Středoškolská technika 2018

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Gelová dozimetrie

- nástroj radioterapeutického plánování

Filip Solař

První soukromé jazykové gymnázium
Brandlova 875, Hradec Králové

Gelová dozimetrie
- nástroj radioterapeutického plánování

Gel Dosimetry
- A Tool for Radiotherapeutic Planning

Autor: Filip Solař
Škola: První soukromé jazykové gymnázium Hradec Králové
Brandlova 875, Hradec Králové 3, PSČ 500 03
Konzultant: Mgr. Hana Bártová, Mgr. Ondřej Hospodka

Hradec Králové 15.4.2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Hradci Králové dne 15.4.2018 ……
Filip Solař

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Mgr. Haně Bártové, Ing. Václavu Spěváčkovi a Mgr. Ondřeji Hospodkovi za pomoc a rady při zpracování tohoto projektu. Dále bych chtěl poděkovat Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického v Praze za poskytnutí vhodných podmínek k uskutečnění tohoto projektu.

ANOTACE

Projekt je zaměřen na gelové dozimetry, které slouží jako nástroj při radioterapeutickém plánování. Praktická část práce je se zabývá modifikovaným Frickeho gelovým dozimetrem FeXo. Během tří pokusů zkoumá, jaký vliv na výsledky měření má čas od doby přípravy a ozáření, rozdílné teploty přípravy dozimetru a změny ve složení gelového dozimetru. Ve složení se měnily poměry xylenolové oranže a Mohrovy soli. Z prvního experimentu vyplynulo, že s přibývajícím časem od ozáření, dochází k podstatnému zhoršení kvality výsledků. Dále bylo zjištěno, že rozdílné teploty přípravy dozimetru mají vliv na výsledky měření. V poslední části výzkumu se zjistilo, že s nižším obsahem Mohrovy soli klesá citlivost dozimetru.

KLÍČOVÁ SLOVA

gelový dozimetr, dozimetrie, ionizující záření, ozařování, absorbance

ANNOTATION

Project is focused on gel dosimeters, which are used as a tool of radiotherapeutic planning. Practical part of the thesis deals with modified Fricke gel dosimeter FeXo. In three experiments, it examines, how the radiation measurements influenced are by the time from preparation and radiation, different temperatures of preparation of dosimeter and changes in the composition of gel dosimeter, in the latter of the content of xylenol orange and Mohr´s salt. The first experiment showed that the time delay from preparation and irradiation resulted in substantial deterioration of the quality of the results. During the next experiment, it was found that the temperature of preparation of the dosimeter influences the results of the measurement. In the last part of the research, it was demonstrated that decreasing amount negatively influences the sensitivity of the dosimeter.

KEY WORDS

gel dosimeter, dosimetry, ionizing radiation, radiation, absorbance

OBSAH

Poděkování 4
Anotace 5
Klíčová slova 5
Annotation 6
Key words 6
Obsah 7
Úvod 10
Teoretická část 11
1 Gelový dozimetr 12
2 Ionizující záření 13
2.1 Typy ionizujícího záření 13
2.1.1 Záření α 13
2.1.2 Záření β^+ 13
2.1.3 Záření β^- 14
2.1.4 Záření γ 14
2.1.5 Záření X 14
2.1.6 Protonové záření p^+ 14
2.1.7 Neutronové záření n^0 14
2.2 Typy zdrojů ionizujícího záření 15
2.2.1 Typy zářičů podle původu ionizujícího záření 15
2.2.2 Typy zářičů podle jejich původu 15
2.2.3 Typy zářičů podle energie 16
2.2.4 Typy zářičů podle konstrukce 16
3 Dozimetrie 17
4 Absorbovaná dávka a dávkový příkon 18
4.1 Absorbovaná dávka 18
4.2 Dávkový příkon 18
5 Radioaktivní přeměna 19
5.1 Aktivita 19
5.2 Poločas rozpadu 19
5.3 Rozpadový zákon 19
6 Absorbance a transmitance 20
6.1 Transmitance 20
6.2 Absorbance 20

6.3 Lambert-Beerův zákon 20
7 Základní druhy gelových dozimetrů 21
7.1 Polymerní gelové dozimetry 21
7.1.1 Složení 21
7.1.2 Výhody 22
7.1.3 Nevýhody 22
7.2 Radiochromní gelové dozimetry 23
7.2.1 Složení 23
7.2.2 Výhody 23
7.2.3 Nevýhody 23
8 Modifikovaný Frickeho gelový dozimetr FeXo 24
9 Zhodnocení velikosti dávky u gelových dozimetrů 26
9.1 Spektrofotometrie 26
10 Radiační chemie vodných roztoků 27
11 Stádia radiolýzy 28
11.1 Fyzikální stádium radiolýzy 28
11.2 Fyzikálně – chemické stádium radiolýzy 28
11.3 Chemické stádium radiolýzy 28
11.4 Stádium post efektů 28
Praktická část 29
12 Cíle práce 30
13 Hypotézy 31
14 Metodika 32
14.1 Příprava Frickeho gelového dozimetru FeXo 33
14.1.1 Pomůcky a chemikálie 33
14.1.2 Popis přípravy série gelových dozimetrů 33
14.2 Ozařování dozimetrů 35
14.2.1 Pomůcky 35
14.3 Měření na spektrofotometru 37
14.4 Změny spektrofotometrických vlastností v závislosti na stáří dozimetru 39
14.5 Vliv teplot při přípravě dozimetru na výsledky měření radiace 39
14.6 Vliv složení gelu na výsledky měření radiace 39
15 Výsledky 41
15.1 Změny spektrofotometrických vlastností v závislosti na stáří dozimetru 41
15.2 Vliv teplot při přípravě dozimetru na výsledky měření radiace 44
15.3 Vliv složení gelu na výsledky měření radiace 46

16 Diskuze 48
Závěr 49
Literatura 50
Obrázky a tabulky 52
Rozhovor 53

ÚVOD

Říká se, že oheň je dobrý sluha, ale zlý pán. Něco podobného lze říci i o radioaktivitě. Jedná se o fyzikální jev s velmi širokým spektrem uplatnění. Nicméně se musí udržovat pod kontrolou a je třeba znát, jestli a v jakém množství se radiace v daném úseku vyskytuje. K tomuto účelu slouží zařízení zvané dozimetr. Ve své práci se budu věnovat tak zvaným gelovým dozimetrům.

TEORETICKÁ ČÁST

1 GELOVÝ DOZIMETR

Dozimetr je zařízení, které reaguje na přítomnost ionizujícího záření a má schopnost zaznamenat velikost radiační dávky, které byl dozimetr vystaven. Nejčastěji používané dozimetry jsou osobní filmové dozimetry, které slouží ke zjištění velikosti dávky, kterou organismus absorboval. Nicméně u tohoto typu dozimetru nelze vyhodnotit velikost obdržené dávky okamžitě ale až dodatečně. Proto někteří pracovníci, kteří pracují v blízkosti radiace, používají osobní elektronické dozimetry. (www.cez.cz) Osobní elektronické dozimetry slouží k varování svého nositele, který si jej připevní na oblečení při vstupu do rizikové zóny. Pokud byl dozimetr vystaven určité dávce radiace, upozorní svého nositele akustickým varováním. (Testima, 2017)

Skupině dozimetrů, které nelze vyhodnocovat okamžitě se říká integrální dozimetry. Do skupiny integrálních dozimetrů patří například výše zmíněné filmové dozimetry nebo termoluminiscenční dozimetry. Většina integrálních dozimetrů se používá i jako osobní dozimetry, ale jen v místech, kde se neočekávají náhlé změny v intenzitě radiace. Náplň se po určitém časovém intervalu vymění a odečte se, jak velké dávce radiace byl dozimetr vystaven. Do této kategorie dozimetrů patří i gelové dozimetry, které se však jako osobní nevyužívají, protože jsou citlivé až od obdržení vyšších dávek radiace.

Gelový dozimetr je z velké části tvořen želatinou, do které se podle daného typu gelového dozimetru přidají další látky (viz kapitola: Základní druhy gelových dozimetrů). Když se tento gel následně vystaví radiaci, změní své optické vlastnosti, a to v závislosti na velikosti dávky, kterou tento gel obdržel. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)

Na rozdíl od osobního elektronického dozimetru tedy nepotřebuje k zaznamenání velikosti dávky zdroj elektrické energie. Mezi další výhody patří schopnost zaznamenávat nejen velikost dávky, ale i její prostorové rozložení. (Spěváček, 2012)

Mezi nevýhody gelového dozimetru patří, že některé typy nelze použít opakovaně a před každým ozařováním je nutné připravit nový. U typů, které lze použít opakovaně je ale i počet použití omezen do doby, než příliš ztmavne, tedy než se zvýší pozadí potřebné k vyhodnocení odezvy.

Mezi hlavní výhody gelového dozimetru patří jeho tkáňová ekvivalence. Hustota gelového dozimetru je tedy přibližně shodná s hustotou živočišné, a tedy i lidské, tkáně. Dozimetr si také zachovává svou citlivost na velikost obdržené dávky i v oblasti vyšších dávek. Vlastnosti gelového dozimetru závisí na jeho typu a okolních podmínkách. Gelový dozimetr je totiž citlivý na světlo a teplo, pro delší skladování je tedy optimální uchovávat jej v ledničce, a tím prodloužíme čas, po který bude možné jím naměřené hodnoty odečíst.

Výše uvedených výhod gelového dozimetru se pokouší využít například v lékařství pro monitorování a ověřování lékařských přístrojů, které využívají k léčbě pacientů ionizující záření. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)

2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Ionizující záření je záření, které je vydáváno nějakým zdrojem, je to tedy záření emitované, a má značně vyšší energii než běžné světlo. Tomuto záření se také říká radioaktivní, a právě velikost energie kvant, které toto záření tvoří, je základní vlastností, která určuje, jak toto záření bude působit na danou látku. Ionizující záření také označujeme jako IZ.

