



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

# STUDIUM CHEMICKÝCH PROCESŮ INICIOVANÝCH ELEKTRICKÝM VÝBOJEM V KAPALINÁCH

STUDY OF CHEMICAL PROCESSES INITIATED BY ELECTRICAL DISCHARGE IN LIQUIDS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aneta Možíšová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdenka Kozáková, Ph.D.

BRNO 2018

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1212/2017  
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Studentka: **Aneta Možíšová**  
Studijní program: Chemie a chemické technologie  
Studijní obor: Chemie pro medicínské aplikace  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdenka Kozáková, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

### Název bakalářské práce:

Studium chemických procesů iniciovaných elektrickým výbojem v kapalinách

### Zadání bakalářské práce:

- Seznamte se s principem generace elektrického výboje v různých kapalinách a metodami diagnostiky nízkoteplotního plazmatu.
- Proveďte odbornou rešerši s ohledem na výsledné produkty vznikající v kapalně fázi a jejich analytické stanovení.
- Proveďte analýzu vybraných produktů a stanovte vliv experimentálních podmínek na jejich produkci.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 21.5.2018

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

-----  
Aneta Možíšová  
student(ka)

-----  
doc. Ing. Zdenka Kozáková, Ph.D.  
vedoucí práce

-----  
prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2018

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce v první části přibližuje proces zapálení plazmatického výboje ve vodných roztocích, generaci částic, které při výboji vznikají a jejich následné analyzování vhodnými analytickými metodami. Druhá část je zaměřena na konkrétní případy použití plazmatického výboje v prostředí vybraného elektrolytu, pro jednotlivé experimenty byly vybrány fosforečnany a pro porovnání chlorid sodný. Fosforečnany byly vybrány zejména díky jejich stabilnímu pH, jako možné výhodě při výboji. Cílem je získat nejideálnější prostředí pro zapálení plazmatického výboje a optimalizovat danou metodu, která by se následně dala využít pro medicínské účely, zejména při sterilizaci nástrojů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Nízkoteplotní plazmatický výboj, vodný roztok, fosforečnany, generace peroxidu vodíku, medicínské účely, sterilizace

## **ABSTRACT**

This Bachelor's thesis in the first part describes the process of ignition of the plasma discharge in water solutions, the generation of the particles that are generated during the discharge and their subsequent analysis by appropriate analytical methods. The second part focuses on specific cases of the use of the plasma discharge in the environment of selected electrolyte, phosphates were selected for individual experiments and for the comparison of sodium chloride. Phosphates were chosen mainly because of their stable pH as a possible benefit in discharge. The aim is to obtain the most ideal environment for the ignition of the plasma discharge and to optimize the method, which could subsequently be used for medical purposes, especially when sterilizing tools.

## **KEYWORDS**

Low-temperature plasma discharge, water solution, phosphates, generation of hydrogen peroxide, medical purposes, sterilization

MOŽÍŠOVÁ, A. *Studium chemických procesů iniciovaných elektrickým výbojem v kapalinách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 33 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdenka Kozáková, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

V Brně dne 15. května 2018

Aneta Možíšová

## **PODĚKOVÁNÍ**

V první řadě bych ráda poděkovala vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Zdence Kozákové Ph.D. za věnovaný čas, trpělivost, ochotu a odborné rady, které mi věnovala. Dále bych chtěla poděkovat doc. RNDr. Františku Krčmovi Ph.D. za jeho ochotu a pomoc při několika experimentech v laboratoři.

Ráda bych ocenila významnou podporu svých rodičů, bratra a blízké rodiny, která mi poskytuje skvělé zázemí a důležitou oporu při studiu. V neposlední řadě mým přátelům, bez kterých by to v životě nešlo.

## OBSAH

1	ÚVOD .....	8
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	9
2.1	Plazma .....	9
2.2	Typy plazmatu podle teploty .....	9
2.3	Princip generace plazmatu v kapalině .....	9
2.4	Vhodné napětí použité k realizaci elektrického výboje.....	10
2.5	Vhodné typy konfigurace plazmatu ve vodném prostředí.....	10
2.6	Metody diagnostiky plazmatu .....	12
2.7	Vzniklé produkty iniciací plazmatu v roztoku .....	12
2.7.1	Generace peroxidu vodíku výbojem ve vodných roztocích.....	12
2.7.2	Stanovení koncentrace peroxidu vodíku .....	13
2.8	Analytické metody pro stanovení vybraných produktů výboje.....	14
2.8.1	Spektrální metody .....	14
2.8.2	UV–VIS spektroskopie .....	15
2.8.3	Kolorimetrické stanovení peroxidu vodíku.....	16
2.8.4	Kolorimetrické stanovení ozonu rozpuštěného v roztoku.....	16
2.8.5	Kolorimetrické stanovení oxidů dusíku .....	17
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	18
3.1	Použitá aparatura .....	18
3.2	Roztoky.....	19
3.3	Postup práce experimentu.....	19
4	VÝSLEDKY A DISKUSE.....	23
4.1	Generace peroxidu vodíku.....	23
4.1.1	Dodaný výkon vložený ze zdroje napětí .....	23
4.1.2	Vliv polarity vloženého napětí .....	23
4.1.3	Vliv pH.....	25
4.1.4	Vliv počáteční vodivosti roztoku .....	25
4.2	Optická emisní spektroskopie.....	28
5	ZÁVĚR.....	30
6	SEZNAM ZDROJŮ .....	31
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	33

# 1 ÚVOD

Hlavní myšlenka mé bakalářské práce spočívá v doposud ne zcela probádaném potenciálu zdroje energie – nízkoteplotního plazmatického výboje. V podstatě se jedná o samotné zkoumání principu generace tohoto elektrického výboje ve vodných roztocích, jeho podmínkami vzniku a metodami diagnostiky. Snažím se pomocí experimentů zjistit nejideálnější podmínky pro jeho zapálení ve vodném roztoku, s použitím předem vybraného elektrolytu. V mém případě používám jako elektrolyt tři různé druhy fosforečnanů, lišící se počtem kyselých vodíků – tím pádem se pohybují v jiném rozmezí pH. Fosforečnany mají dobrý potenciál v tom, že si jsou svými vlastnostmi schopné, po celou dobu experimentu, držet relativně stálé pH. Takovéto látky odborně označujeme termínem pufr. Pro porovnání provádím experiment i s chloridem sodným, u kterého má na pH vliv jeho iontová síla. Dále se snažím zjistit, co všechno může mít na daný experiment pozitivní nebo negativní vliv.

Pokročilé oxidační procesy, které jsou základem mého měření (AOP) se zabývají částicemi s oxidačním potenciálem. Jejich podstatou je neselektivní oxidace zprostředkovaná částicemi s vysokým oxidačním potenciálem (hydroxylovými radikály). Generování těchto částic jde vícero způsoby – Fentonovou reakcí, ultrafialovým zářením, elektrolyzou nebo pomocí mnou zkoumaného plazmatického výboje. Důležitou vlastností těchto procesů je to, že se jedná o velice rychlý průběh experimentu, protože radikálové reakce patří mezi extrémně rychlé oxidační reakce. Hydroxylové radikály reagují s jakoukoliv sloučeninou schopnou oxidace, přičemž následuje sled oxidačních degradačních reakcí [1].

Nízkoteplotního plazmatického výboje, se kterým jsem pracovala, by se dalo využít zejména k medicínským účelům – přesněji ke sterilizaci. Pod pojmem plazmová sterilizace si představme, vystavení mikroorganismů účinkům elektrického výboje v prostředí vodného roztoku. Působením plazmatického výboje v prostředí vodného roztoku dochází k ionizaci molekul vody a vzniku hydroxylových radikálů, které jsou svými oxidačními účinky schopné sterilizace. Hydroxylové radikály přítomné v použitém roztoku můžeme stanovit pomocí optické emisní spektroskopie nebo nepřímou metodou na přítomnost peroxidu vodíku. Nepříznivým vlivem může být jen to, že působením plazmatu se vodný roztok zahřívá a to má negativní dopad na produkci peroxidu vodíku, který se nad 30 °C termicky rozkládá, tudíž musíme dbát na nižší teplotu a roztok případně ochlazovat.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Plazma

Čtvrtým skupenstvím hmoty se častokrát označuje právě plazma. Patří k nejrozšířenější formě hmoty ve vesmíru – tvoří až 99 % pozorovatelné atomární hmoty [2]. Je to vysoce ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů a částečně i neutrálních atomů a molekul. Pokud chceme plyn označit za plazma, musí vykazovat určité vlastnosti – kolektivní chování a kvazineutralitu. Těmito pojmy se rozumí, že plazma je schopné svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na takováto globální pole reagovat. Kvazineutralita je splněna přítomností volných nabitých částic. V celkovém objemu plazmatu se vytváří prostorový náboj a elektrostatické pole zpětně silově působí na nabitě částice. Výsledkem je kompenzace fluktuací hustoty náboje a plazma se chová jako elektricky neutrální. Plazma je vodivé a silně reaguje na elektrická a magnetická pole [3].

