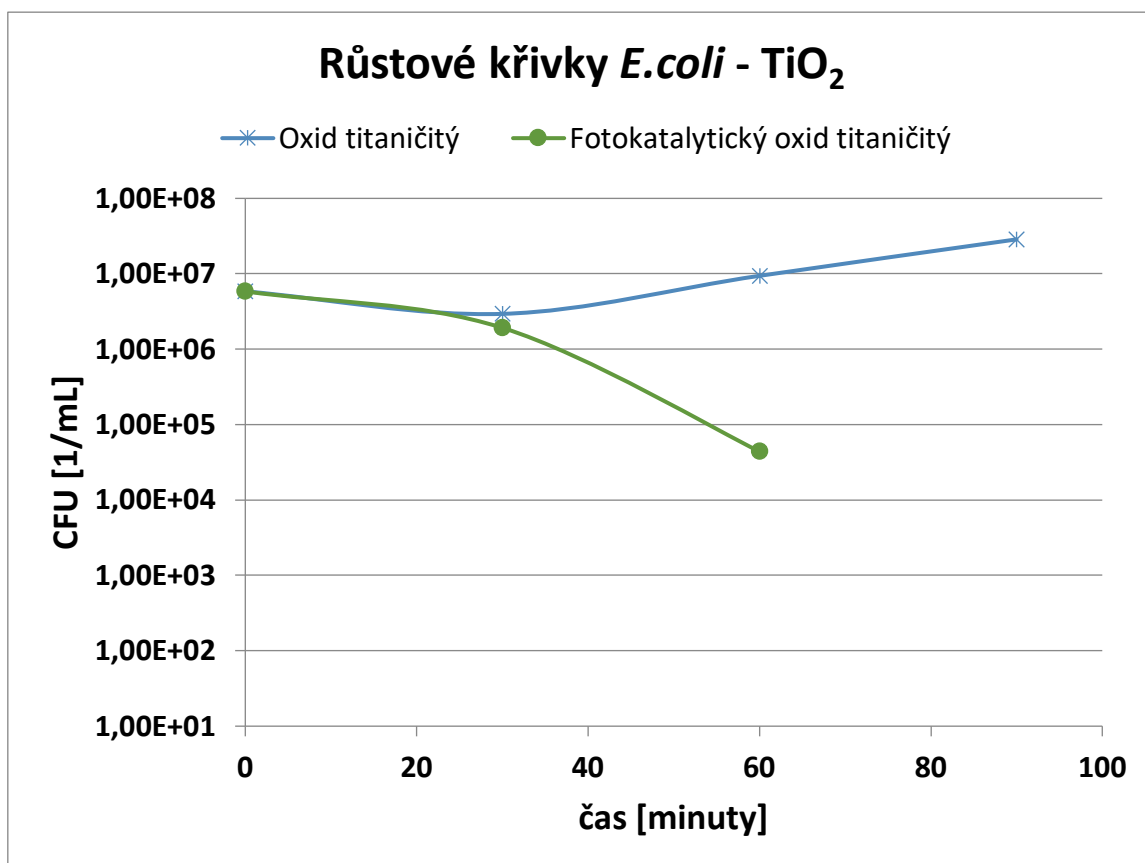
Na rozdíl od prokázané efektivity TiO<sub>2</sub> na *E. Coli* při zkoumání antibakteriálního účinku na *S.aureus* nebyla zjištěna žádná účinnost, což může být vysvětleno vysokým obsahem peptidoglykanu v buněčné stěně.

Z výše uvedené informace vyplývá, že tato metoda aktivace má praktický význam při dezinfekci gramnegativních bakterií.