Energie kvant ionizujícího záření je natolik vysoká, že při interakci částic ionizujícího záření s částicemi dané látky vyráží tato kvanta elektrony z elektronového obalu atomu, a tím dochází k ionizování látky, která byla tomuto záření vystavena. Energie záření se udává v elektronvoltech. (AstroNuklFyzika)

Elektronvolt je jednotka, která nepatří do soustavy SI a rovná se kinetické energii, kterou získá jeden elektron, pokud je urychlovaný ve vakuu napětím jednoho voltu [V]. Jeden elektronvolt se rovná energii $1{,}602\times10^{-19}$ joulů [J]. (Jednotky.cz)

K vytržení elektronu z elektronového obalu atomu se musí dodat od kvant ionizujícího záření energie, která je větší než vazebná energie, která drží elektron na dané vrstvě elektronového obalu. U atomu vodíku má vazebná síla, která působí na jeho jediný elektron, který se nachází na vrstvě K, velikost 13,6 eV. Velikost vazebné energie na vrstvě K lze vypočítat jako součin druhé mocniny protonového čísla Z daného atomu a velikosti vazebné energie na vrstvě K u vodíku [$E_{\text{vazebná}} = (Z^2_{\text{daného prvku}} . 13{,}6)$ eV]. S vyššími vrstvami vazebná síla klesá a je nepřímo úměrná druhé mocnině hlavního kvantového čísla. Hlavní kvantové číslo nám udává, na jaké vrstvě se daný elektron nachází.

Jako hranice mezi energií kvant u normálního a ionizujícího záření je v radiační ochraně považována energie 5 keV. Toto ale platí pouze u některých typů záření, a to pro základní fotonové, které zahrnuje záření X (rentgenové záření) a záření γ, β^-(elektronové) a záření α (alfa). Hranice energie není určena u neutronového záření n^0 a u záření β^+ (pozitronového). (AstroNuklFyzika)

2.1 Typy ionizujícího záření

2.1.1 Záření α

Záření α je tvořeno proudem urychlených jader helia ^{4}He. Částice záření α mají ze všech ostatních zde zmíněných částic ionizujícího záření největší hmotnost a největší náboj. Náboj částic tohoto záření je kladný. Toto záření má však velmi malý dosah při interakci s jinou látkou, a tak lze snadno odstínit. (AstroNuklFyzika) Na odstínění tohoto záření stačí 1 mm silná vrstva papíru. (kdt-38.karlov.mff.cuni.cz, 2011)

2.1.2 Záření β^+

Záření β^+, které je tvořeno pozitrony, což jsou kladně nabité částice e^+. Pozitron e^+ a elektron e^- tvoří dvojici antičástice-částice. Při střetu záření β^+ s elektrony, které se nacházejí v každé látce, dochází k anihilaci. Při tomto procesu vzniká ionizující záření γ. Na odstínění tohoto záření je třeba použít vrstvu olova silnou alespoň 3 cm. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)

2.1.3 Záření β^-

Záření β^- je tvořeno proudem urychlených elektronů e^-. Částice tohoto záření jsou záporně nabité. Toto záření lze odstínit 5 – 10 mm silnou vrstvou lehkých materiálů, mezi které lze zařadit hliník nebo plexisklo. (AstroNuklFyzika)

2.1.4 Záření γ

Záření gama je tvořeno fotony, což způsobuje, že nemá energetický náboj, a proto nemůže ionizovat atomy jiné látky za pomoci elektrického náboje. Foton je rychle kmitající částicí elektrického a magnetického pole. Toto záření se emituje při jaderných přeměnách. (AstroNuklFyzika) Pro odstínění záření γ jsou potřeba materiály s vysokou hustotou, například olovo nebo beton. (kdt-38.karlov.mff.cuni.cz, 2011) Záření γ má vlnovou délku kratší, než 124 pm (1 pm = $1 . 10^{-12}$ m) (Gama záření, 2009)

2.1.5 Záření X

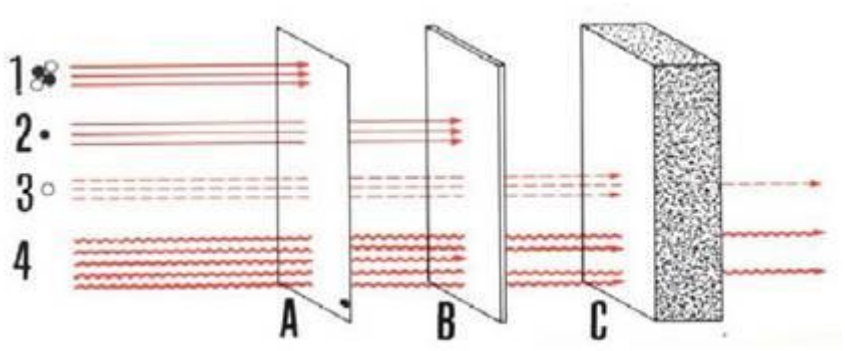
Záření X neboli rentgenové záření je, stejně jako záření γ, tvořeno proudem fotonů. Záření γ se emituje při deexcitaci jádra atomu. Záření X se emituje při deexcitaci elektronového obalu nebo jako brzdné záření, kdy částice postupně ztrácí energii a emituje ji do svého okolí. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017) Pro odstínění záření X jsou, stejně jako u záření γ, potřeba materiály s vysokou hustotou, například olovo nebo beton. (kdt-38.karlov.mff.cuni.cz, 2011)

2.1.6 Protonové záření p^+

Protonové záření p^+ je tvořeno proudem urychlených protonů p^+, neboli urychlenými jádry vodíku. Toto záření se na Zemi v přírodě nevyskytuje, tvoří však základní část kosmického záření. Tento typ záření lze také uměle vytvořit na urychlovačích. (AstroNuklFyzika)

2.1.7 Neutronové záření n^0

Neutronové záření n^0 je tvořeno proudem neutronů n^0, které pronikají do jádra atomů, kde probíhá jaderná reakce a ta způsobuje druhotnou ionizaci. Toto záření lze jen obtížně odstínit. Pro zpomalení těchto neutronů o 90 % je potřeba 20 cm silná vrstva plastu. (AstroNuklFyzika) Při stínění tohoto záření dochází k sekundárním interakcím. Z tohoto důvodu se ke stínění používá více druhů materiálů za sebou. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)



Obrázek 1: Pronikavost různých druhů ionizujícího záření (Základy medicíny katastrof)

1 – záření α 2 – záření β 3 – tok neutronů 4 – záření γ

A – list papíru B – ocelový plát C – betonová stěna

2.2 Typy zdrojů ionizujícího záření

Každé těleso nebo látka, které emituje ionizující záření lze označit jako zdroj ionizujícího záření neboli zářič. Zářiče lze dělit podle několika kritérií do několika různých skupin. (AstroNuklFyzika)

Hmotnost, rozměry a tvar zdroje ionizujícího záření jsou jedny z faktorů, které ovlivňují, jak velké množství záření je emitováno. Další parametry, které ovlivňují množství vyzářeného záření jsou vlastnosti samotného radionuklidu, tedy prvku, který je radioaktivní a ze kterého je vyroben samotný zdroj tohoto záření. U zdroje ionizujícího záření závisí na vzájemné kombinaci jednotlivých faktorů, která poté ovlivňuje, jak velký efekt emitované záření bude mít. (Dozimetrie ionizujícího záření)

V neposlední řadě u radionuklidu sledujeme typ ionizujícího záření a také jeho energii (viz kapitola Ionizující záření).

2.2.1 Typy zářičů podle původu ionizujícího záření

Zde rozdělují zářiče podle toho, jakým způsobem emitují ionizující záření. Toto dělení dělí zářiče do dvou skupin.

První skupinou jsou elektronické zdroje záření. Ionizující záření je v nich emitováno na základě elektromagnetického urychlování nabitých částic. Jedná se zejména o rentgenové trubice a urychlovače částic.

Druhou skupinou jsou radioaktivní zářiče. U toho typu vzniká ionizující záření na základě samovolných přeměn jader radionuklidů. (AstroNuklFyzika)

2.2.2 Typy zářičů podle jejich původu

Základním dělením je rozdělení zářičů na zářiče přírodního původu a uměle vytvořené.

Přírodní zářiče vnikly samovolnými přírodními jevy, které probíhají bez vlivu člověka. Mezi přírodní zářiče můžeme zařadit některé radioaktivní izotopy různých prvků jako například draslík ^{40}K, tritium ^{3}H nebo radon ^{222}Rn.

Uměle vytvořené zářiče jsou zářiče, které vytvořil člověk a využívá j v přístrojích, které spadají do nejrůznějších odvětví. Příkladem umělých zářičů mohou být lékařské přístroje, jaderné elektrárny nebo i radionuklidy. (AstroNuklFyzika)

2.2.3 Typy zářičů podle energie

Zde rozlišujeme, zářiče nízkoenergetické a vysokoenergetické. Nízkoenergetické zářiče emitují částice, jejichž energie se pohybuje v hodnotách jednotek až stovek keV. Také se jim říká kilovoltážní zářiče. Do kategorie kilovoltážních zářičů spadá většina radionuklidů.

Vysokoenergetické zářiče emitují částice o energiích, které začínají na jednotkách MeV a dosahují velikostí až TeV. Těmto zářičům se také říká megavoltážní zářiče. Do kategorie megavoltážních zářičů náleží vysokoenergetické urychlovače. (AstroNuklFyzika)

2.2.4 Typy zářičů podle konstrukce

Zde dělíme radionuklidové zářiče do dvou kategorií, a to na zářiče otevřené a uzavřené. U otevřených zářičů je látka emitující ionizující záření volně přístupná a lze s ní manipulovat, například pipetovat, nebo oddělovat. Látka u těchto zářičů je většinou v podobě plynů, prášků nebo roztoků. Uzavřené zářiče jsou zkonstruovány tak, že radioaktivní látka, kterou tento zářič využívá jako zdroj ionizujícího záření je vzduchotěsně, tedy hermeticky uzavřena v obalu, který není radioaktivní, takže za běžných okolností by nemělo dojít k úniku této látky. Při používání tohoto zářiče se využívá jen ionizující záření, které projde obalem a samotná radioaktivní látka do aplikace nezasahuje. (AstroNuklFyzika)

3 DOZIMETRIE

Jedná se o vědecký obor, který se zabývá ionizujícím zářením a problémy, které s ním souvisí. Tento vědecký obor má, jako ostatní vědecké obory svou vlastní historii, která je delší než sto let. Jedná se poměrně o mladý a dosud ne příliš známý obor, který se však rychle rozšiřuje a dostává do povědomí, protože je pro člověka, který v dnešní době pracuje s ionizujícím zářením stále častěji, velmi důležitý. (Dozimetrie ionizujícího záření, 2007)

Dozimetrie má například význam pro zajištění radiační ochrany v jaderných elektrárnách, a tím pomáhá především chránit zdraví pracovníků. Dále pak také pomáhá chránit životní prostředí. (Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, 2014)

Dalším odvětvím, kterým se dozimetrie zabývá, je interakce částic ionizujícího záření s hmotou. Tuto interakci lze zjednodušeně definovat jako pravděpodobnost střetu částice ionizujícího záření s částicí tělesa, které se nachází v poli tohoto záření. Efektivita ozařování ionizujícím zářením se tedy zvyšuje buď s rostoucím počtem emitovaných částic nebo s rostoucím počtem částic ozařovaného tělesa, ale také i s rostoucími počtem obou těchto částic. (Dozimetrie ionizujícího záření, 2007)

4 ABSORBOVANÁ DÁVKA A DÁVKOVÝ PŘÍKON

4.1 Absorbovaná dávka

Absorbovaná dávka je veličina, která nám udává, jak velkou energii ionizující záření předalo určitému množství látky, v konkrétní části ozařovaného předmětu. Tuto veličinu značíme D. Předaná energie se vyjadřuje v joulech [J]. Tato energie se vztahuje k hmotnosti, která se udává v kilogramech. Jednotkou absorbované dávky je $J \cdot kg^{-1}$, této jednotce se říká gray [Gy]. (Radiobiologie, 2010)

4.2 Dávkový příkon

Dávkový příkon je veličina, která nám udává, kolik energie v podobě ionizujícího záření je schopen zářič předat tělesu za určitý časový úsek. Dávkový příkon se značí $\dot{D}$.