### 2.2 Typy plazmatu podle teploty

Za atmosférického tlaku a podle střední energie částic je možné se setkat se dvěma typy plazmatu. Prvním druhem je vysokoteplotní plazma – příkladem může být polární záře, blesk nebo oheň, u kterého dosahuje teplota několika tisíc stupňů Celsia. Díky tomu nemá mnoho využití za běžných podmínek [3].

Vysokoteplotní plazma se charakterizuje střední energií nabitých částic, která je větší než 100 eV, což odpovídá teplotě vyšší než 1 MK. Díky tomuto kritériu je plazma v experimentech s řízenou termonukleární syntézou považováno za vysokoteplotní. Na druhou stranu plazma ve výbojích a využívané v plazmových technologiích se považuje za nízkoteplotní [4]. Je to dáno tím, že těžké částice (neutrální částice a ionty) v tomto plazmatu mají výrazně nižší teplotu (obvykle až 10krát menší) než je teplota elektronů [5].

Nízkoteplotní plazma má podíl ionizovaných částic malý – asi jen jedno procento. Teplota iontů je blízká okolní teplotě, ale rychlost pohybu elektronů odpovídá teplotám několik tisíc stupňů Celsia [3].

### 2.3 Princip generace plazmatu v kapalině

Kapalina má v porovnání s plynem zřetelně vyšší hustotu, tato veličina tím pádem ovlivňuje v první řadě mobilitu částic v kapalině. Přenos energie je hustotou kapaliny také ve vysoké míře ovlivněn. Polarita vody a vodných roztoků usměrňuje pohyb nabitých částic působením dipólového momentu molekul vody. Všechny tyto dopady vedou k tomu, že je nutné ke generaci plazmatu v kapalně fázi dosáhnout napětí až 1 MV za atmosférického tlaku a vzdálenosti elektrod 1 cm od sebe [6].

Příčinu zapálení elektrického výboje ve vodném roztoku objasňují dva obecné typy teorií. Prvním typem teorie je teorie elektronová, která popisuje šíření plazmatu díky elektronovým

lavinám, které vznikají vložením vodného roztoku do elektrického pole a následné přímé ionizaci molekul vody. Druhou teorií je teorie tepelná – někdy označována také jako teorie bublinová. Ta popisuje způsob zapálení výboje, ke kterému dochází přímo v bublinách vznikajících vypařováním kapaliny [7].

Působení elektrického výboje v kapalině vyvolává mnoho fyzikálních a chemických procesů. Tyto procesy se můžou vhodně využít pro další účely. Nutné je říci, že generace plazmatu může být také ovlivněna velkým počtem faktorů – především vodivostí, polaritou, oxidačním stavem elektrod, vlastnostmi kapaliny nebo na druhu použitého elektrolytu. Pokud jsme pro experiment použili vodný roztok, dochází k ionizaci molekul vody a ke vzniku reaktivních částic s krátkou dobou života – radikálů (ve vysoké míře zejména hydroxylových, vodíkových a kyslíkových) nebo částic s delší dobou života, ale zároveň s relativně vysokým oxidačním potenciálem – peroxid vodíku. Částice poté mohou interagovat samy mezi sebou nebo s dalšími molekulami, ty se mohou rozkládat nebo modifikovat. Tyto procesy mohou být následně využity například při čištění vody, sterilizaci, úpravě povrchů nejrůznějších materiálů, syntéze kopolymerů nebo nanočástic [6].

Emise záření patří mezi další podstatné procesy, ke kterým dochází vlivem působení elektrického výboje v kapalině. Emisi záření můžeme pozorovat v oblasti viditelného spektra (380 až 750 nm), kdy je výboj pozorovatelný lidským okem, tak v ultrafialové oblasti (10 až 400 nm). Těchto jevů můžeme opět využít ke sterilizaci nebo rozkladným procesům nebo s využitím optické emisní spektroskopie ke kvalitativním i kvantitativním zkoumání, kdy můžeme určit složení prvků zastoupených ve vzorku. Pozoruhodným jevem doprovázející elektrický výboj v kapalině o vyšší vodivosti je vznik rázových vln. Vyšší vodivost roztoku vede k silnějším rázovým vlnám. Pokud bychom byli schopni tyto rázové vlny správně zacílit a využít jejich tlakových rázů, daly by se tím drtit ledvinové kameny, ale třeba i beton či kámen [6].

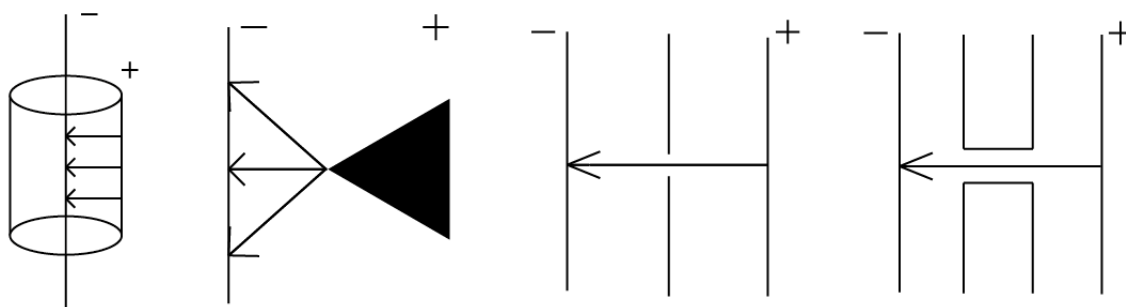
## **2.4 Vhodné napětí použité k realizaci elektrického výboje**

Pro realizaci elektrických výbojů v kapalinách se používají jednak různé konfigurace elektrod, tak různá vstupní napětí různého charakteru. Využívají se zdroje stejnosměrného (DC) nebo střídavého (AC) napětí, časté jsou také pulzní zdroje. U pulzních zdrojů je nezbytné zvýšení intenzity elektrického pole, k čemuž se využívá elektrody s malým poloměrem zakřivení [8].

## **2.5 Vhodné typy konfigurace plazmatu ve vodném prostředí**

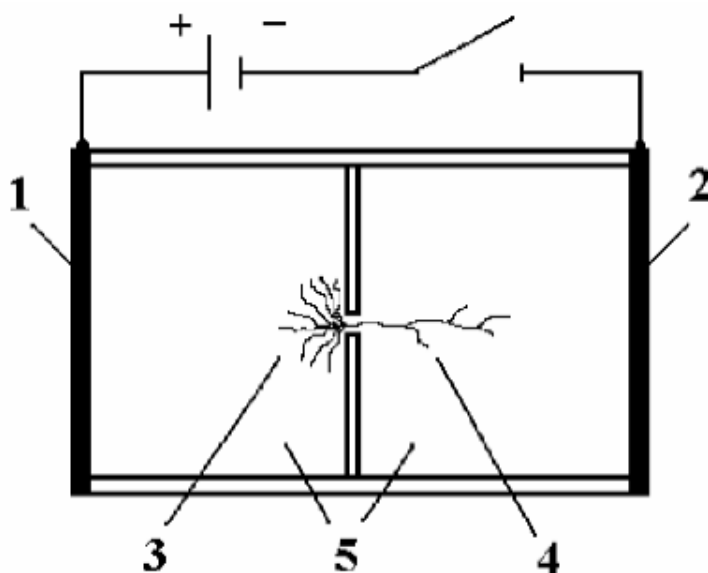
Elektrický výboj vložený do vodného prostředí je nízkoteplotní plazma generované ve formě výbojových kanálků (streamerů), ty se následně v roztoku šíří přímo mezi elektrodami. V praxi se nejčastěji využívá konfigurace hrot-rovina [9]. Mezi další konfigurace patří koaxiální konfigurace (drát-válec nebo prsteneček-válec) [10] nebo štěrbinová konfigurace. Příklady jednotlivých konfigurací elektrod jsou na Obrázku č. 1. Některé konfigurace

podporují zapálení výboje v kapalně i plynné fázi, proto dostaly označení hybridní systémy [11].