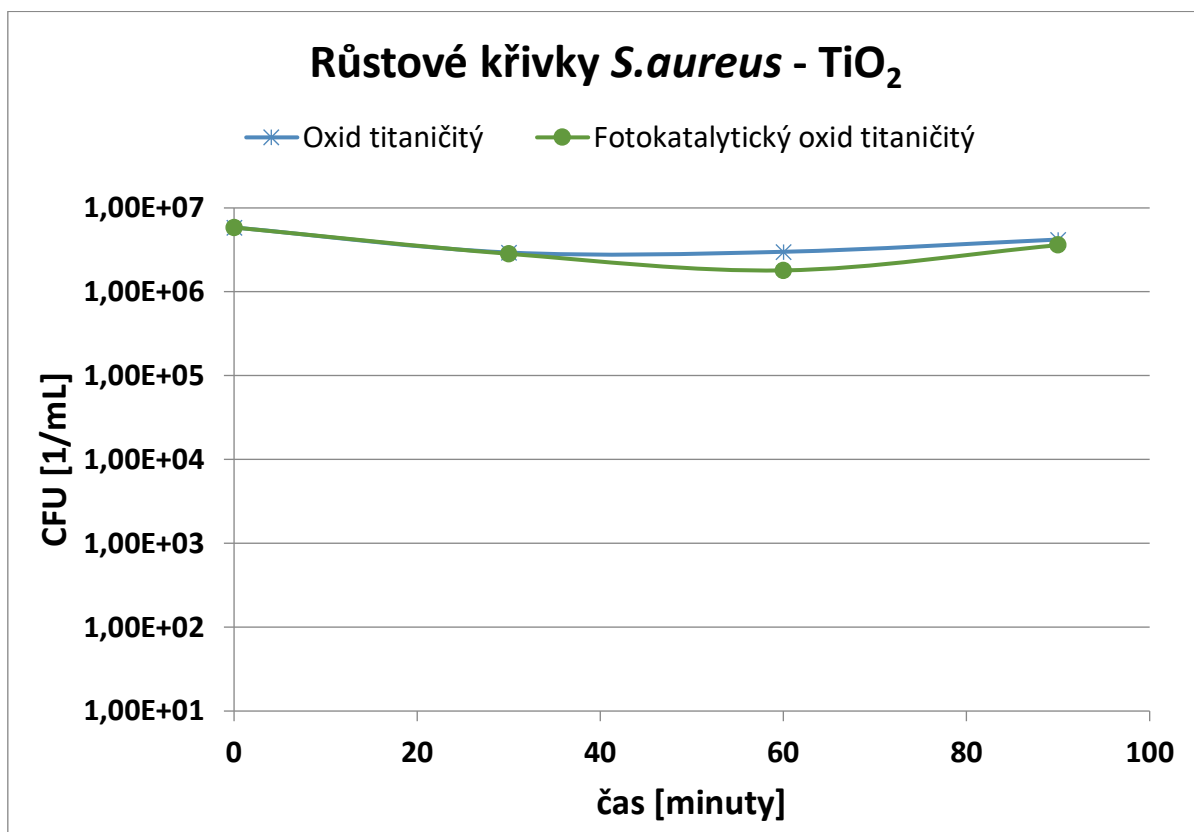
#### 4.4 Inaktivace bakterií za přítomnosti TiO<sub>2</sub> v roztoku

Ve druhém experimentu se zkoumala fotokatalytická účinnost vzorků TiO<sub>2</sub> v bakteriálním roztoku. Dva vzorky (TiO<sub>2</sub> a reference) byly vystaveny přímému UV světlu, a zbylé dva (opět TiO<sub>2</sub> a reference) byly schovány ve tmě. Z růstových křivek (Obr. č. 25.) je vidět, že u ozářeného TiO<sub>2</sub> dochází k poklesu koncentrace CFU, přičemž v čase 90 minut na misce nezůstala žádná kolonie. Níže vidíme růstové křivky bakterií pro ozářený i neozářený TiO<sub>2</sub>. Křivky pro reference vypadaly velmi podobně jako zde uvedené křivky s TiO<sub>2</sub>, tedy žádný efekt potmě, a pokles až k nule u ozářeného vzorku.



Obr. 25: Růstové křivky *E.coli*

V případě *S. aureus* nám graf na Obr. č. 26 poskytuje dvě velice navzájem podobné růstové křivky, což vypovídá o prakticky nulové účinnosti TiO<sub>2</sub> pro tento druh bakterií.



Obr. 26: Růstové křivky *S.aureus*

Z průběhu křivek je vidět, že bez ohledu na změnu podmínek kultivace a způsobu aktivace UV světlem je viditelný výrazný antibakteriální efekt na *E.coli*, ale v podstatě žádný efekt vůči *S.aureus*. Zároveň je však těžké u tohoto experimentu určit, do jaké míry zabíjí bakterie *E. coli* kombinace UV světla a  $\text{TiO}_2$  a do jaké míry samotné UV světlo.

#### 4.5 OD

Dalším důležitým pojmem pro vyhodnocení výsledků je absorbance (anglicky Optical Density). Optická hustota je vlastnost, která popisuje schopnost materiálu absorbovat energii daného světla, které tímto materiálem prochází. Je definována jako poměr mezi dopadajícím zářivým výkonem (síla světla při dopadu na materiál) a přenášeným zářivým výkonem (síla světla při výstupu z materiálu).