Dávkový příkon lze tedy definovat jako poměr předané energie, kterou v tomto případě značíme D, a času, za který k tomuto předání došlo. Čas zde značíme jako t. Toto lze zapsat jako $\dot{D} = D \cdot t^{-1}$. Jednotkou dávkového příkonu je gray za sekundu [$Gy \cdot s^{-1}$]. (Radiobiologie, 2010)

5 RADIOAKTIVNÍ PŘEMĚNA

5.1 Aktivita

Aktivita je veličina, která nám udává kolik přeměn proběhne v dané látce za určitý časový úsek. Jednotkou této veličiny je Becquerel [Bq]. Při aktivitě o velikosti 1 Bq proběhne v dané látce jedna změna za dobu jedné sekundy (N Bq = $N_{přeměn}$. s-1). (Wikiskripta 1, 2015)

5.2 Poločas rozpadu

Poločas rozpadu je veličina, která nám udává za jak dlouhý časový interval dojde k jaderné přeměně jedné poloviny jader daného radionuklidu. Poločas rozpadu u daného prvku je téměř za všech podmínek stejný, nelze ho tedy ovlivnit téměř jakoukoli změnou okolních podmínek, například změnou teploty nebo tlaku. Poločas rozpadu se značí jako $T_{1/2}$. (Wikiskripta 2, 2014)

5.3 Rozpadový zákon

Rozpadový zákon udává, kolik jader radionuklidu se rozpadne za určitý časový interval. Časový interval, během kterého dojde k rozpadu jader značíme t. Počet jader v čase t značíme N. Počet jader v čase t = 0 značíme N_0 (Wikiskripta 5, 2015). λ je zde rozpadová konstanta, která je pro každý radionuklid jiná a udává se v s^{-1} (Enpedie). e zde značí Eulerovo číslo, což je konstanta (e = 2,718) (Wikiskripta 4, 2018). V rozpadovém zákonu platí následující vztah: $N = N_0 . e^{-\lambda . t}$ (Wikiskripta 5, 2015).

6 ABSORBANCE A TRANSMITANCE

6.1 Transmitance

Transmitance je veličina, která nám udává, jak velké množství světle dané vlnové délky prošlo prosvěcovaným vzorkem. Transmitanci značíme T. Transmitance se tedy vypočítává jako poměr intenzity světla, které prošlo měřeným vzorkem, a intenzity světla, které vstoupilo do vzorku, tedy $T = I \,.\, I_0^{-1}$. (Lázníčková a kolektiv, 2014)

6.2 Absorbance

Absorbance je veličina, která udává, jak velké množství světla je látkou pohlceno. Absorbanci se také říká optická hustota. Absorbance je bezrozměrná veličina a značíme ji A. Absorbance se vypočítává jako záporný logaritmus transmitance [$A = - \log T = - \log (I \,.\, I_0^{-1}) = \log (I_0 \,.\, I^{-1})$] Absorbance se měří na spektrofotometru při vyhodnocování velikosti dávky u gelových dozimetrů (viz podkapitola: Spektrofotometrie). (Lázníčková a kolektiv, 2014)

6.3 Lambert-Beerův zákon

Lambert-Beerův zákon slouží k výpočtu absorbance, jejíž velikost je přímo úměrná tloušťce látky, kterou světlo prochází. Lambert-Beerův zákon lze zapsat jako $A = \varepsilon_\lambda \,.\, b \,.\, c$. A je zde absorbance měřené látky pro vlnovou délku λ. ε_λ zde značí molární absorpční koeficient měřené látky pro vlnovou délku λ a jeho jednotkou je $cm^{-1} \,.\, mol^{-1}$. b značí tloušťku měřené látky a udává se v cm. c vyjadřuje látkovou koncentraci pro danou látku a její jednotkou je mol na litr [$mol \,.\, l^{-1}$]. (Volka a kolektiv, 2006)

7 ZÁKLADNÍ DRUHY GELOVÝCH DOZIMETRŮ

Gelový dozimetr je typ chemického dozimetru. Při interakci gelového dozimetru s ionizujícím zářením dochází uvnitř dozimetru k radiolýze, která je doprovázena chemickou reakcí. Velikost výtěžku této chemické reakce je přímo úměrný velikosti dávky ionizujícího záření, kterému byl dozimetr vystaven. Na základě vyhodnocení velikosti výtěžku chemické reakce se tedy následně určí velikost dávky, kterou dozimetr obdržel.

Gelový dozimetr je obsažen v nosné matrici. Tato matrice neslouží k detekci radiace, ale díky ní je gelový dozimetr schopen zaznamenat trojrozměrné rozložení dávky v dozimetru. Jedná se tedy o 3D dozimetrii. Jako nosná matrice se nejčastěji používá želatina.

Gelové dozimetry se dělí na dva typy. Jedná se polymerní a radiochromní gelové dozimetry. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)

7.1 Polymerní gelové dozimetry

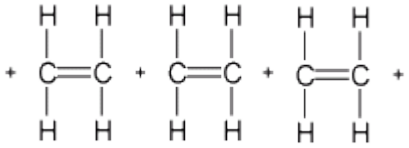
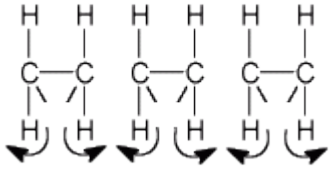
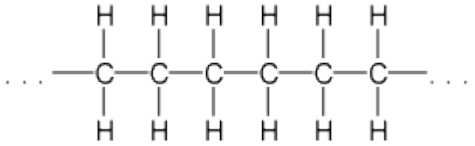
Základem polymerních gelů je roztok monomeru. Monomer je nízkomolekulární látka, tedy látka s malou relativní molekulovou hmotností. Monomer slouží jako základní látka k výrobě makromolekulárních látek neboli polymerů, tedy látek, jejichž relativní molekulová hmotnost je větší než u látek nízkomolekulárních. Nicméně hranice mezi nízkomolekulárními a makromolekulárními látkami není přesně stanovena. (oskole.sk)

Vzniku polymerů se říká polymerace. (Spěváček, 2012)

7.1.1 Složení

Jako monomer lze například použít akrylamid, kyselinu akrylovou nebo kyselinu metakrylovou. Polymerace probíhá v té části dozimetru, která byla vystavena ionizujícímu záření. Při polymeraci nevzniká žádný vedlejší produkt. Podmínkou, aby mohla látka polymerovat je, že musí mít nejméně jednu dvojnou vazbu. (Chemie pro začátečníky) Míra polymerace v místě, které bylo vystaveno ionizujícímu záření je přibližně úměrná velikosti dávky ionizujícího záření. (Spěváček, 2012)

Tabulka 1: Proces polymerace (Chemie pro začátečníky)

1. Vstupní látka monomeru, kterou v tomto případě zastupuje ethylen C_2H_4	
2. Zaniknutí jedné vazby ve dvojných vazbách molekuly.	
3. Propojení molekul mezi sebou a vznik polymeru, který v našem případě zastupuje polyethylen.	

Do roztoku monomeru se ve většině případů přidává také síťovadlo. Síťovadlo je látka, jejíž molekuly obsahují alespoň dva reaktivní konce. Těmito konci je molekula síťovadla schopná napojit se na proteiny jiné látky. Mezi molekulami síťovadla a želatiny vznikají mezimolekulární příčné vazby. (Jarošová, 2015) Jako síťovadlo se používá metylen bis(akrylamid) (Spěváček, 2012).

7.1.2 Výhody

Mezi hlavní výhody tohoto typu gelového dozimetru patří stabilita neozářeného dozimetru, tedy že nedochází k samovolné polymeraci předtím, než je dozimetr ozářen. (Spěváček, 2012)

Další výhoda polymerního gelového dozimetru spočívá ve stabilitě dozimetru po jeho ozáření. Informace, která je do dozimetru zanesena je tedy i po delší době nezměněna. Toto je způsobeno, stejně jako v předchozím odstavci, tím, že nedochází k samovolné polymeraci mimo pole ionizujícího záření. (Spěváček, 2012) K vyšší stabilitě ozářeného dozimetru přispívá i to, že po ozáření téměř nedochází k degradaci vzniklého polymeru ani k jeho samovolného posunu či rozplývání. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)

Tento typ dozimetru lze také spolehlivě vyhodnocovat pomocí magnetické rezonance, která je schopná prostorově přečíst velikost zaznamenané dávky radiace. (Spěváček, 2012)

7.1.3 Nevýhody

Polymerní gelové dozimetry mají nicméně i několik nevýhod. Jako první bych jmenoval poměrně náročnou přípravu, která zahrnuje plnění polymerního gelu do fantomu, tedy nádoby, ve které se gel nachází, v atmosféře dusíku. Fantom musí být následně uzavřen, aby byla uchována atmosféra dusíku uvnitř fantomu, i po dokončení přípravy dozimetru. Důvodem tohoto opatření je předejít vniknutí vzdušného kyslíku do interní atmosféry fantomu. Vzdušný kyslík by zabránil polymeraci, pokud by došlo k většímu vniknutí vzdušného kyslíku, dozimetr by byl znehodnocen.