Obrázek č. 1: Typy elektrodového uspořádání. První zleva: řez koaxiální konfigurací drát (-) ve válci (+), druhý zleva je uspořádání hrot-rovina, dále štěrbinová konfigurace – třetí je diafragma (průměr:šířka štěrbiny  $l:d \approx 1:1$ ) a čtvrtá je kapilární dielektrická přepážka s otvorem mezi dvěma plochými elektrodami ( $l:d \gg 1$ )

Máme-li kapalinu s ponořenými elektrodami a oddělené dielektrickou přepážkou (diafragma či kapilára) se štěrbinou tak, že separuje dva elektrodové prostory, vzniká na této štěrbině velmi silné elektrické pole. Energie elektrického pole je koncentrována na hraně tohoto systému, v tomto případě na štěrbině dielektrické přepážky. Použití diafragmové a kapilární konfigurace poukazuje na výhodu, protože díky vysoké intenzitě na štěrbině není třeba vkládat vysoké napětí pro zapálení elektrického výboje [11]. Schéma elektrodového prostoru a dielektrické přepážky se štěrbinou je na Obrázku č. 2.



Obrázek č. 2: Schéma šíření plazmových kanálků ve stejnosměrném elektrickém výboji s dielektrickou přepážkou se štěrbinou: 1 – anoda, 2 – katoda, 3 – negativní plazmový kanálek, 4 – pozitivní plazmový kanálek, 5 – výbojová komora rozdělená přepážkou na dvě části vyplněná vodivou kapalinou [11]

## 2.6 Metody diagnostiky plazmatu

Mezi nejvýznamnější diagnostické metody pro pozorování procesů probíhajících po vložení elektrického výboje do kapaliny patří spektroskopické metody. Mezi hlavní přednosti patří to, že se jedná o nedestruktivní metodu, která nijak nepozmění zkoumaný vzorek. Mezi další výhody jejich použití je, že jimi můžeme určit další parametry o generovaném plazmatu (složení nebo rozdělení energií). Využití jde jak spektroskopie absorpční (AAS), kdy ozařujeme plazma a následně sledujeme její interakci se zářením, tak i spektroskopii emisní (AES), která zkoumá spektra záření detekovaného z plazmatu [12].

Elektrické veličiny jako je napětí, proud, výkon nebo frekvence výboje do určité míry vypovídají o elektrickém výboji v kapalinách a mohou nám ho pomoci snáze diagnostikovat. Významnými parametry popisu zapálení plazmatického výboje jsou detekce záření emitovaného výbojem a zvuk kavitace bublin. Zvyšováním vloženého vstupního napětí na elektrodách bude mít za následek, že působením bude probíhat elektrolyza, která nám bude zahřívat použitý vodný roztok. Tento ohřev povede k vypařování použitého elektrolytu v podobě bublin, ve kterých se po překročení zápalného napětí výboj zapálí [13].

Nejvíce zastoupeným druhem částic, pokud v roztoku zapálíme plazmatický výboj, jsou radikály (především hydroxylové, vodíkové a kyslíkové). Předností optické emisní spektroskopie (OES) je univerzálnost pro širokou řadu typů plazmatu nebo že se ve značné míře využívá při zkoumání elementárních a chemických procesů v plazmatu jako jsou: složení plazmatu, vibrační a rotační teplota a rozdělení energií [14].

## 2.7 Vzniklé produkty iniciací plazmatu v roztoku

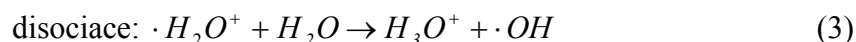
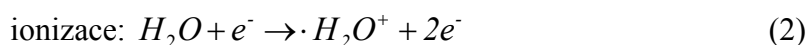
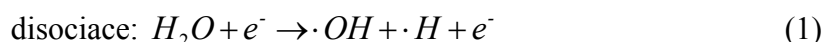
V prvním kroku po zapálení plazmatického výboje v roztoku dochází k ionizaci molekul kapaliny (nejčastěji používanou kapalinou je vodný roztok), iontů přidaného elektrolytu či jiných dalších použitých látek. Při samotném plazmatickém výboji vzniká ve vodném roztoku velké množství reaktivních částic – zejména radikálů, iontů ale i molekul [9]. Nejreaktivnější jsou hydroxylové radikály. Právě jejich působení se v mnoha procesech využívá. V průběhu výboje vznikají i molekuly peroxidu vodíku, především dimerizací hydroxylových radikálů. Přestože peroxid vodíku není tak reaktivní, uplatňuje se jako indikátor efektivity výbojů v kapalinách, které obsahují hydroxylové skupiny. Mezi další produkty iniciace plazmatu v roztoku patří oxidy dusíku.

### 2.7.1 Generace peroxidu vodíku výbojem ve vodných roztocích

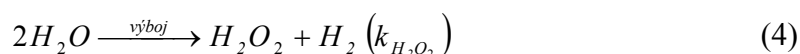
Během výboje je generováno široké množství částic, mezi ty nejdůležitější patří hydroxylové a kyslíkové radikály, ozón a peroxid vodíku. Všechny tyto látky se svými vlastnostmi významně podílejí na oxidačních procesech v roztoku [15].

Peroxid vodíku je významným oxidačním činidlem při reakcích v kapalině za použití plazmatického výboje.

Mechanismy tvorby hydroxylových a vodíkových radikálů elektrickým výbojem v kapalně fázi si představme na těchto rovnicích:



Hlavní rovnicí tvorby peroxidu vodíku během výboje ve vodném roztoku lze zapsat:



Tato rovnice je považována za hlavní reakci iniciovanou elektrickým výbojem ve vodě. Označení  $k_{H_2O_2}$  je označení pro rychlostní konstantu. Jelikož koncentrace vody zůstává přibližně konstantní, reakce je považována za reakci nultého řádu [15].

Rychlost tvorby peroxidu vodíku je tedy dána rovnicí:

$$\frac{dc_{H_2O_2}}{dt} = k_{H_2O_2} \quad (5)$$

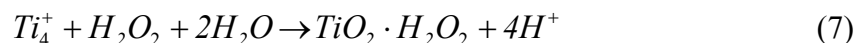
Integrací rovnice (5) podle reakčního času  $t$  získáme výraz pro koncentraci peroxidu vodíku:

$$c_{H_2O_2} = k_{H_2O_2} \cdot t \quad (6)$$

Z těchto rovnic vyplývá, že koncentrace peroxidu vodíku v čase roste lineárně a je přímo úměrná rychlostní konstantě.

## 2.7.2 Stanovení koncentrace peroxidu vodíku

Peroxid vodíku generovaný plazmatickým výbojem ve vodném roztoku se stanovuje selektivní reakcí s titanovým činidlem za vzniku žlutého zbarvení. Jedná se o vysoce selektivní činidlo. Tato metoda je označována jako nepřímá metoda stanovení. Titanové činidlo je složeno ze síranu titaničitého, rozpuštěného ve zředěné kyselině sírové. V tomto roztoku je obsažen také titaničitý iont, jenž v silně kyselém prostředí selektivně reaguje s peroxidem vodíku za vzniku žlutého zbarvení (absorpční maximum při  $\lambda_{\max} = 407$  nm). Toto zbarvení je způsobeno tvorbou komplexu kyseliny peroxotitaničité (častěji je produkt uváděn jako peroxotitanylový komplex ve tvaru  $TiO_2 \cdot H_2O_2$ ) [15]. Reakci titanového činidla s peroxidem vodíku lze popsat rovnicí:



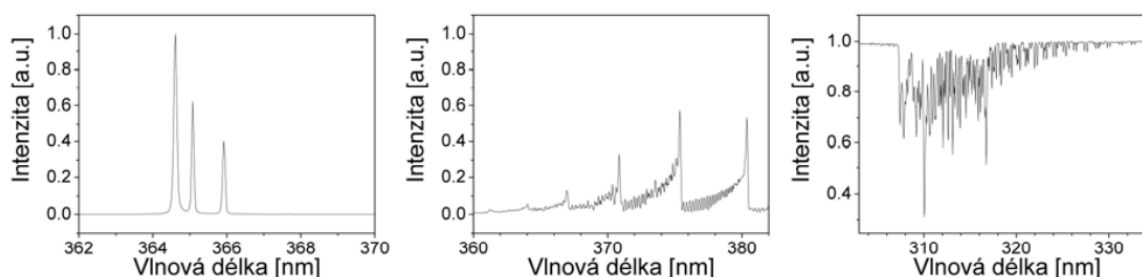
Intenzita absorpce komplexu je přímo úměrná koncentraci peroxidu vodíku v komplexu [15].

## 2.8 Analytické metody pro stanovení vybraných produktů výboje

Analytické metody pro vyhodnocení požadovaných parametrů, jako je přítomnost a koncentrace chemicky aktivních látek vzniklých při výboji či prvkové složení elektrod byly vybrány na základě rychlosti analýzy, nízkých nákladů a relativně jednoduché aplikace.