Jinými slovy, optická hustota je schopnost materiálu blokovat určité světlo. Ačkoli se počítá pomocí kritérií, která mají jednotky měření, samotná optická hustota je bezrozměrná a není spojena s žádnou vědeckou jednotkou.

$$A = \log \frac{I_0}{I},$$

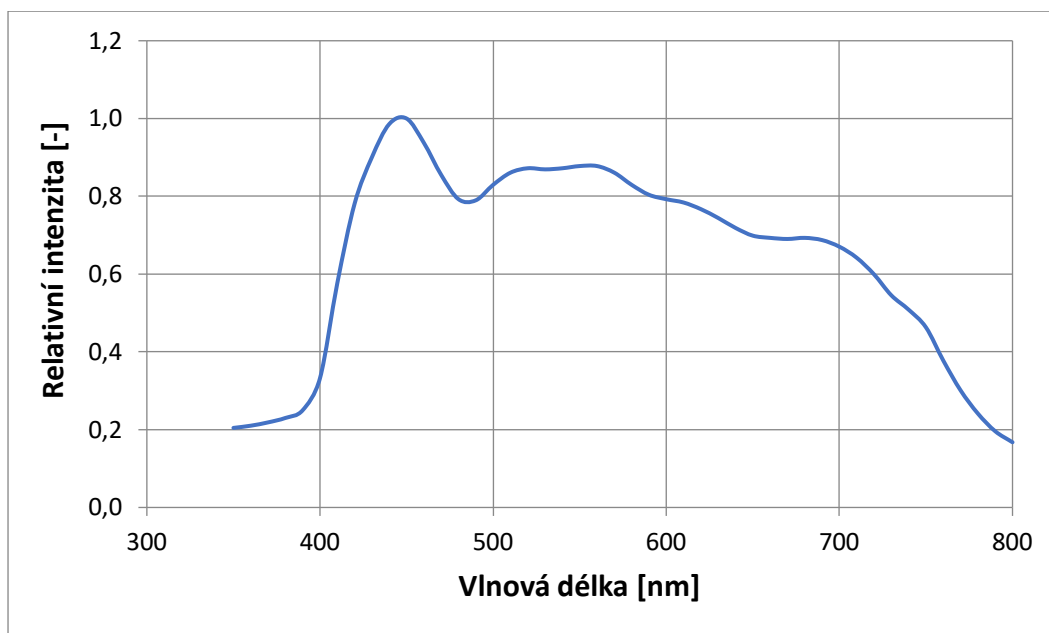
kde  $I_0$  – intenzita dopadajícího světla,  $I$  – intenzita vystupujícího světla

V mikrobiologii se předpokládá, že počet mikrobů v jakékoli suspenzi je přímo úměrný zákalu kultury a jako takové představuje ředění na nastavenou optickou hustotu specifickou mikrobiální koncentrací. Měření hustoty je široce používáno ve výzkumu a klinických

laboratořích, protože poskytuje rychlou a nenákladnou metodu úpravy mikrobiálních suspenzí na nastavené koncentrace. Tato technika je zvláště účinná, když se používá spolu s metodami počítání buněk, umožňuje výzkumníkům rychle zředit suspenze na odhadovanou koncentraci pomocí optické hustoty a případně později potvrdit, že odhad byl správný pomocí počítání koncentrace buněk [47].