Další nevýhodou tohoto typu dozimetru je použití některých toxických látek k přípravě dozimetru.

Poslední větší nevýhodou polymerních gelových dozimetrů je způsob jejich vyhodnocování. Jak jsem psal výše, jedná se sice o propracovaný způsob, ve kterém se využívá magnetická rezonance, nicméně je tento postup poměrně finančně náročný. (Spěváček, 2012)

7.2 Radiochromní gelové dozimetry

Radiochromní gely obsahují roztok dané látky, který je stejně jako u polymerních gelů zafixován v želatinové matrici. Tato látka změní barvu, pokud je vystavena ionizujícímu záření. Míra změny barvy je závislá na velikosti dávky radiace, jaké byl dozimetr vystaven. (Spěváček, 2012)

7.2.1 Složení

Většinou se používá roztok Fe^{2+} ve formě $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2.6H_2O$ – Mohrova sůl s přídavkem xylenolové oranže (XO), která zde slouží jako organické barvivo. Xylenolová oranž vytváří s Fe^{3+}, který vzniká působením radiace, fialový komplex. (Spěváček, 2012)

7.2.2 Výhody

Mezi hlavní výhody radiochromních gelových dozimetrů patří především nenáročná příprava.

Tento typ dozimetru je také tvořen látkami, které nejsou toxické a jejich pořizovací cena není tak vysoká jako u polymerních gelových dozimetrů.

Další zásadní výhodou tohoto dozimetru je snadné vyhodnocování naměřených hodnot. Tento dozimetr se vyhodnocuje optickými metodami. Nejčastěji se k vyhodnocování výsledků z dozimetru používá optická tomografie, která je jednoduchá na obsluhu a jejíž provoz není nákladný. (Spěváček, 2012)

7.2.3 Nevýhody

I tento typ dozimetru má ale i své nevýhody. Neozářené radiochromní gelové dozimetry mají malou stabilitu a mají tendenci samovolně tmavnout, je tedy potřeba je připravit krátce před ozařováním.

Kvůli rychlé difuzi iontů Fe^{3+}, tedy přesunu částic z místa s vyšší koncentrací do místa s nižší koncentrací, dochází k rychlému rozrušení trojrozměrné informace, kterou zanechalo ionizující záření. Dozimetr má také i po ozařování tendenci samovolně tmavnout.

Radiochromní gelové dozimetry je tedy třeba vyhodnocovat co nejrychleji po ozařování, jinak hrozí znehodnocení výsledků. Výše uvedené procesy je možné zpomalit uchováváním dozimetru ve tmě a chladu. Nicméně i přesto je lepší vyhodnotit dozimetr nejpozději do dvou hodin po jeho ozáření. (Spěváček, 2012)

8 MODIFIKOVANÝ FRICKEHO GELOVÝ DOZIMETR FEXO

Frickeho gelový dozimetr FeXo patří do kategorie radiochromních gelových dozimetrů.

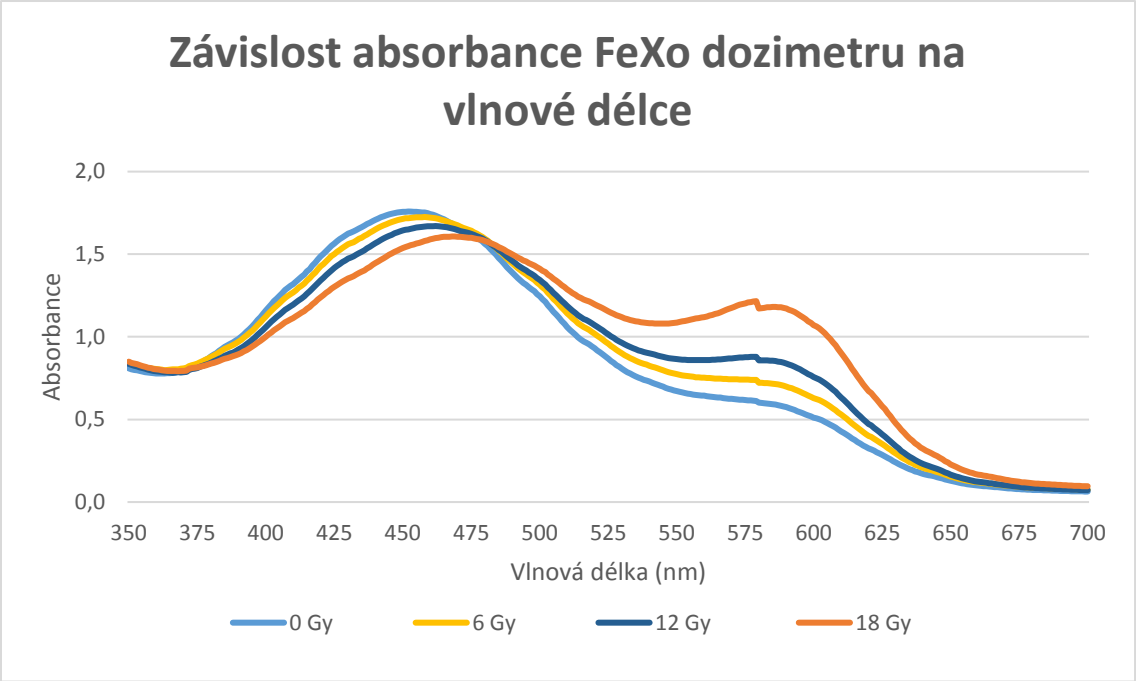
Základem Frickeho gelového dozimetru, stejně jako u ostatních gelových dozimetrů, je roztok želatiny, který slouží k zafixování prostorového rozložení dávky. V želatině je přimíchána Mohrova sůl, která slouží jako zdroj iontů dvojmocného železa Fe^{2+}, které se poté následně vlivem ionizujícího záření oxiduje na ionty trojmocného železa Fe^{3+}. (Spěváček, 2012)

Nicméně jedinou možností, jak tento dozimetr vyhodnotit, bylo pomocí magnetické rezonance. Optické metody vyhodnocování nebylo možné použít, protože želatina absorbuje světlo i v UV spektru, a tím ruší při vyhodnocování. Za účelem přesunutí optických změn dozimetru na úroveň viditelného spektra se do želatiny přidává i xylenolová oranž. Po přidání xylenolové oranže mluvíme již o modifikovaném Frickeho gelovém dozimetru FeXo. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)

Pro xylenolovou oranž se používá značka Xo a její sumární vzorec je $C_{31}H_{28}N_2O_{13}$. Jedná se o oranžovou látku, která se váže na ionty Fe^{3+} a vytváří s nimi komplexy o látkových poměrech: Xo_2Fe, XoFe a $XoFe_2$. Pokud je koncentrace iontů Fe^{3+} nízká, tvoří se převážně komplex Xo_2Fe. S rostoucí koncentrací iontů Fe^{3+} se tvoří komplex XoFe. Jakmile koncentrace iontů Fe^{3+} překročí $5 . 10^{-5}$ mol . l^{-1}, která nastává přibližně po obdržení dávky 10 Gy, tvoří se již pouze komplexy $XoFe_2$. Vrcholná absorbance každého z těchto komplexů nastává při různých vlnových délkách. Výslednou barvu dozimetru po ozařování tedy určuje poměr jednotlivých komplexů.

Výsledným ukazatelem, který se sleduje při vyhodnocování velikosti dávky, je absorbance dozimetru při 585 nm vlnové délky světla, což je maximální absorbance komplexu $XoFe_2$. Čím vyšší je absorbance, tím vyšší je i velikost dávky, kterou dozimetr obdržel.

Maximální absorbance volné Xo je při vlnové délce 440 nm, u Xo_2Fe nastává při 480 nm, u XoFe maximální absorbanci můžeme naměřit při 540 nm vlnové délky světla. (Spěváček, 2012)



Graf 1: Ukázka závislosti absorbance FeXo dozimetru na vlnové délce při různých dávkách

9 ZHODNOCENÍ VELIKOSTI DÁVKY U GELOVÝCH DOZIMETRŮ

Pokud je gelový dozimetr vystaven dávce ionizujícího záření, proběhnou v jeho složení určité mikroskopické změny. Tyto změny se následně projevují makroskopicky, a to v podobě rozdílné propustnosti světla v porovnání se stejným dozimetrem, který obdržel jinou velikost dávky, či nebyl vystaven ionizujícímu záření vůbec.

Lze tedy říci, že velkosti mikroskopických i makroskopických změn dozimetru jsou úměrné velikosti dávky radiace, kterou dozimetr obdržel.

Ke zjištění velikosti dávky se u dozimetru používají magnetická rezonance (MRI) a optická výpočetní tomografie (OCT). (Spěváček, 2012)

9.1 Spektrofotometrie

Spektrofotometrie je vyhodnocovací metoda, která slouží i k vyhodnocování dozimetrů. K vyhodnocování vzorků spektrofotometrií se využívá spektrofotometr. Tato metoda při vyhodnocování prosvěcuje dozimetr světlem v rozmezí vlnových délek, které se předem nastaví. Maximální rozsah vlnových délek, ve kterých lze měřit je 200 – 800 nm. Spektrofotometr poté naměří pro každou vlnovou délku světla, kterou byl vzorek prosvěcován transmitanci a absorbanci. (Hejsková, 2016)

10 RADIAČNÍ CHEMIE VODNÝCH ROZTOKŮ

Při interakci ionizujícího záření ve vodném roztoku dochází k radiolýze. Radiolýza je chemický děj, při kterém dochází vlivem ionizujícího záření k rozkládání molekul prostředí. (Wikiskripta 3, 2016) U radiolýzy sledujeme radiačně chemický výtěžek, který se také označuje jako G-hodnota. Tato veličina nám udává počet částic, které byly upraveny radiolýzou nebo přímo vznikly jako produkt radiolýzy, který připadá na 100 eV energie, kterou látka obdržela od ionizujícího záření. (encyklopedie.vseved.cz, 2011)

K radiolýze dochází na základě radiačních efektů probíhajících v mikroměřítku. Jsou popisovány oborem mikrodozimetrie. Po vystavení prostředí IZ vznikají v místech předávání energie částicemi IZ tzv. stopy. (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)

Stopa je útvar, který vzniká v hustém prostředí, které bylo vystaveno ionizujícímu záření. Za husté prostředí lze považovat pevnou látku, kapalinu nebo plyny vystavené vysokému tlaku. Pokud tímto prostředím projde částice ionizujícího záření s energií větší než několik desítek elektronvoltů [eV], předá svou energii elektronům částic daného prostředí.