### 2.8.1 Spektrální metody

Veškeré optické metody se dělí do dvou základních skupin, které rozlišujeme podle charakteru použitého záření. Do první skupiny patří emisní spektroskopie, ta spočívá ve zkoumání záření přímo emitovaného vlastním plazmatem. Mezi jednoznačné výhody těchto metod patří jejich relativní jednoduchost a tím i přijatelná cena. Na druhou stranu mají nespornou nevýhodu v tom, že informace vypovídají pouze o atomárních a molekulárních stavech, tím pádem je složitější získat souhrnné informace o stavu plazmatu. Druhou skupinou jsou metody spočívající na principu absorbování záření. Speciálním případem může být i to, že některé metody jsou založené na absorpci záření s jejich následným vyzářením [16]. Porovnání obou typů spekter si je možné prohlédnout na Obrázku č. 3.



Obrázek č. 3: Atomové, molekulové emisní a absorpční spektrum. Zleva je emisní čárové spektrum rtuť, emisní molekulové spektrum dusíku a absorpční molekulové spektrum hydroxylového radikálu [16]

Optická emisní spektroskopie indukčně vázaného plazmatu patří ke kvalitativní, tak kvantitativní metodě a může se použít k určování veškerých prvků v roztoku. Jedná se o analytickou metodu pro stanovování zejména kovových prvků, které se generují v roztocích po jeho vystavení vlivu plazmatu nebo elektrolýze [11].

Optická emisní spektroskopie je založena na excitovaném (vybuzeném) stavu atomů a molekul ve vzorku. Nejdříve po této excitaci je možné, že částice je schopná vyzářit energii. Vybuzení je možné dodáním tepelné energie v plameni nebo v elektrických výbojích (oblouk, jiskra, indukčně vázané plazma neboli ICP nebo právě elektrický výboj generovaný v kapalině). Jedná se o neinvazivní analytickou metodu, která nemá vliv na zkoumaný vzorek a neovlivňuje vkládaný plazmatický výboj. Další výhodou je i to, že k analýze stačí malé množství vzorku [17].

Optická emisní spektrometrie je používána jako základní diagnostika diafragmového a kapilárního výboje v kapalinách. Z grafu je možné odečíst podle intenzity spektrální čáry

množství přítomného prvku ve vzorku a poloha spektrální čáry vypovídá o tom, jaký prvek se ve vzorku nachází.

### 2.8.2 UV–VIS spektroskopie

Absorpční spektroskopie je další analytickou metodou, kterou můžeme zařadit do metod optických. Lze s ní detekovat široká řada chemických látek obsažených v roztocích. V principu se jedná o to, že všechny látky jsou schopné pohlcovat elektromagnetické záření o určité vlnové délce. Zdrojem záření samozřejmě musí být dopadající paprsek, který předá svoji energii (část záření se tedy absorbuje) a energie je poté následně emitována a zachycena na vhodně zvoleném detektoru [18].

Pohlčením energie dochází k vybuzení částic (atomů nebo molekul), ve většině případů ze základního energetického stavu do vyššího. Funkčními látkami zodpovědnými za absorpci se označují chromofory. Pokud látky absorbují v ultrafialové oblasti spektra, jsou bezbarvé. A pokud ve viditelné oblasti, jsou barevné, ale lidské oko vnímá pouze barvu doplňkovou, pro demonstraci využijme Tabulku č. 1 [18].

Tabulka č. 1: Barvy spekter a jejich doplňkové barvy [18]

Vlnová délka $\lambda$ [nm]	Barva absorbujícího záření	Doplňková barva
380-450	modrá	žlutá
450-500	modrozelená	oranžová
500-580	zelená	červená
580-760	červená	modrá

Molekulová absorpční spektroskopie v oblasti UV-VIS je založena na interakcích elektromagnetického záření s molekulami analyzovaných látek v roztocích, platí při nich Bouguer-Lambert-Beerův zákon. Tento zákon říká, že záření musí být monochromatické, absorbující prostředí nesmí podléhat žádným změnám a zkoumané vzorky musí být velmi zředěné ( $c < 10^{-2} \text{ mol/dm}^3$ ) [18].

Matematické vyjádření Bouguer-Lambert-Beerova zákona:

$$A = \log \cdot \left( \frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon \cdot l \cdot c \quad (8)$$

Kde  $I_0$  – intenzita vstupujícího záření,  $I$  – intenzita vystupujícího záření,  $\varepsilon$  – molární extinkční koeficient,  $l$  – optická dráha a  $c$  – molární koncentrace vzorku.

### 2.8.3 Kolorimetrické stanovení peroxidu vodíku

Kolorimetrie patří mezi další analytické metody, přesněji k metodám optickým, které jsou založené na porovnávání intenzity zabarveného roztoku o neznámé koncentraci s roztokem téže látky o známé koncentraci. Intenzita charakteristické barevnosti látky závisí na její koncentraci v roztoku. Kolorimetrie se používá ke stanovení koncentrace látky v roztoku na základě měření světelné pohltivosti. Kolorimetrie se dělí na vizuální a fyzikální. Vizuální kolorimetrie jsou kolorimetrické postupy, při kterých se zrakem zjišťuje rovnost světelných hodnot. Fyzikální kolorimetrie jsou kolorimetrické postupy, při kterých kolorimetr měří množství světla, které prochází vzorkem při vybrané vlnové délce [19].

Typickým příkladem je detekce peroxidu vodíku generovaného elektrickým výbojem v kapalině. Na jeho stanovení se používá vysoce selektivní titanové činidlo. Skládá se ze síranu titaničitého, rozpuštěného ve zředěné kyselině sírové. V tomto roztoku je obsažen titaničitý iont, který v silně kyselém prostředí selektivně reaguje s peroxidem vodíku za vzniku žlutého zabarvení roztoku. Toto zbarvení je způsobeno tvorbou komplexu kyseliny peroxotitaničité. Absorpční maximum tohoto komplexu (407 nm) je detekováno absorpční spektroskopií. Intenzita absorpce komplexu je přímo úměrná koncentraci peroxidu vodíku v komplexu [15].

### 2.8.4 Kolorimetrické stanovení ozonu rozpuštěného v roztoku

Kolorimetrická metoda je kvantitativní, rychlou a selektivní metodou, používanou pro stanovení ozonu rozpuštěného ve vodném roztoku. Využívá se při ní spektrofotometrie s použitím barevného indikátoru – indiga. Princip je takový, že v kyselých roztocích odbarvuje ozon prudce indigo, kdy dochází ke štěpení dvojných vazeb molekul uhlíku v molekule indiga, za vzniku bezbarvé sloučeniny. Pokles v absorbanci (měření probíhá při vlnové délce 600 nm) je lineární se stoupající koncentrací ozonu. Sekundární oxidanty produkované ozonem, jako je peroxid vodíku nepůsobí u této metody rušivě [20].

Pro další určení koncentrace rozpuštěného ozonu ve vodném roztoku může být využito Mn-o-tolidinové metody. Jedná se o metodu spočívající ve vybarvení bezbarvého roztoku o-tolidinu do žluta po reakci s ozonem rozpuštěným ve vodě. Nejdříve dochází k reakci ozonu s dvojmocným manganem za vzniku  $Mn^{IV}$ , který dále oxiduje o-tolidin za vzniku žluté sloučeniny. Intenzita žlutého zbarvení je přímo úměrná koncentraci ozonu. Měření probíhá v absorpčním maximu při vlnové délce maximálně 435 nm. Nezbytným při stanovování je,

aby se dbalo, že výsledky stanovení nesmí být rušeny vznikajícími meziprodukty při rozpadu ozonu, které jsou schopné oxidace a dalšími látkami, které sledovaný systém obsahuje [21].

#### 2.8.5 Kolorimetrické stanovení oxidů dusíku

K nepřímým metodám stanovení oxidu dusnatého a jeho metabolitů patří Griessova metoda. Jedná se o spektrofotometrické stanovení koncentrace dusitanů pomocí kolorimetrických metod za využití Griessova činidla – směs sulfanylamidu a naftylethylendiaminu. Griessova reakce probíhá ve dvou krocích, v prvním kroku vzniká reakcí se sulfanylovou kyselinou diazoniová sůl, která následně reaguje s naftylethylendiaminem za tvorby barevných produktů, které jsou poté stanoveny spektrofotometricky při nejvyšší vlnové délce (543 nm). Tato metoda je vhodná pro zejména měření dusitanů v mikromolárních koncentracích [22].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Hlavním cílem bakalářské práce byla názorná ukázka štěrbinového výboje v elektricky vodivém roztoku, který způsobil vznik plazmatu, které následnými reakcemi ve vodném roztoku generovalo peroxid vodíku. Množství zastoupeného peroxidu vodíku jsem poté zkoumala vhodnými analytickými metodami.