#### 4.6 Inaktivace bakterií v bioreaktorech

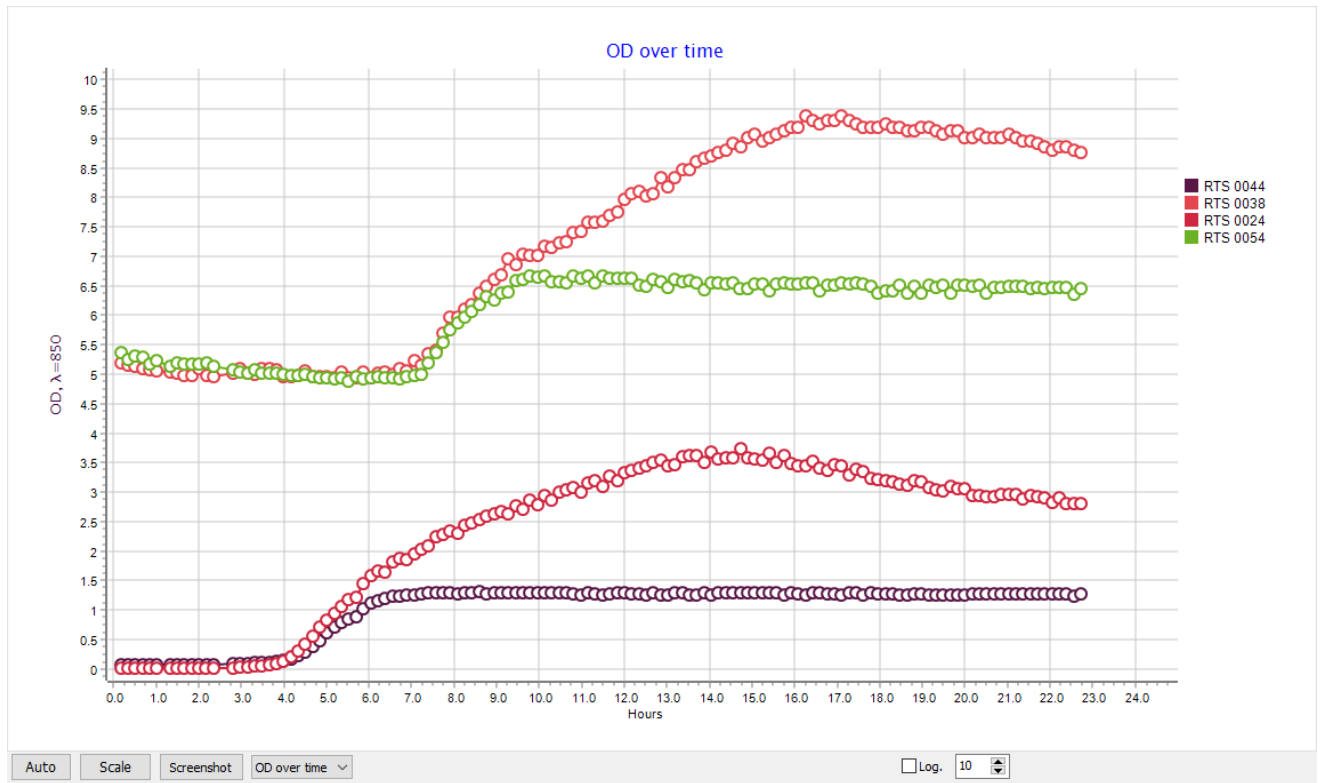
Na rozdíl od předchozích experimentů bylo cílem posledního z nich určit antibakteriální účinek  $\text{TiO}_2$  při ozáření bílým světlem, jehož spektrální charakteristika je uvedena níže na Obr. č. 27. Měřeno na přístroji Spekol.



Obr. 27: Spektrální charakteristika použitého světla

V experimentu byly použity čtyři zkumavky. Dvě z nich obsahovaly bakterie a  $\text{TiO}_2$ , zbylé dvě byly jen s bakteriemi bez  $\text{TiO}_2$  a sloužily jako reference. U každého z těchto párů byla jedna zkumavka vystavena světlu, zatímco druhá byla potmě. Jako první byly monitorovány bakterie kmenu *E.coli*.