Toto předávání energie je stochastický děj. Je to tedy děj, který je zcela náhodný, nelze přesně spočítat a lze zkoumat jen statisticky. V těsném okolí kolem dráhy ionizující částice se vytváří útvary, které tvoří ionizované nebo excitované atomy a molekuly. Velikost těchto útvarů je závislá na velikosti energie, kterou ionizující částice předala atomům a molekulám v daném místě. (Spěváček, 2012)

Excitované atomy a molekuly jsou částice, jejichž elektrony v elektronovém obalu získaly od okolí, v našem případě od ionizující částice, energii a byly přeneseny do vyšší energetické hladiny, jsou tedy dále od jádra atomu. (www.dejvikovy.estranky.cz, 2010)

11 STÁDIA RADIOLÝZY

Radiolýzu dělíme na čtyři stádia, a to podle toho, jak rychle po proběhnutí interakce částic ionizujícího prostředí s částicemi prostředí, tyto procesy proběhnou. (Spěváček, 2012)

11.1 Fyzikální stádium radiolýzy

Prvním stádiem je fyzikální stádium, které probíhá bezprostředně po interakci částic ionizujícího záření s molekulami prostředí. Toto stádium radiolýzy probíhá v čase 10^{-18} – 10^{-16} s a dělí se na dvě části. V tomto stádiu probíhá ionizování molekul interakcí částic ionizujícího záření s částicemi prostředí a následný a vznik elektronového ruchu. (Spěváček, 2012)

11.2 Fyzikálně – chemické stádium radiolýzy

Toto stádium je přechod mezi reakcemi fyzikálními a chemickými a probíhá v čase od 10^{-15} s do 10^{-12} s. V tomto stádiu jsou již plně rozlišeny elektronické stavy částic a elektrony v prostředí mají subexcitační energii, tedy energii, která je vyšší než jejich normální stav, ale nižší než jejich vazebná energie. V tomto stádiu také probíhají disociační děje, tedy děje, při kterých dochází ke štěpení molekul prostředí na menší molekuly. V této fázi také probíhá degradace, tedy snížení excitační energie a navrácení atomů a molekul na jejich původní energetické hladiny. Stopa je již plně zformována. (Spěváček, 2012)

11.3 Chemické stádium radiolýzy

Toto stádium probíhá mezi 10^{-11} a 10^{-3} s. V chemickém stádiu probíhají rychlé chemické děje ve stopě. Látky, které jsou rozpuštěné v roztoku reagují, a tím dochází například k oxidaci, redukci a polymeraci. Chemické reakce v roztoku končí. (Spěváček, 2012)

11.4 Stádium post efektů

Toto stádium začíná po 10^{-2} s po proběhnutí interakce. V tomto stádiu nastávají biologické a chemické efekty, které již nejsou přímo poháněny ionizujícím zářením. (Spěváček, 2012)

PRAKTICKÁ ČÁST

12 CÍLE PRÁCE

Cílem práce bylo zjistit, jak se mění vlastnosti gelového dozimetru v závislosti na následujících faktorech:

1) době mezi přípravou dozimetru, jeho ozářením a vlastním měřením
2) teplotě při přípravě gelového dozimetru
3) změně složení gelu ve smyslu různých poměrů přidané xylenolové oranže a Mohrovy soli

13 HYPOTÉZY

Hlavní hypotézy projektu jsou shrnuty v následujících bodech. Předpokládali jsme, že:

1) Kvalita výsledků dozimetru se výrazně zhorší během 4 dní od ozařování.
2) Výsledky měření z dozimetru budou stejné při dvou různých teplotách přípravy.
3) Změna složení gelu bude mít vliv na výsledky měření radiace.

14 METODIKA

Všechny pokusy byly provedeny v období od 19.6. do 23.10.2017 v laboratořích Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického v Praze. Vedoucí práce byla Mgr. Hana Bártová, odborným konzultantem projektu byl Ing. Václav Spěváček.

Výzkum byl rozdělen na tři části. V první části byla zjišťována závislosti mezi dobou přípravy gelového dozimetru, ozářením a vlastním měřením. Ve druhé fázi byl hodnocen vliv teploty přípravy dozimetru na výsledky měření. Ve třetí části byla analyzována závislost výsledků měření na složení gelového dozimetru.

Součástí každého experimentu byla příprava Frickeho gelového dozimetru FeXo, ozařování a následné měření odezvy dozimetru na dávku. Princip přípravy gelového dozimetru, způsob ozařování a technika měření radiace byly shodné ve všech částech práce.

Obrázek 2: Chemická laboratoř Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT Praha (autor)

14.1 Příprava Frickeho gelového dozimetru FeXo

Všechny experimenty byly provedeny s Frickeho gelovými dozimetry FeXo, které byly připravovány podle zavedeného a běžně používaného postupu.

14.1.1 Pomůcky a chemikálie

Tabulka 2: Chemikálie a pomůcky potřebné k výrobě Frickeho gelového dozimetru FeXo

Chemikálie	**Pomůcky**
• Destilovaná voda • Kyselina sírová • Mohrova sůl* • Xylenolová oranž* • Želatina	• 2 kádinky na pipetování (25 ml) • 2 Erlemeyerovy baňky • 2 pipety (2 ml a 10 ml) • 12 kyvet (4 ml) • Odměrné baňky • Skleněná tyčinka na míchání • Vodní lázeň

*, Během jednotlivých pokusů byly použity různé koncentrace xylenolová oranže a Mohrovy soli, jak bude popsáno později.

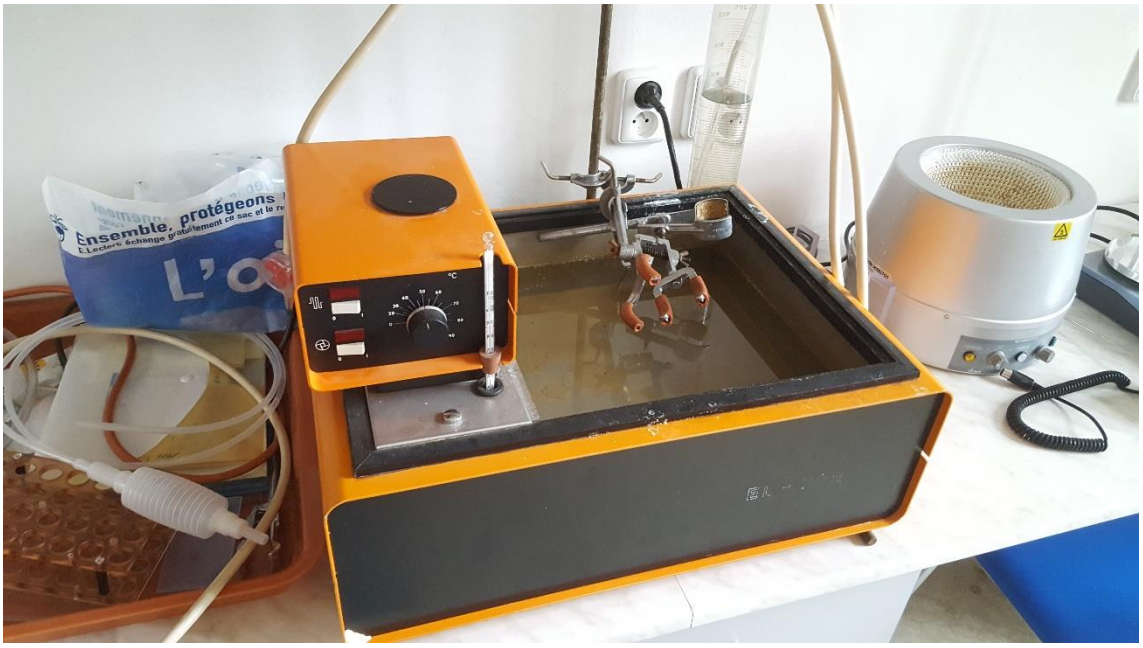
14.1.2 Popis přípravy série gelových dozimetrů

Pro každý pokus byla vyrobena série 12 dozimetrů o stejném složení. K přípravě jedné série bylo potřeba 50 ml roztoku, který byl připraven následujícím způsobem.

1) Do Erlemeyerovy baňky bylo odměřeno 40 ml destilované vody. Baňka byla následně uzavřena skleněným špuntem a částečně ponořena do vodní lázně zahřáté na 50 °C tak, aby hrdlo baňky zůstalo nad hladinou. Po ohřátí destilované vody na 50 °C bylo do baňky

přidáno 2,5 g želatiny. Poté je třeba počkat, dokud se želatina na dně zcela nerozpustí. Proces lze urychlit občasným promícháním obsahu v baňce.

2) Než bude želatina rozpuštěna, je třeba připravit si požadované množství od ostatních látek.



Obrázek 3: Vodní lázeň (autor)

Pro zjištění požadovaných hmotností daných látek lze použít již předpřipravenou tabulku, pokud je připravován normální Frickeho gelový dozimetr (původní koncentrace Mohrovy soli a xylenolové oranže) nebo lze použít vzorce pro výpočet molární koncentrace a z údajů v tabulce vypočítat potřebné množství dané látky.

Vzorec pro výpočet molární koncentrace: $c_A = n_A \cdot V^{-1} = m_A \cdot M_A^{-1} \cdot V^{-1}$. Jako A se zde značí daná látka. Molární koncentrace je zde značena jako c, používáme jednotky $mol \cdot l^{-1}$ neboli M. n zde značí látkové množství, které se udává v molech. Celkový objem se zde značí V a udává se v litrech. m je hmotnost v g a M je molární hmotnost v $g \cdot mol^{-1}$.

K odměření požadovaných hmotností daných látek se použijí laboratorní váhy. Látky nanášíme plastovou lžičkou na měřící papírek, který je třeba před nanášením látky položit na váhu a poté se váha vynuluje. Tak je zajištěno, že na váze není zaznamenána i hmotnost papírku. U Mohrovy soli a xylenolové oranže si je třeba dát pozor, aby se nedostala do kontaktu se železem, proto je nutné použít plastové lžičky. Kyselina sírová se odměřuje pipetou.