#### 3.1 Použitá aparatura

Aparatura je složená ze zdroje vysokého stejnosměrného napětí, soustavy elektrod a kádinky viz Obrázek č. 4. Soustavu elektrod tvoří hlavní elektroda, kterou je wolframový drát v keramické trysce se štěrbinovým ukončením (pin-hole) a hliníková plochá protielektroda. Dalšími laboratorními pomůckami byla sada zkumavek, stříkačka na odběr vzorků, využívaly se laboratorní váhy (Scaltec SBC 41), konduktometr (GRYF 107LP pro vodivost 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a GMH 3431 pro vodivost 15 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a pH metr (VWR International pH10). Pro analýzu zbarvených vzorků byl využit spektrofotometr (Unicam Helios Omega).



Obrázek č. 4: Zdroj stejnosměrného napětí (vlevo) a použitá aparatura s detailním výřezem konce tryskové elektrody (vpravo)

## 3.2 Roztoky

V experimentu byly používány tři druhy elektrolytů – fosforečnanů, konkrétně dodekahydrát fosforečnan sodný, dihydrát hydrogenfosforečnan sodný a dihydrát dihydrogenfosforečnan sodný. Fosforečnany byly vybrány především díky jejich vlastnosti pufru, tedy že drží stabilní pH a v průběhu experimentu ho příliš nemění. Pro porovnání bylo provedeno měření i s roztokem chloridu sodného. Roztoky byly připravovány rozpuštěním předem vypočítané navážky elektrolytu v odpovídajícím množství rozpouštědla – destilované vody, tak aby bylo dosaženo přibližné potřebné vodivosti (300, 1 000 a 15 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Navážky elektrolytů byly počítány pro konkrétní vodivosti a reálné vodivosti byly následně proměřeny konduktometrem. Pro jednotlivá měření s jinými vodivostmi byl vždy použit roztok nový.

## 3.3 Postup práce experimentu

Nejprve byl připraven zásobní roztok o určitém objemu, který obsahoval vhodné prostředí rozpouštědla (destilovanou vodu) a elektrolytu. Předem vypočítané množství elektrolytu bylo naváženo na laboratorních předvážkách. Tím bylo zajištěno, aby všechna měření probíhala za stejné vodivosti daných vzorků. Dále bylo proměřeno pH pomocí pH metru. Taktéž musela být sledována teplota roztoku (i v průběhu experimentu), aby nedocházelo k rozkladu peroxidu vodíku, který se nad 30 °C termicky rozkládá.

Do kádinky o objemu 800 ml bylo odlito 500 ml předem připraveného zásobního roztoku. Do roztoku byla ponořena keramická plazmatická tryska, v našem případě bylo pracováno s tryskou pin-hole, která zde funguje jako generátor plazmatu. Tryska byla ponořena do roztoku tak, aby byl ponořen její konec a byla zapojena ke kladnému nebo zápornému zdroji stejnosměrného napětí. Protielektroda pak byla připojena k opačnému pólu zdroje. Zdroj byl zapnut a v roztoku bylo generováno plazma, v určitých časových intervalech byly odebírány vzorky (2 ml), které byly ponechány ve zkumavce tak, aby zreagovaly s titanovým činidlem (1 ml), složeného ze síranu titaničitého, rozpuštěného ve zředěné kyselině sírové. Sada takových vzorků byla dále analyzována ve spektrofotometru, kde se měřila absorbance vzorků při 407 nm. Naměřené hodnoty absorbance byly použity k výpočtu koncentrace peroxidu vodíku, kdy využíváme přepočít přes rovnici regrese z příloženého grafu na Obrázku č. 5:

$$y = 0,4596x \quad (9)$$

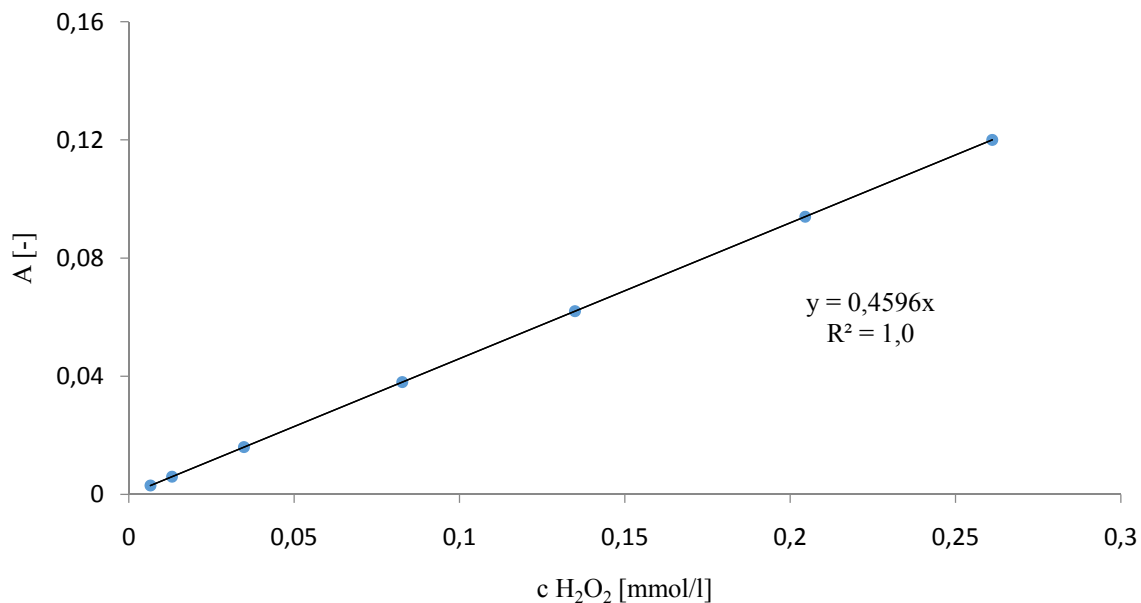
Ze závislosti absorbance na koncentraci – početní vztah ve tvaru:

$$A = 0,4596 \cdot c_{\text{H}_2\text{O}_2}, \quad (10)$$

získáme výslednou koncentraci peroxidu vodíku ve vzorku. Kalibrační přímka, ze které tento přepočít vyplývá, je na Obrázku č. 5.

Mezi faktory, kterými můžeme ovlivnit podmínky výboje ve vodném roztoku, je použití elektrolytu. Dalším důležitým faktorem je koncentrace použitého elektrolytu, která souvisí s vodivostí roztoku, může se pohybovat v rozmezí 100–15 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Zdrojem můžeme měnit polaritu roztoku, použitý výkon vkládaný do roztoku se nejčastěji pohybuje v intervalu 90–150 W. Čas odběrů vzorků se také podílí na ovlivnění podmínek elektrického výboje.

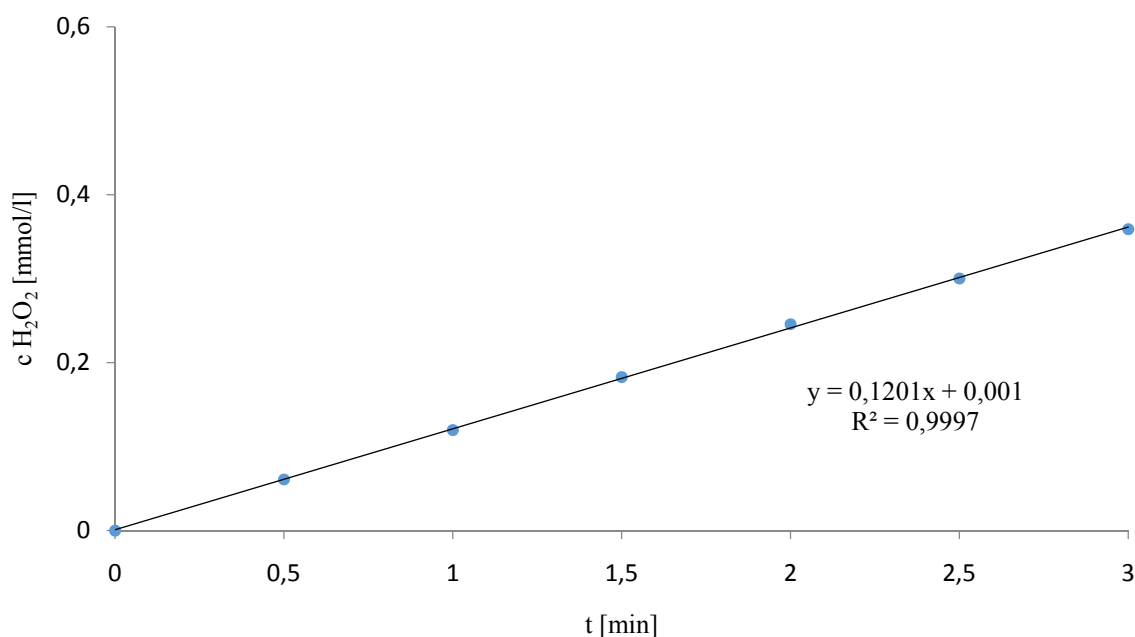
V Tabulce č. 2 jsem uvedla přehled všech mých zjišťovaných hodnot a měření.