#### 4.6.1 Inaktivace *E.coli* v bioreaktorech

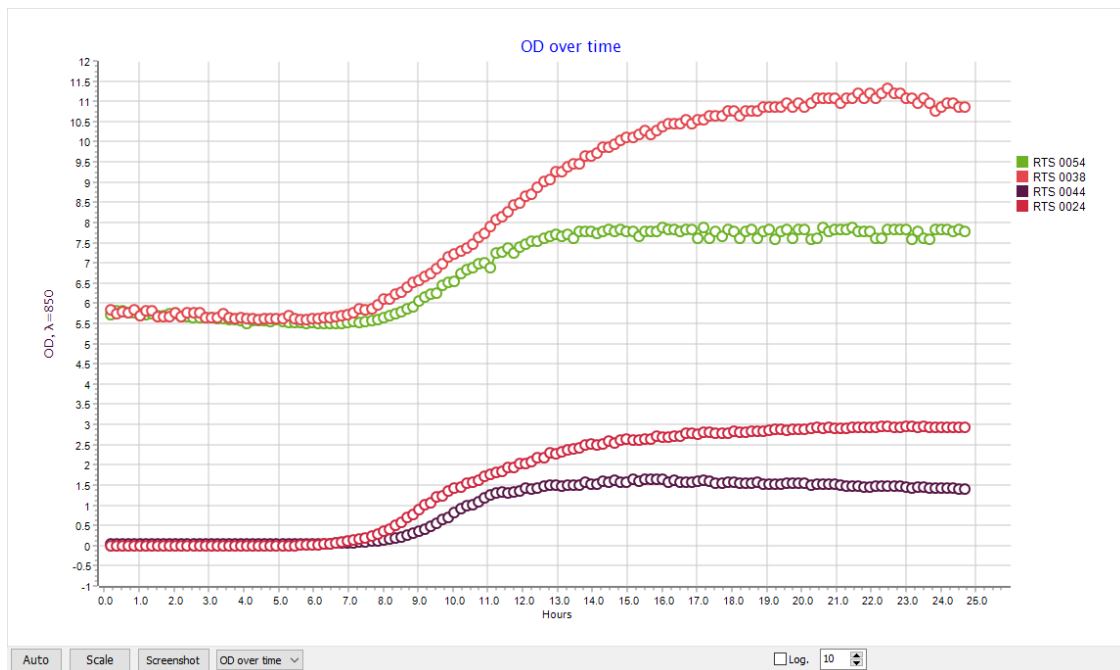


Obr. 28: Křivky absorbance *E.coli*

Na grafu z Obr. č. 28 jsou označeny křivky absorbance, jejíž hodnoty se měřily každých 10 minut. Zelená křivka odpovídala zkumavce s  $\text{TiO}_2$  vystaveným světlu, zatímco horní červená udávala hodnoty pro potmě kultivovaný bakteriální roztok obsahující  $\text{TiO}_2$ . Graf nám ukazuje výrazný rozdíl mezi absorbancí roztoku  $\text{TiO}_2$  ozářeného lampou a roztokem  $\text{TiO}_2$  schovaným ve tmě. To vypovídá o tom, že hustota vyrostlých bakterií se lišila o několik řádů, tudíž fotoaktivovaný  $\text{TiO}_2$  inhibuje růst *E.coli*. Spodní dvě křivky odpovídají referenci, fialová byla na světle a dolní červená byla ukryta alobalem. Z obou dvojic křivek vyplývá, že použité bílé světlo taktéž určitým způsobem inhibuje růst. Dalším poznatkem je, že vzorky s  $\text{TiO}_2$  začínají růst až kolem času 7 hod., zatímco reference začínají růst již od 4 hod. Dá se tedy říci, že  $\text{TiO}_2$  taktéž zpožďuje růst *E. coli*. Při kultivaci a vyhodnocení výsledků z Petriho misek nebyl pozorován výrazný rozdíl mezi koncentracemi kolonií s  $\text{TiO}_2$  a foto aktivovaným  $\text{TiO}_2$ , takže v experimentu s *E.coli* má význam jenom hodnocení pomocí OD.

Experiment se *S. aureus* přináší nám velice podobné výsledky.