Tabulka 3: Tabulka pro přípravu Frickeho dozimetru FeXo bez upravených poměrů látek (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017)

Látka	***Chemický vzorec***	***Relativní molekulová hmotnost***	***Koncentrace***	***Hmotnost (objem) látky pro požadovaný výsledný objem dozimetru***			
		Mr	***c [mM]***	***100 ml***	***200 ml***	***250 ml***	***1 l***
želatina	$(C_{17}H_{32}N_5O_6)_x$	402,47	124,38	5,00 g	10,0 g	12,5 g	50,0 g

xylenolová oranž		$C_{31}H_{28}N_2O_{13}$	760,58	0,1	7,61 mg	15,2 mg	19,0 mg	76,1 mg
Mohrova sůl		$(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 .6H_2O$	392,47	0,5	19,6 mg	39,2 mg	49,0 mg	196 mg
Kyselina sírová	93 %	H_2SO_4	92,47	25	0,264 g (0,145 ml)	0,528 g (0,290 ml)	0,660 g (0,363 ml)	2,64 g (1,45 ml)
	96 %		94,87	25	0,255 g (0,139 ml)	0,510 g (0,278 ml)	0,648 g (0,348 ml)	2,55 g (1,39 ml)
	100 %		98,07	25	0,245 g (0,133 ml)	0,490 g (0,266 ml)	0,613 g (0,333 ml)	2,45 g (1,33 ml)

3) Poté je Mohrova sůl, vložena do odměrné baňky a rozpuštěna v požadovaném objemu kyseliny sírové tak, aby vznikla požadovaná koncentrace Mohrovy soli. Výsledná koncentrace tohoto roztoku bude 1mM Mohrova sůl v 50mM kyselině sírové. Tím vznikl první zásobní roztok. Druhý zásobní roztok vznikne smícháním xylenolové oranže opět s požadovaným objemem destilované vody, aby vznikla požadovaná koncentrace, která u tohoto roztoku bude 2,5mM. Pro výpočty požadovaných objemů se využije vzorec pro výpočet molarity z bodu 2.
4) Poté bylo pipetou odměřeno do 50ml kádinky požadované množství od zásobních roztoků, které bylo vypočítáno v bodě 3. Kádinka je poté dolita již rozpuštěnou želatinou do objemu 50 ml a promíchána skleněnou tyčinkou.
5) Výsledný roztok byl následně rozlit do dvanácti 4 ml kyvet, které jsou plněny přibližně na 3 ml. Kyvety s dozimetrem byly následně umístěny do ledničky, aby želatina ztuhla.

14.2 Ozařování dozimetrů

14.2.1 Pomůcky

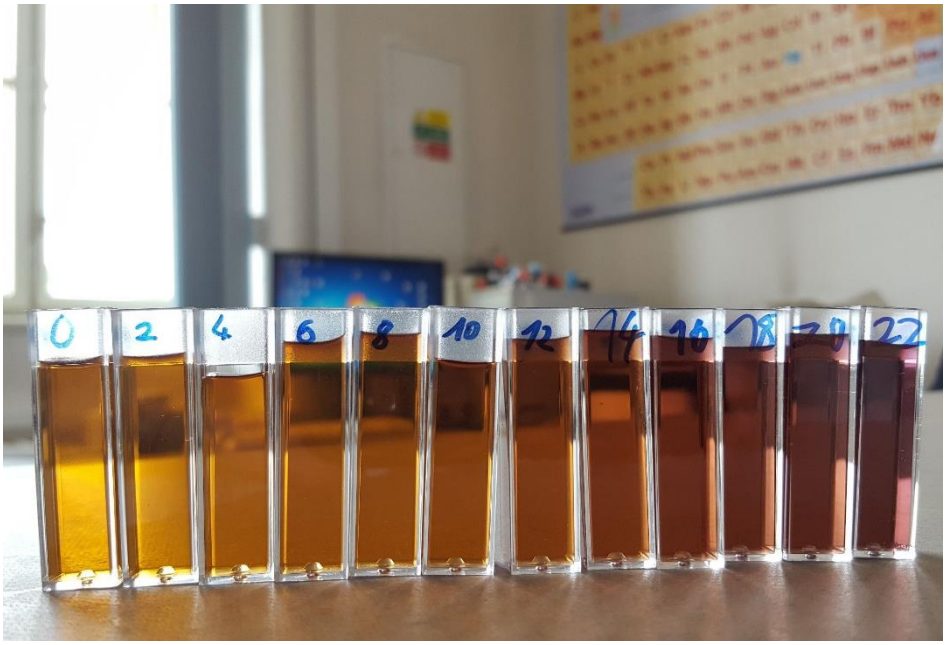
- Držák na kyvety
- Kyvety s dozimetrem
- Ozařovač Gamacell 220
- Stopky

Obrázek 4: Ozařovač Gamacell 220 (autor)

Kyvety s dozimetrem byly ozařovány na ozařovači Gamacell 220, který je umístěn v suterénu budovy. Ozařovač obsahuje komoru s radionuklidem ^{60}Co, zářič emituje v prostoru ozařovací komory uvnitř stínění homogenní pole záření gama (ústně Mgr. Hana Bártová, 2017). Referenční dávkový příkon tohoto ozařovače byl 50,7 Gy . hod^{-1} v referenčním datu (14.10.2014). Experimenty probíhaly v rozmezí několika měsíců, během kterých dávkový příkon klesal. Dávkový příkon byl tedy vždy vypočítán před každým ozařováním na základě referenčního dávkového příkonu a za pomocí rozpadového zákona. Na základě tohoto údaje byl následně vypočítán čas, který byl potřeba k předání dané velikosti dávky dozimetru. K tomuto času bylo ještě třeba přičíst tři sekundy, za které se vzorky zasunou do ozařovače.

Do držáku na kyvety se po jeho obvodu vešlo osm kyvet, takže nebylo možné ihned napoprvé ozařovat všech jedenáct kyvet a postupně je odebírat. Bylo potřeba, aby byly kyvety stejně daleko od zdrojů v ozařovači, proto nebylo možné využít i vnitřní řady držáku. Do držáku bylo tedy naskládáno osm kyvet a poté byly vyměňovány jedna za druhou a ty, které byly do ozařovače vloženy později, bylo nutné poté ponechat v ozařovači o něco déle. Kyvety byly před ozařováním označeny čísly, aby nedošlo k jejich záměně.

14.3 Měření na spektrofotometru



Obrázek 5: Kyvety s dozimetry po ozáření dávkami 0 – 22 Gy (zleva doprava) (autor)

Po ozařování na Gamacellu byly kyvety s dozimetry přesunuty ze suterénu zpět do laboratoře k vyhodnocení výsledků. Výsledky byly vyhodnocovány na spektrofotometru Helios Beta. Kapacita podavače spektrofotometru byla sedm kyvet. Jedna z těchto kyvet však byla naplněna pouze destilovanou vodou a sloužila pro zkalibrování spektrofotometru jako základní pozadí.

Do dalších slotů pro kyvety bylo umístěno prvních šest kyvet a bylo nastaveno rozmezí, v jakém chceme vzorky prosvětlovat. V každém měření byly vzorky testovány pro vlnovou délku světla od 350 do 750 nm, což přibližně odpovídá viditelnému spektru světla pro člověka.

Pro každou vlnovou délku světla spektrofotometr naměřil absorbanci a transmitanci. Naměřená data se přepisují do tabulky. Tyto tabulky jsou následně ukládány ve formátu .csv na disketu, jejíž prostřednictvím se přenášejí do počítače.

Po každém otevření a následném zavření spektrofotometru bylo potřeba znovu nastavit základní pozadí pomocí kyvety s destilovanou vodou, za účelem dosažení maximální kvality naměřených výsledků. Přibližná odchylka tohoto konkrétního spektrofotometru při měření absorbance činí přibližně 0,005 (Bártová).

Pokud se tato data převedou na graf, lze si povšimnout, že graf je plynulý, ale mezi 579 a 580 nm je náhlý propad absorbance. Tento jev je možné pozorovat na grafu 1. Čím vyšší dávku dozimetr v kyvetě obdržel, tím větší je tento propad. Tento propad je způsoben korekcí na rozptýlené světlo, která se ve spektrofotometru zapojuje od měřené délky světla 580 nm. Nicméně tento jev je reprodukovatelný pro všechna data, a proto nemá žádný vliv na výsledky. (Bártová)

Obrázek 6: Spektrofotometr Helios Beta (autor)

14.4 Změny spektrofotometrických vlastností v závislosti na stáří dozimetru

Tento výzkum měl za úkol ověřit první hypotézu.

V této části byl připraven klasický modifikovaný Frickeho gelový dozimetr FeXo, ve kterém nebyl pozměněn poměr xylenolové oranže a Mohrovy soli. Poměr těchto dvou látek byl tedy 1:5. Koncentrace těchto látek byla 0,1 mM u xylenolové oranže a 0,5 mM u Mohrovy soli.

Kyvety s dozimetrem byly ozařovány na ozařovači Gamacell 220. Dávkový příkon tohoto ozařovače byl v době ozařování 34,8 Gy za hodinu. Kyvety s dozimetry byly ozařovány vždy po 2 Gy a první zůstala neozářena. Doba, za kterou tento ozařovač předal kyvetám dávku o velikosti dvou grayů byla 3 minuty a 27 sekund a k tomuto času bylo ještě třeba připočíst tři sekundy, za které se vzorky zasunou do ozařovače. Stopky byly tedy nastaveny na 3 minuty a 30 sekund.

Výsledky byly následně vyhodnoceny na spektrofotometru a kyvety uloženy do ledničky. Další měření proběhlo první den od ozáření a poslední měření bylo uskutečněno třetí den od ozařování.

14.5 Vliv teplot při přípravě dozimetru na výsledky měření radiace

Tento výzkum měl za úkol ověřit druhou hypotézu.

V této části výzkumu byly připraveny dvě série gelových dozimetrů. Každá z těchto sérií čítala dvanáct kyvet s dozimetrem. Poměr xylenolové oranže a Mohrovy soli byl opět 1:5. Tohoto poměru bylo dosaženo použitím xylenolové oranže o látkovém množství 0,1 mM a Mohrovy soli o látkovém množství 0,5 mM.

Obě dvě série měly navzájem stejné chemické složení, a i jejich postupy přípravy byly navzájem téměř shodné. Jediným rozdílem v přípravě těchto dvou sérií dozimetrů byly teploty želatiny, za jakých do ní byly přimíchány zásobní roztoky. U první série došlo k přimíchání zásobních roztoků do želatiny ihned po vyjmutí kádinky s želatinou z vodní lázně. Želatina měla tedy v době přidání zásobních roztoků teplotu 50 °C. Poté došlo k rozlití dozimetru do kyvet. U druhé série došlo k vyjmutí kádinky s želatinou z vodní lázně a následně se do ní vložil teploměr a počkalo se, až želatina v kádince zchladne na 30 °C. Poté byla přidána Mohrova sůl a xylenolová oranž ze zásobních roztoků v požadovaném množství. Poté se i tento dozimetr rozlil do kyvet. Následně byly kyvety s dozimetry umístěny do ledničky a bylo třeba počkat, až dozimetry ztuhnou.