Obrázek č. 5: Závislost absorbance na koncentraci peroxidu vodíku

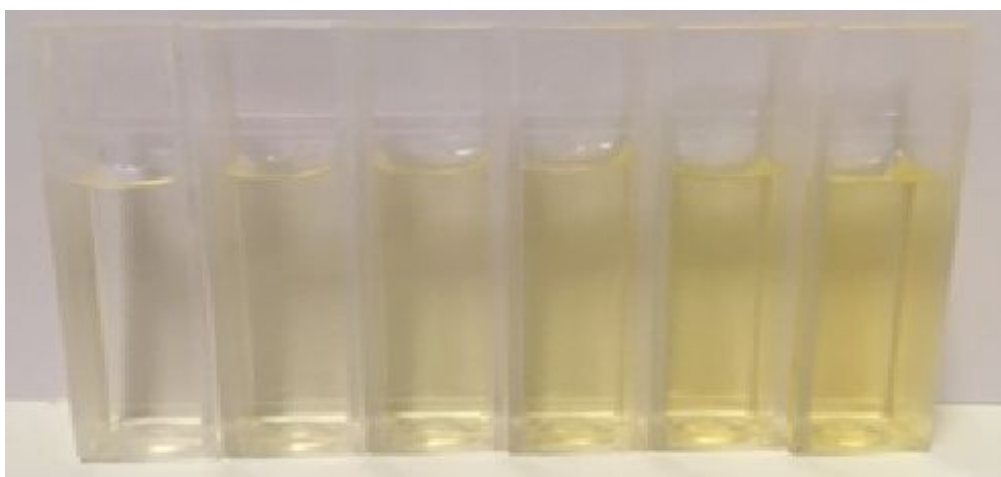
Tabulka č. 2: Přehledová tabulka měřených veličin

Elektrolyt	Molární hmotnost [g/mol]	Výrobce	Vodivost [ $\mu\text{S/cm}$ ]	Navážka pro 500 ml [g]
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	156,01	Lach-ner	300	0,33
			1 000	1,18
			15 000	18,39
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	177,99	Penta	300	0,13
			1 000	0,42
			15 000	9,13
$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	380,12	Lach-ner	300	0,16
			1 000	0,66
			15 000	12,52
NaCl	58,44	Lach-ner	300	0,10
			1 000	0,26
			15 000	3,90



Obrázek č. 6: Typická ukázka závislosti koncentrace peroxidu vodíku na času výboje při výkonu 140 W

Z grafu na Obrázku č. 6 je patrné, že s rostoucím časem, kdy necháme v roztoku působit plazmatický výboj, stoupá i generace peroxidu vodíku. Odebrané vzorky byly proměřeny na spektrofotometru při absorpční 407 nm – viz Obrázek č. 7. Jelikož dochází ke vkládání nestejného vloženého výkonu zdroje napětí při každém experimentálním měření, musíme produkci peroxidu vodíku přepočítat na tzv. společný parametr – na koeficient produkce. Hodnota koeficientu produkce peroxidu vodíku v čase byla stanovena ze směrnice lineární závislosti (z Obrázku č. 6 je tato hodnota 0,1201 mmol/lmin) a po přepočtu na společný parametr je množství peroxidu vodíku vygenerovaného na jednotku dodávané energie 0,248 mg/kJ.



Obrázek č. 7: Kyvety s odebranými vzorky se zvyšující se absorpční

## 4 VÝSLEDKY A DISKUSE

### 4.1 Generace peroxidu vodíku

Naměřená data z experimentálních měření a jejich následné zpracování můžeme udělat několika variantami, protože samotný experiment může být ovlivněn:

- typem vloženého napětí (AC, DC nebo pulzní zdroj)
- dodaným výkonem vloženým ze zdroje napětí
- polaritou vloženého napětí
- pH (fosforečnany × chlorid sodný)
- počáteční vodivosti

Protože v našem případě dochází ke vkládání nestejného výkonu zdroje napětí při každém experimentálním měření, musíme produkci peroxidu vodíku přepočítat na tzv. společný parametr – na koeficient produkce v mg  $H_2O_2$ /kJ. Každé z měření bylo prováděno jednou, pro reprodukovatelnost výsledků bylo provedeno 3krát stejné měření s jedním vybraným elektrolytem. Chyba měření byla do 10 %.

#### 4.1.1 Dodaný výkon vložený ze zdroje napětí

Vliv na samotný experiment může mít velikost vloženého napětí do roztoku. Experiment byl proveden s hydrogenfosforečnanem sodným při kladném zapojení tryskové elektrody. Z výsledků v Tabulce č. 3 můžeme vyvodit závěr, že se zvyšujícím se dodávaným výkonem se zvyšuje i produkce peroxidu vodíku.

Tabulka č. 3: Zvýšení vloženého výkonu vloženého do roztoku  $Na_2HPO_4$

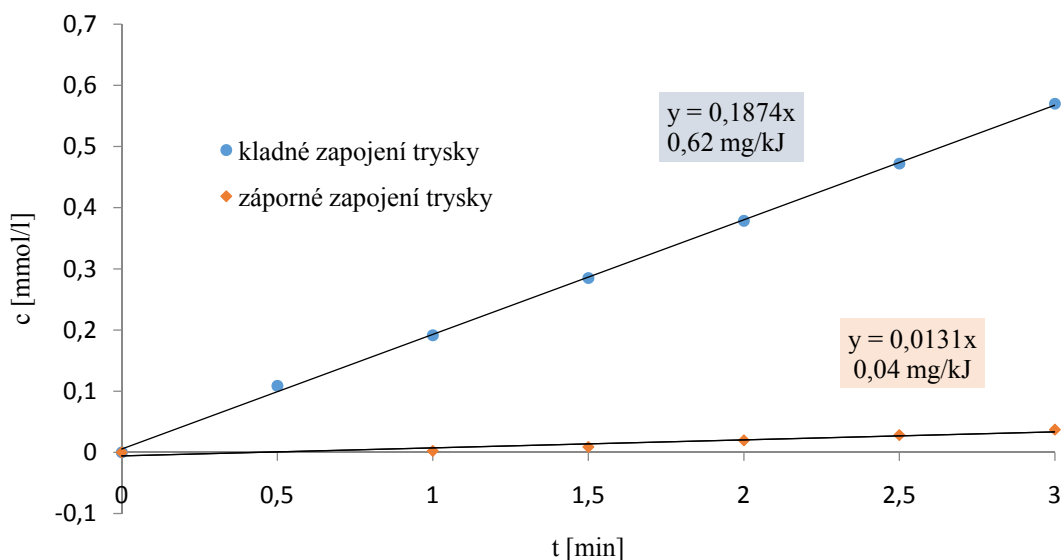
	Vodivost [ $\mu S/cm$ ]	Výkon [W]	Počáteční pH	Konečné pH	Koeficient produkce $H_2O_2$ [mg/kJ]
$Na_2HPO_4$	300	89	9,2	8,9	1,45
		66			0,69

#### 4.1.2 Vliv polarity vloženého napětí

Zapojení elektrod, tedy vliv polarity roztoku je velmi důležitý na produkci samotného peroxidu vodíku. Pro porovnání jsem do Tabulky č. 4 uvedla dva typy fosforečnanů o dvou koncentracích. Z tabulky vyplývá, že zvýšením výkonu, vloženého do roztoku v tomto případě příliš neovlivňuje generaci peroxidu vodíku, pokud je trysková elektroda zapojená jako katoda. V druhém případě, i pokud máme nižší výkon, ale tryskovou elektrodu

zapojenou jako anodu, má to kladný vliv na produkci. Na vyšší produkci je tedy jednoznačně výhodnější zapojení trysky jako anody.