## 4.6.2 Inaktivace *S.aureus* v bioreaktorech



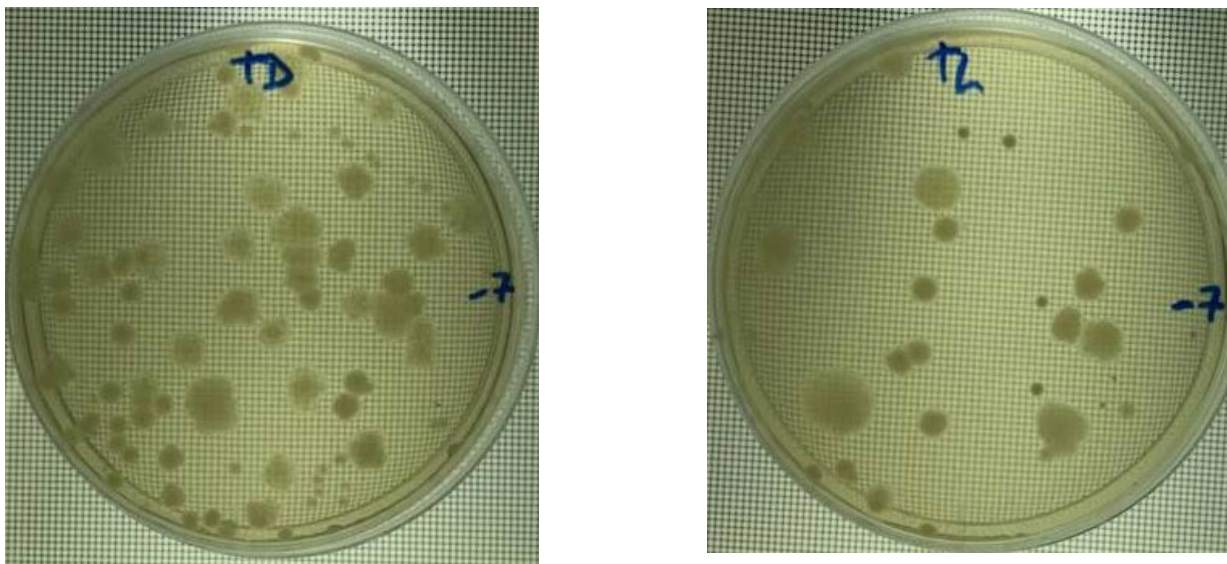
Obr. 29: Křivky absorbance *S.aureus*

Graf na Obr. č. 29 nám ukazuje růstové křivky, kdy barvy odpovídají stejným kombinacím jako u předchozího grafu. Zde začíná růst ve všech případech okolo 7 hod., tudíž není zpoždění růstu. Po 13 hod. přestává absorbance fotoaktivovaného roztoku  $\text{TiO}_2$  růst a zůstává ve stabilním stavu až do konce experimentu, zároveň však absorbance neosvětleného roztoku postupně roste. Pro ověření skutečné koncentrace CFU jsem se rozhodl kultivovat vzorky v čase 24 hod. se *S. aureus* v Petriho miskách. Spočítané koncentrace bakterií jsou uvedeny v tabulce níže.

Čas [hodiny]	REFERENCE TMA	REFERENCE SVĚTLO	$\text{TiO}_2$ TMA	$\text{TiO}_2$ SVĚTLO
0	5,85E+06	5,85E+06	5,85E+06	5,85E+06
24	2,07E+09	1,20E+09	1,41E+09	3,68E+08

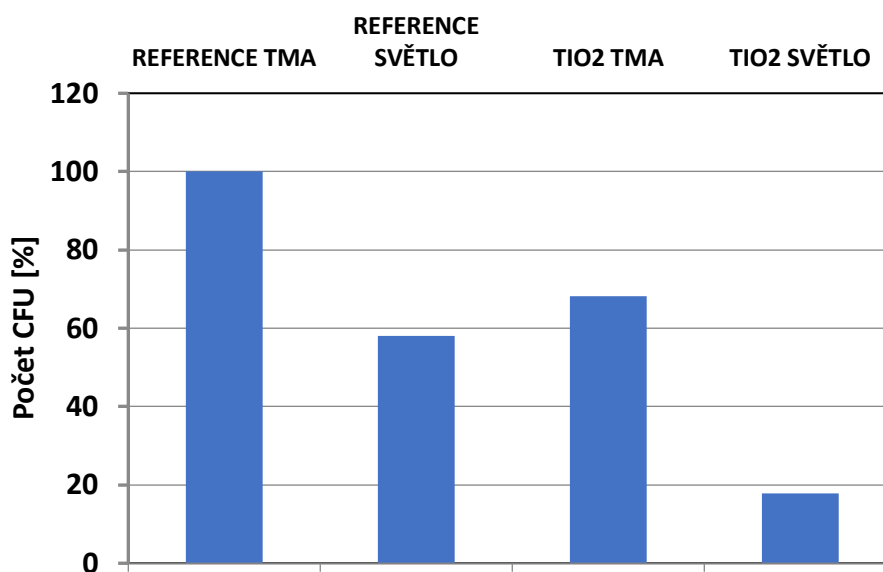
Obr. 30: Hodnoty CFU pro *S.aureus*

Vzhledem k tomu, že křivky OD mně vyšly velmi podobné pro experiment s *E. coli* i se *S. aureus*, provedl jsem toto kontrolní určení počátečních a konečných koncentrací pouze pro *S. aureus*.



Obr. 31: Petriho misky s kolonií *S.aureus*

Poté pomocí výše uvedených dat z Obr. č. 30 byl sestaven následující sloupcový diagram (viz. Obr. č. 32), kde za 100 procent byly vzaty jednotky tvořící kolonie pro reference ve tmě. Můžeme tedy říci, že po 24 hodinách působení světla počet kolonií ve vzorku s fotoaktivním  $\text{TiO}_2$  činil 18 % v porovnání s vybranou referencí, což ukazuje na to, že po ozáření lampou koncentrace CFU klesla téměř o jeden řád.



Obr. 32: Diagram porovnání účinků působení světla a  $\text{TiO}_2$  na *S.aureus*

## 5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo studium účinku oxidu titaničitého aktivovaného ultrafialovým a bílým světlem na růst grampozitivních bakterií *Staphylococcus aureus* a gramnegativních *Escherichia coli*. Pro každý druh mikroorganismů byly provedeny tři experimenty, v nichž se zkoumala antibakteriální efektivita za různých podmínek a s využitím dvou různých zdrojů světla.