Stejně jako u předchozí části výzkumu byly i v této části výzkumu kyvety z obou sérií ozařovány vždy po dávce o velikosti dvou grayů.

14.6 Vliv složení gelu na výsledky měření radiace

Tento výzkum měl za úkol ověřit třetí hypotézu.

V této části výzkumu byly využity výsledky měření z druhé části výzkumu, které byly měřeny na dozimetru namíchaném při 50 °C, jehož poměr mezi xylenolovou oranží a Mohrovou solí byl 1:5. Za účelem zjistit, jaký vliv mají tyto látky na vlastnosti dozimetru, byla v této části

namíchána druhá série dozimetrů. V této sérii byl upraven poměr mezi xylenolovou oranží a Mohrovou solí na 1:1. Výsledná koncentrace látek v dozimetru byla pro xylenolovou oranž 0,1 mM a pro Mohrovu sůl také 0,1 mM

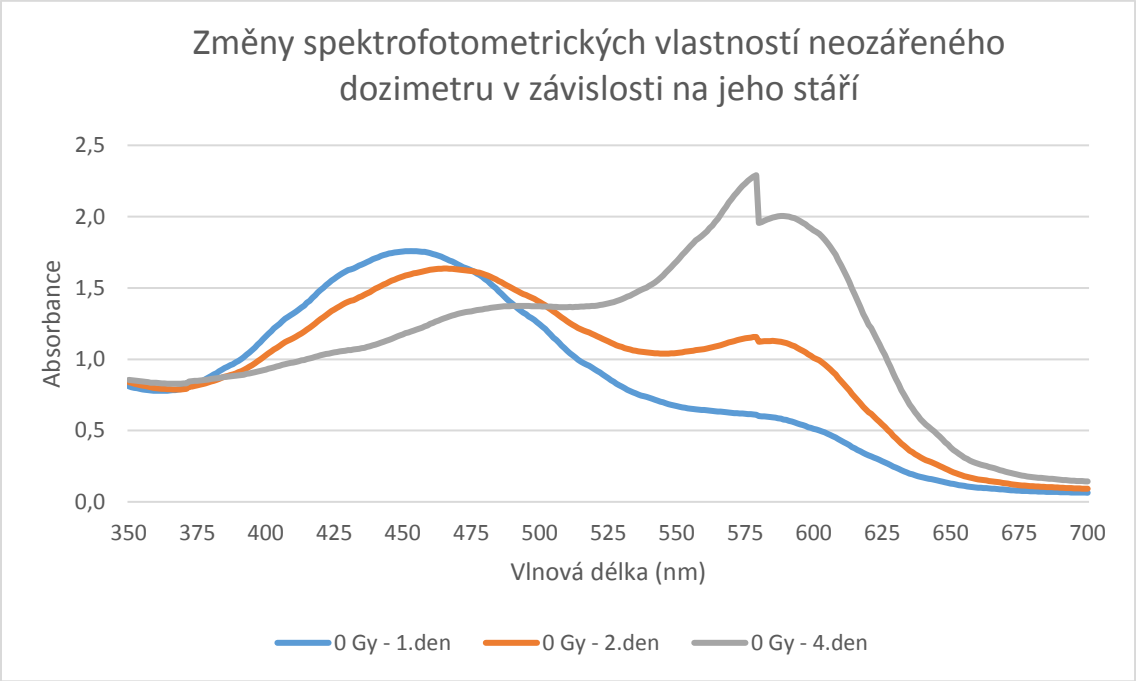
Po zatuhnutí dozimetrů v kyvetách došlo k jejich ozařování. Jako interval, po jakých dávkách budou kyvety s dozimetry ozařovány, bylo stanoveno 2,2 Gy. K navýšení došlo kvůli předpokladu, že tato série dozimetrů bude méně citlivá na velikost dávky. Po prvních dvou ozářených kyvetách však bylo rozhodnuto, že i dávky po 2,2 Gy jsou příliš malé, než aby v dozimetru způsobily nějaké významnější změny. Proto došlo ke zdvojnásobení intervalů, po jakých byly dozimetry ozařovány. Další kyvety s dozimetry tedy byly vytahovány vždy po obdržení dávky o velikosti 4,4 Gy.

15 VÝSLEDKY

Každá z částí výzkumu byla provedena v souladu s výše popsanou metodikou. Byly připraveny čtyři série modifikovaného Frickeho gelového dozimetru FeXo, v každé sérii bylo 12 kyvet naplněných gelovým dozimetrem. 44 kyvet bylo ozářeno a zbylé 4 posloužily jako referenční vzorky. Podle protokolu bylo celkem provedeno 98 spektrofotometrických měření absorbance a transmitance hodnocených dozimetrů.

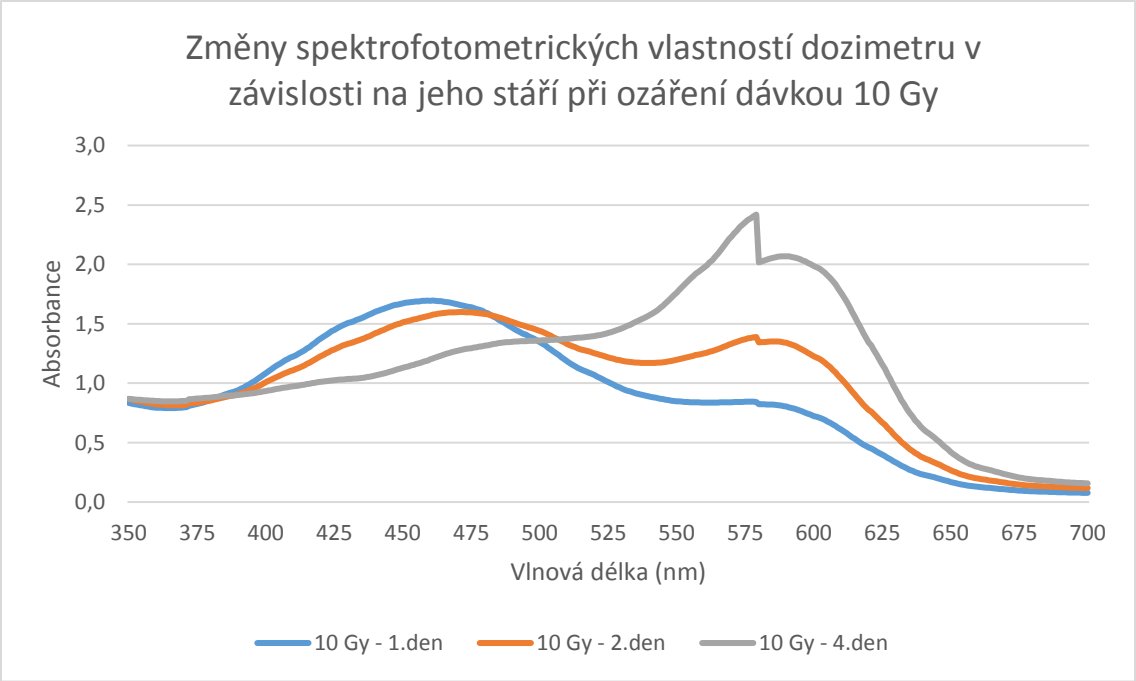
Získané hodnoty byly zaneseny do databáze a dále zpracovány v souladu se stanovenými cíli práce.

15.1 Změny spektrofotometrických vlastností v závislosti na stáří dozimetru

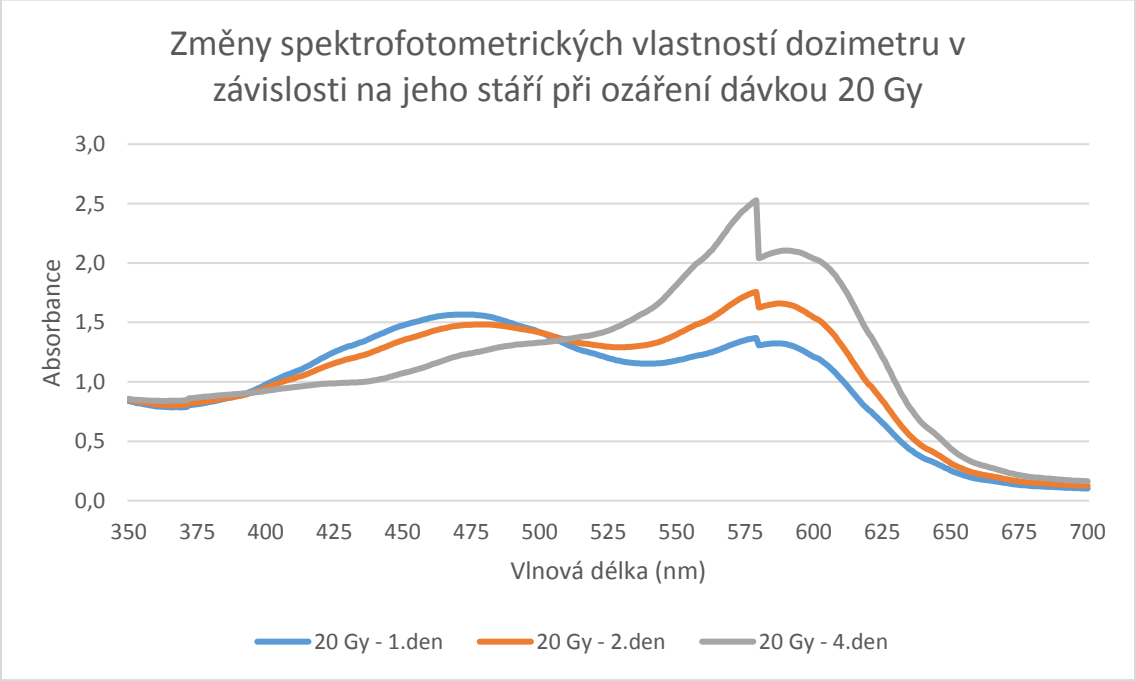


Graf 2: Změny spektrofotometrických vlastností neozářeného dozimetru v závislosti na jeho stáří

Graf 2 zobrazuje změnu absorbance neozářeného dozimetru pro různé vlnové délky v závislosti na jeho stáří. Pokles absorbance ve vlnových délkách 440 a 480 nm se zvyšujícím se stářím dozimetru odpovídá poklesu koncentrace Xo a komplexu Xo_2Fe v dozimetru. Tyto komplexy se se zvyšujícím časem od přípravy samovolně přeměňují na komplexy XoFe a $XoFe_2$, čemuž odpovídá nárůst absorbance při vlnových délkách 540 a 585 nm. Vzestup absorbance při vlnové délce 585 nm, který byl pozorován 4. den, odpovídá vysoké koncentraci komplexu $XoFe_2$, který vznikl spontánní přeměnou komplexů Xo a Xo_2Fe. Tato přeměna souvisí se změnou koncentrace železitých kationtů v dozimetru, to je prvotní příčina změny vlastností dozimetru.