Na Obrázku č. 8 jsem v grafu uvedla porovnání opačných polarit pro měření s fosforečnanem sodným o vodivosti 1 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



Obrázek č. 8: Vliv polarity vloženého napětí na generaci peroxidu vodíku

Tabulka č. 4: Vliv polarity na produkci peroxidu vodíku

	Vodivost [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	Výkon [W]	Počáteční pH	Konečné pH	Polarita tryskové elektrody	Koeficient produkce $\text{H}_2\text{O}_2$ [mg/kJ]
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	300	66	9,2	8,9	anoda	0,69
		106		8,6	katoda	0,03
$\text{Na}_3\text{PO}_4$	1 000	86	11,4	11,2	anoda	0,62
		94		11,2	katoda	0,04
NaCl	1 000	140	7,9	6,7	anoda	0,38
		105		7,0	katoda	0,04

### 4.1.3 Vliv pH

V mém případě jsem experiment prováděla se třemi druhy fosforečnanů a chloridem sodným. Pro porovnání jsem uvedla látky při přibližně stejné koncentraci (vodivosti) a jak vyplývá z Tabulky č. 5, výběr elektrolytu má výrazný vliv na produkci peroxidu vodíku. Podívejme se nejdříve na fosforečnany, po přepočtu na koeficient produkce se nejvíce peroxidu generovalo při rozpuštění dihydrogenfosforečnanu sodném, který obsahuje dva kyselé vodíky a jeho pH se pohybuje okolo 5,6. Samotné pH má tedy také značný vliv na produkci peroxidu vodíku. Kyslejší prostředí tedy více podporuje produkci peroxidu vodíku. Z tabulky je patrné, že nejvíce se nám peroxid generoval v kyselém prostředí dihydrogenfosforečnanu sodném. V případě chloridu sodného, který měl přibližně podobné pH jako hydrogenfosforečnan sodný má ale mnohem nižší procento generovaného peroxidu vodíku.

Tabulka č. 5: Vliv použitého elektrolytu na produkci peroxidu vodíku

	Vodivost [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	Výkon [W]	Počáteční pH	Konečné pH	Koeficient produkce $\text{H}_2\text{O}_2$ [mg/kJ]
$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	300	51	5,6	5,4	1,61
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	300	66	9,2	8,9	0,69
$\text{Na}_3\text{PO}_4$	300	149	10,8	10,6	0,30
$\text{NaCl}$	300	137	8,8	8,5	0,25

### 4.1.4 Vliv počáteční vodivosti roztoku

Další parametr, který může mít vliv na produkci peroxidu vodíku po vložení nízkoteplotního plazmatického výboje, je množství rozpuštěného elektrolytu v rozpouštědle. Demonstrujme si příklad na hydrogenfosforečnanu sodném (hodnoty z měření viz Tabulka č. 6), měření jsem prováděla při třech různých vodivostech. Nejvyšší produkce peroxidu vodíku po přepočtu na společný koeficient produkce nám nejlépe vyšla při nejvyšší použité vodivosti.

V průběhu experimentu (při 15 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) byly produkovány silné rázové vlny, což je způsobeno vyšší hustotou iontů v roztoku. Výsledky mohou být ale zkresleny vznikem zákalu – viz Obrázek č. 9 (důsledek reakce fosforečnanů s činidlem), přestože byl do kyvety pro analyzování odebírán čirý roztok bez sraženiny.

Tabulka č. 6: Vliv vodivosti na produkci peroxidu vodíku

	Vodivost [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	Výkon [W]	Počáteční pH	Konečné pH	Koeficient produkce $\text{H}_2\text{O}_2$ [mg/kJ]
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	300	66	9,2	8,9	0,69
	1 000	45	8,9	8,9	2,50
	15 000	28	9,5	9,3	7,27



Obrázek č. 9: Vzniklá sraženina při nejvyšší vodivosti u fosforečnanů

V následujících Tabulkách č. 7, č. 8 a č. 9 jsem uvedla jednotlivé porovnání všech mých zkoumaných elektrolytů při podobných počátečních vodivostech.

Tabulka č. 7: Porovnání produkce  $H_2O_2$  pro jednotlivé elektrolyty pro vodivost 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$

	Výkon [W]	Počáteční pH	Konečné pH	Koeficient produkce $H_2O_2$ [mg/kJ]
$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	51	5,6	5,4	1,61
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	66	9,2	8,9	0,69
$\text{Na}_3\text{PO}_4$	149	10,8	10,6	0,30
$\text{NaCl}$	137	8,8	8,5	0,25

Tabulka č. 8: Porovnání produkce  $H_2O_2$  pro jednotlivé elektrolyty pro vodivost 1 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$

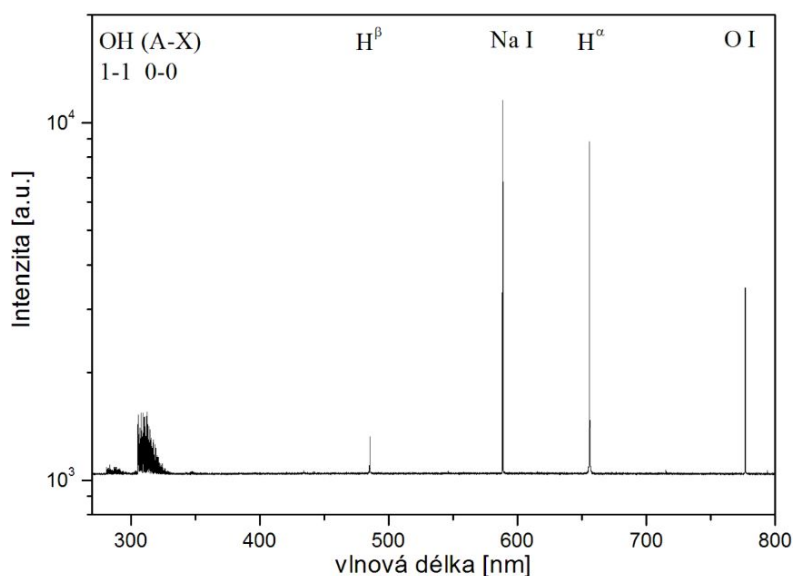
	Výkon [W]	Počáteční pH	Konečné pH	Koeficient produkce $H_2O_2$ [mg/kJ]
$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	56	5,0	5,1	2,29
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	45	8,9	8,9	2,50
$\text{Na}_3\text{PO}_4$	86	11,4	11,2	1,05
$\text{NaCl}$	140	7,9	6,7	0,38

Tabulka č. 9: Porovnání produkce  $H_2O_2$  pro jednotlivé elektrolyty pro vodivost 15 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$

	Výkon [W]	Počáteční pH	Konečné pH	Koeficient produkce $H_2O_2$ [mg/kJ]
$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	27	4,8	4,9	1,28
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	28	9,5	9,3	7,27
$\text{Na}_3\text{PO}_4$	64	13,0	12,9	0,53
$\text{NaCl}$	126	7,5	7,4	0,51

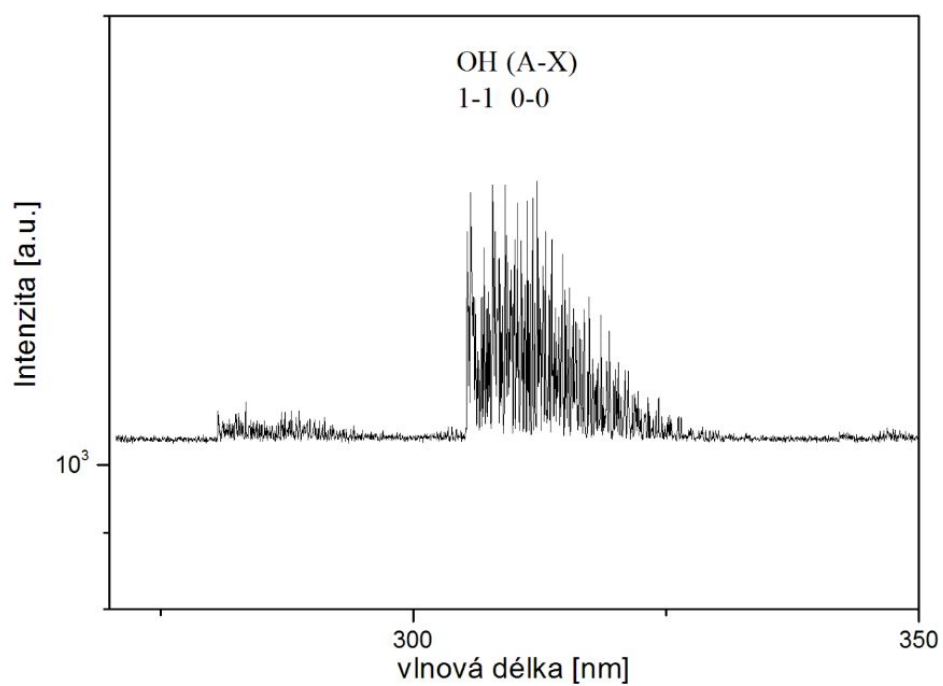
## 4.2 Optická emisní spektroskopie

V poslední řadě experimentálního měření byla provedena diagnostika generovaného plazmatu a současně analýza zkoumaného roztoku pomocí optické emisní spektroskopie, jako jedné z metod diagnostiky plazmatu. Na Obrázku č. 10 je přehledové spektrum (vlnové délky 270-800 nm), kde jsou vidět základní částice vzniklé ionizací molekul vody, respektive elektrolytu fosforečnanu sodného. Mezi částice, které tam můžeme pozorovat, patří hydroxylový radikál, atomární kyslík, atomární čáry vodíku pocházející z ionizace a disociace molekul vody (H alfa, H beta), zatímco čára sodíku (dublet) pochází z ionizace sodného kationtu z fosforečnanu sodného.