První experiment ukázal, že při předběžné aktivaci roztoku  $\text{TiO}_2$  bez bakterií pod ultrafialovým světlem po dobu 60 minut vykazuje tento roztok po smíchání s bakteriemi antibakteriální účinnost na bakterie druhu *E.coli*, což se projevuje snížením koncentrace CFU o dva řády. Daný typ aktivace může být použit v průmyslu pro sterilizaci pitné vody, ve které se nejčastěji objevují bakterie tohoto kmenu. V případě *S.aureus* předaktivace UV světlem a následné smíchání s bakteriálním roztokem nepřinesly žádné výsledky. To může být způsobeno strukturou grampozitivních bakterií, jejichž silná peptidoglykanová vrstva není odolná vůči OH radikálům vzniklým při fotokatalýze.

Druhý experiment spočíval ve smíchání bakteriálního roztoku s roztokem  $\text{TiO}_2$  a v přímém vystavení této směsi UV světlu. Zde bylo pozorováno postupné ničení *E.coli* až do úplného vymírání kolonií. Ve druhé části experimentu, v němž se zkoumal *S.aureus*, naproti tomu nebyla prokázána antibakteriální účinnost sledovaného reagentu. I u druhého experimentu tedy můžeme usoudit na rozdílnou strukturu obou druhů bakterií, která způsobila takto rozdílné výsledky.

Třetí experiment nám přinesl poznatky ohledně účinnosti bílého světla jako fotokatalyzátoru  $\text{TiO}_2$  vůči zkoumaným druhům bakterií. Ukázalo se, že mnou použité bílé světlo inhibuje růst obou druhů zkoumaných bakterií, přičemž za přítomnosti  $\text{TiO}_2$  v roztoku je tento efekt ještě výrazně posílen.

Souhrnně lze říci, že metody inaktivace bakterií s využitím fotokatalytických vlastností  $\text{TiO}_2$  mají význam pro moderní fyziku z důvodu nízkých nákladů a nezanedbatelné antibakteriální účinnosti.

## 6 SEZNAM LITERATURY

1. Babaei, A. Dehnad et al.: Applied Food Biotech., 2016, 3 (2):115-123, doi: 10.22037/afb.v3i2.10571
2. K. Khashan, G. Sulaiman et al.: Appl. Sci. 2021, 11(10), 4623; doi: 10.3390/app11104623
3. K. Gupta, R. Singh et al.: Beilstein J. Nanotechnol. 2013, 4, 345–351, doi: 10.3762/bjnano.4.40
4. Suresh C. Ameta and Rakshit Ameta: Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment Advanced Oxidation
5. Xiaogang Yanged: Photocatalysis: From Fundamental Principles to Materials and Applications
6. Wikipedie: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Btlo>
7. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fyzika, VUTIUM-PROMETHEUS, 2000.
8. Adawiyah J., HaideraZainab N., JameelImad H., M.Al-Hussainib: Review on: Titanium Dioxide Applications
9. FUJISHIMA, A., HASHIMOTO, K., WATANABE, T.: TiO<sub>2</sub> Fotokatalýza, základy a aplikace. 1. vyd. Praha 10: Vivas a. s., 2002. 111 s. ISBN 80-903113-3-4.
10. SERPONE, N., PELIZZETTI, E.: Photocatalysis: fundamentals and applications. Canada: Wiley, 1989. 650 s. ISBN 0-47-62603-1.
11. PEKAŘ, M., KLUČÁKOVÁ, M., VESELÝ, M., ČEPPAN, M.: Fyzikální chemie a fotochemie. Praktikum. 1.vyd. Brno: VUT FCH, 2003. 114 s. ISBN 80-214-2470-2.
12. Coronado, Juan M.; Fresno, Fernando; Hernández-Alonso, María D.; Portela, Racquel (2013). Design of Advanced Photocatalytic Materials for Energy and Environmental Applications
13. FUJISHIMA, A.: Discovery and applications of photocatalysis: Creating a comfortable future by making use of light
14. Madigan, Michael T.; Martinko, John M. (2006). Brock Biology of Microorganisms (11th ed.)
15. Frank Lowy: Bacterial Classification, Structure and Function
16. Wikipedie: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_titani%C4%8Dit%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_titani%C4%8Dit%C3%BD)
17. Wikiskripta:  
[https://www.wikiskripta.eu/w/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD\\_r%C5%AFstu\\_bakteri%C3%AD](https://www.wikiskripta.eu/w/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_r%C5%AFstu_bakteri%C3%AD)
18. Liu, X.; Ruan, W.; Wang, W.; Zhang, X.; Liu, Y.; Liu, J. The Perspective and Challenge of Nanomaterials in Oil and Gas Wastewater Treatment
19. Mathiesen, D. (2012). "Final Report Summary - LIGHT2CAT (Visible LIGHT Active PhotoCATalytic Concretes for Air pollution Treatment)""Metal Oxide-Based Photocatalytic Paper: A Green Alternative for Environmental Remediation"
20. Kudo, Akihiko; Kato, Hideki; Tsuji, Issei (2004). "Strategies for the Development of Visible-light-driven Photocatalysts for Water Splitting"
21. McCullagh C, Robertson JM, Bahnemann DW, Robertson PK (2007). "The application of TiO<sub>2</sub> photocatalysis for disinfection of water contaminated with pathogenic micro-organisms: a review". Research on Chemical Intermediates