Obrázek č. 10: Emisní spektrum zkoumaného vzorku  $\text{Na}_3\text{PO}_4$

Na Obrázku č. 11 je druhé spektrum pro přiblížení spektra hydroxylového radikálu (ze kterého pak vzniká peroxid vodíku).



Obrázek č. 11: Emisní spektrum hydroxylového radikálu

## 5 ZÁVĚR

Hlavním cílem mé bakalářské práce bylo prozkoumat vliv nízkoteplotního plazmatického výboje na produkci peroxidu vodíku. Na množství zastoupeného peroxidu vodíku jsem využívala nepřímou metodu stanovení, kdy nám peroxid vodíku reaguje v prostředí titanového činidla za vzniku žlutého zbarvení, a jeho následné stanovení pomocí UV–VIS spektroskopie. Pro prvkové stanovení jsem využila optické emisní spektroskopie.

Plazmatický výboj byl vkládán do vodného roztoku, kde byl rozpuštěn předem vybraný elektrolyt. Jako dosud neotestované byly pro experimentální část vybrány tři fosforečnany, lišící se počtem kyselých vodíků a pro porovnání chlorid sodný. Fosforečnany byly vybrány, aby byla prozkoumána jejich možná výhoda v tom, že se jedná o pufr a tedy že drží relativně stabilní pH během experimentu. Díky různému počtu kyselých vodíků se tedy každý pohybuje v jiném rozmezí pH stupnice.

Dále byly sledovány i další parametry, které mají na produkci peroxidu vodíku vliv. Pokud bych měla shrnout výsledky měření a pozorování z experimentální části, nižší pH tedy kyselější vodný roztok má pozitivnější vliv na produkci peroxidu vodíku. Dalšími experimenty můžeme vyvodit, že při zvyšujícím se vkládaném napětí ze zdroje, je generováno větší množství peroxidu vodíku. Při měření s kladně i záporně zapojenou plazmatickou tryskou, byl výsledek jednoznačný, že pro větší produkci peroxidu vodíku je výrazně lepší kladné zapojení keramické plazmatické trysky.

Praktické využití generace plazmatického výboje by mohlo být při medicínských aplikacích, přesněji při sterilizaci, čištění vody nebo při dezinfikování zubních kořínků.

## 6 SEZNAM ZDROJŮ

- [1] BENEŠ, J. *Pokročilé oxidační procesy – AOP: Sborník konference "Pitná voda 2008"*. České Budějovice: W&ET Team, 2008. s. 135–140. ISBN 978-80-254-2034-8.
- [2] KREJČÍ, V. *Plazma, čtvrté skupenství hmoty*. Praha: Orbis, 1974. ISBN 505-21-852.
- [3] BRUCHANOV, M. *Plazmová sterilizace*. Fyzikální metody v medicíně II. ČVUT: FEL, 2005/2006.
- [4] MARTIŠOVITŠ, V. *Základy fyziky plazmy*. Univerzita Komenského Bratislava, 2006. 192 stran. ISBN 80-223-1983-X.
- [5] MOISAN, M., J. BARBEAU, S. MOREAU, J. PELLETIER, M. TABRIZIAN a L. H. YAHIA. Low-temperature sterilization using gas plasmas: A review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms. *International Journal of Pharmaceutics*. 2001. vol. 226, 1-21. DOI: 10.1016/S0378-5173(01)00752-9. ISSN 0378-5173.
- [6] *CHEMPOINT – Vědci pro průmysl a praxi* [online]. Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně, 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z:  
<http://www.chempoint.cz/elektricke-vyboje-v-kapalinach>.
- [7] SHARBAUGH, A., J. DEVINS a S. RZAD. Progress in the Field of Electric Breakdown in Dielectric Liquids. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 1978. EI-13, issue 4. DOI: 10.1109/TEI.1978.298076.
- [8] DORS, M., E. METEL a J. MIZERACZYK. Phenol degradation in water by pulsed streamer corona discharge and Fenton reaction. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2007. Ročník 1., číslo 1. ISSN 1735–1472.
- [9] LUKEŠ, P. *Water treatment by pulsed streamer corona discharge*. Praha: Institute of Plasma Physics, AS CR, 2001. 117 stran. ISBN 80–902–7246–0.
- [10] ŠUNKA, P., V. BABICKÝ, M. ČLUPEK, P. LUKEŠ, J. SCHMIDT a M. ČERNÁK. *Generation of chemically active species by electrical discharges in water*. Plasma Sources Science and Technology, 1999. Číslo 8., 258 stran. PII: S0963-0252(99)01750-8.
- [11] STARÁ, Z. *Study of chemical processes in electrical discharges in liquids*. Brno, 2006. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí disertační práce doc. RNDr. František Krčma, Ph.D.

- [12] CHEMPOINT – Vědci pro průmysl a praxi [online]. Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně, 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z:  
<http://www.chempoint.cz/opticka-emisni-spektroskopie-jako-metoda-diagnostiky-plazmatu>.
- [13] KRČMA, F., Z. STARÁ a J. PROCHÁZKOVÁ. Diaphragm discharge in liquids: Fundamentals and applications. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. vol. 207. DOI: 10.1088/1742–6596/207/1/012010.
- [14] KRČMA, F. *Optická emisní spektroskopie plazmatu*. Návody pro Praktikum z plazmochemie. FCH VUT v Brně, 2007.
- [15] Návody na laboratorní cvičení z plazmochemie: *Generace peroxidu vodíku diagramovým výbojem ve vodných roztocích* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická: Ústav spotřební chemie [cit. 2018-05-08].
- [16] KRČMA, F. a P. SLAVÍČEK. *Optické metody diagnostiky plazmatu pro depozice tenkých vrstev za nízkého tlaku* [online]. Brno [cit. 2018-05-08]. Dostupné z:  
<http://www.fch.vut.cz/~krcma/vyuka/plazma/optickadiagnostika.pdf>.
- [17] STUŽKA, V. *Analytická atomová optická spektrometrie*. Vydání 2. Olomouc, 2000. 81 stran. ISBN 80-244-0206-8.
- [18] SOMMER, L. a kol. *Základy analytické chemie II*. VUTIUM. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2000.
- [19] DZIK, P. *Přednáška v rámci kurzu Koloristika a kolorimetrie*. Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně, 2012. Dostupné z:  
<https://www.vutbr.cz/elearning/course/enrol.php?id=137596>.
- [20] BADER, H. Determination of Ozone In Water By The Indigo Method: A Submitted Standard Method. *Ozone: Science & Engineering* [online]. 1982, vol. 4 [cit. 2018-05-08].
- [21] *Standard Methods For The Examination Of Water and Wastewater*. 14th edition, American Public Health Association, 1975, 536 s. ISBN 1560810483.
- [22] KUPKOVÁ, Z. a L. BENEŠ. *Chemical properties, biological effects and methods of detection of nitric oxide*. *Chemické Listy*, 2004, 98: 116–122.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>AAS</b>	Atomic absorption spectroscopy (atomová absorpční spektrometrie)
<b>AC</b>	Alternating current (střídavý proud)
<b>AES</b>	Atomic emission spectroscopy (atomová emisní spektrometrie)
<b>AOP</b>	Advanced Oxidation Process
<b>DC</b>	Direct current (stejnoseměrný elektrický proud)
<b>ICP</b>	Indukčně vázané plazma
<b>OES</b>	Optická emisní spektroskopie
<b>UV–VIS</b>	Ultraviolet-visible spectroscopy (ultrafialovo-viditelná spektroskopie)
<b><math>I_0</math></b>	Intenzita vstupujícího záření
<b><math>I</math></b>	Intenzita vystupujícího záření
<b><math>\epsilon</math></b>	Molární extinkční koeficient
<b><math>l</math></b>	Optická dráha
<b><math>c</math></b>	Molární koncentrace vzorku
<b><math>\lambda_{\max}</math></b>	Absorpční maximum při vlnové délce