22. "Market Study: Titanium Dioxide". *Ceresana*. Retrieved 21 May 2013.
23. Kazuya Nakata, „Medical Applications of Photocatalysis“
24. *Anderson, Bruce (1999). Kemira pigments quality titanium dioxide. Savannah, Georgia. p. 39.*
25. Hanaor, Dorian A. H.; Sorrell, Charles C. (February 2011). "Review of the anatase to rutile phase transformation" Akira Fujishima, Tata N.Rao, Donald A. Tryk: Titanium dioxide photocatalysis
26. Yan Liu, Zhe Li, Michael Green, Michael Just, Yang Yang Li, Xiaobo Chen: Titanium dioxide nanomaterials for photocatalysis
27. *Honsberg, Christiana; Bowden, Stuart. "Semiconductor Materials". Retrieved May 3, 2021.*
28. Nave, R. "Doped Semiconductors". Retrieved May 3, 2021.
29. Pardon Nyamukamba, Omobola Okoh, Henry Mungondori, Raymond Taziwa and Simcelile Zinya „Synthetic Methods for Titanium Dioxide Nanoparticles”
30. John Moma and Jeffrey Baloyi „Modified Titanium Dioxide for Photocatalytic Applications“
31. Piaopiao Wana, Zachary, D.Hoodbc, YunfanXug, ShizeYangd, SujuanWu „Enhancing the photoresponse and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> by controllably tuning defects across {101} facets“
32. Wikipedie: [https://en.wikipedia.org/wiki/Titanium\\_dioxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_dioxide)
33. Karen Steward PhD „Gram Positive vs Gram Negative”
34. BEDNÁŘ, Marek, Andrej SOUČEK a Věra FRANĀKOVÁ, et al. Lékařská mikrobiologie: Bakteriologie, virologie, parazitologie.
35. Wikipedie: [https://en.wikipedia.org/wiki/Colony-forming\\_unit](https://en.wikipedia.org/wiki/Colony-forming_unit)
36. Kunal Mondal „Recent Advances in the Synthesis of Metal Oxide Nanofibers and Their Environmental Remediation Applications“
37. <https://publi.cz/books/91/01.html>
38. <https://nanohub.ee/fotokataluus/>
39. Yang Lia, Jian Zhaoa, Guangshan Zhangb, Lilan Zhanc, Shiyuan Dingd, Enxiang Shanga, Xinghui Xiaa „Visible-light-driven photocatalytic disinfection mechanism of Pb-BiFeO<sub>3</sub>/rGO photocatalyst“
40. <https://rsscience.com/bacteria/>
41. <https://sites.google.com/site/physics8atlaurel/bacteria-characteristics>
42. <http://www.gate2biotech.cz/dictionary.php?word=71>
43. <http://www.old-ib.bioninja.com.au/standard-level/topic-2-cells/22-prokaryotic-cells.html>
44. <https://www.irozhlaz.cz/fotogalerie/5397261>
45. <https://www.dreamstime.com/staphylococcus-aureus-cell-structure-pathogenic-factors-components-vector-illustration-medical-educational-science-use-image122532471>
46. Montaser Y. Ghaly “Treatment of highly polluted paper mill wastewater by solar photocatalytic oxidation with synthesized nano TiO<sub>2</sub>”
47. Portia Mira, Pamela Yeh, Barry G. Hall: Estimating Microbial Population Data from Optical Density