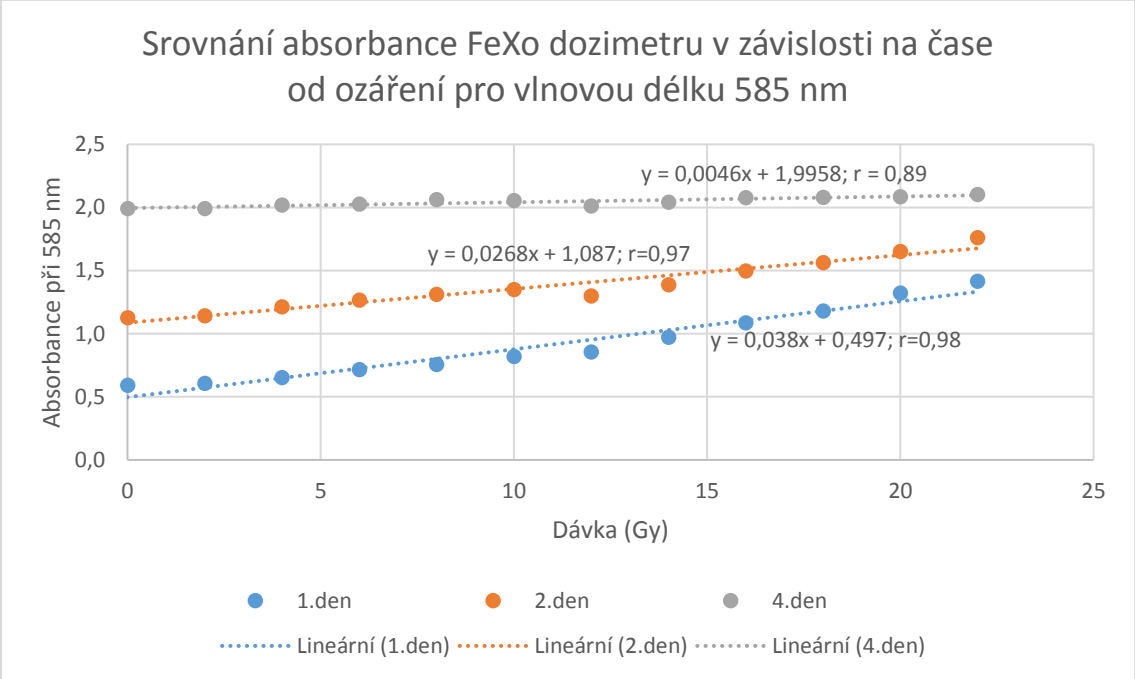


Graf 3: Změny spektrofotometrických vlastností dozimetru v závislosti na jeho stáří při ozáření dávkou 10 Gy



Graf 4: Změny spektrofotometrických vlastností dozimetru v závislosti na jeho stáří při ozáření dávkou 20 Gy

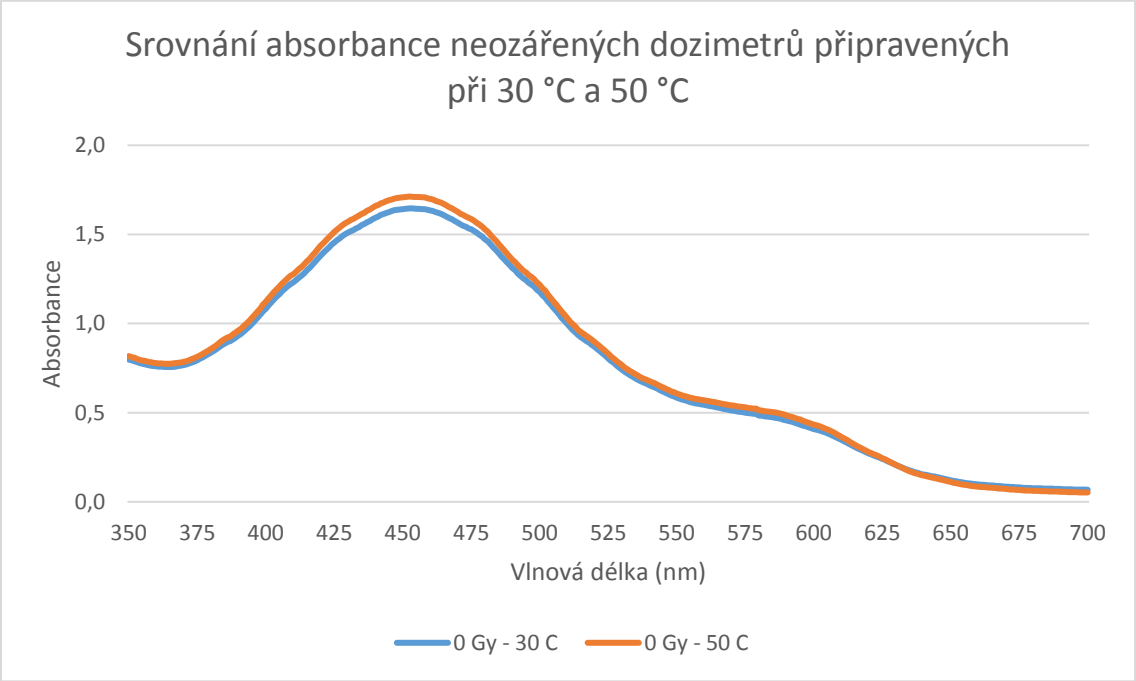
Grafy 3 a 4 znázorňují změnu absorbance gelových dozimetrů ozářených dávkou 10 a 20 grayů v závislosti na čase. Charakter změn je podobný jako u neozářeného dozimetru: dochází k poklesu absorbance pro vlnové délky do 500 nm a vzestupu absorbance pro vlnové délky nad 500nm. V závislosti na dávce je různá velikost těchto změn. Ve všech případech dochází 4. den k výraznému vzestupu absorbance pro vlnovou délku 585 nm v porovnání s 1. dnem, což odpovídá vysokému obsahu komplexu $XoFe_2$ ve všech hodnocených dozimetrech.



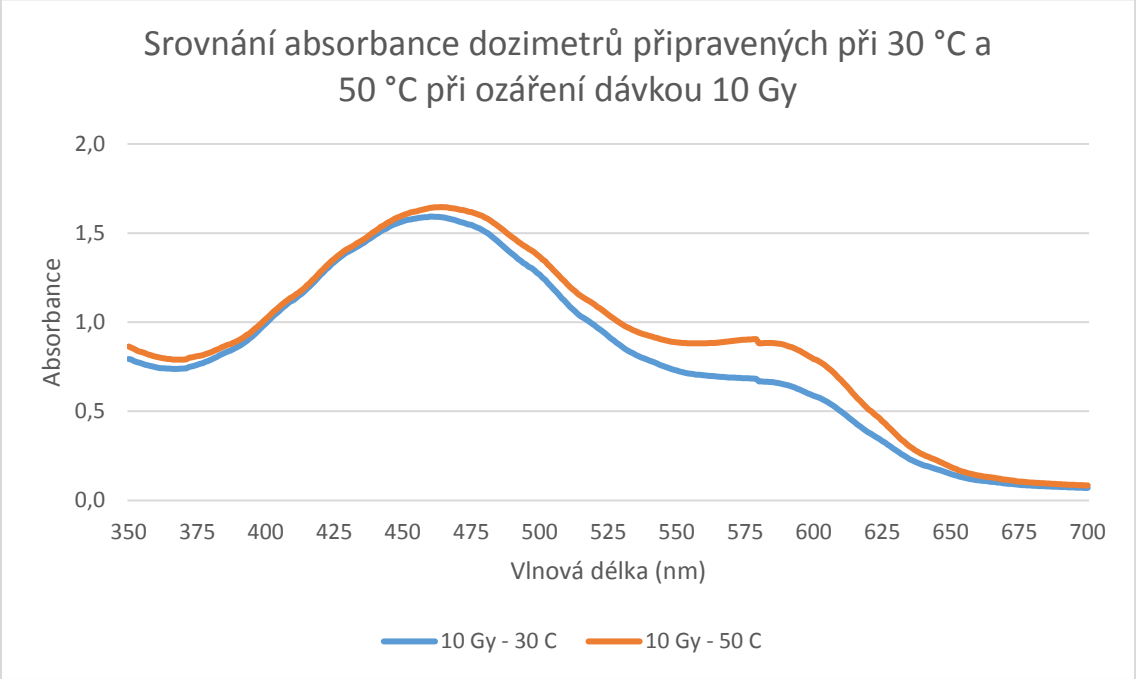
Graf 5: Srovnání absorbance FeXo dozimetru v závislosti na čase od ozáření pro vlnovou délku 585 nm

Graf 5 porovnává změnu absorbance světla o vlnové délce 585 nm v čase pro různé dávky radiace. Dobré korelace mezi dávkou a absorbancí byly pozorovány u všech hodnocených dozimetrů. Korelace hodnot absorbance při 585 nm vlnové délky činila z prvního dne 0,977, z druhého dne 0,967 a čtvrtý den byla naměřena korelace 0,89. Z grafu je zřejmé, že absorbance roste v závislosti na stáří dozimetru bez ohledu na velikost dávky radiace. U neozářeného dozimetru je však rozdíl absorbancí mezi 1. a 4. dnem vyšší než rozdíl absorbancí mezi 1. a 4. dnem u dozimetrů ozářených vyšší dávkou. V čase dále dochází k výraznému snížení směrnice popisující závislost mezi absorbancí a dávkou. Při měření 4. den po přípravě a ozáření dozimetru, byla pozorována jen velmi malá závislost mezi absorbancí a velikostí dávky a malé rozdíly mezi absorbancemi neozářeného a ozářených dozimetrů.

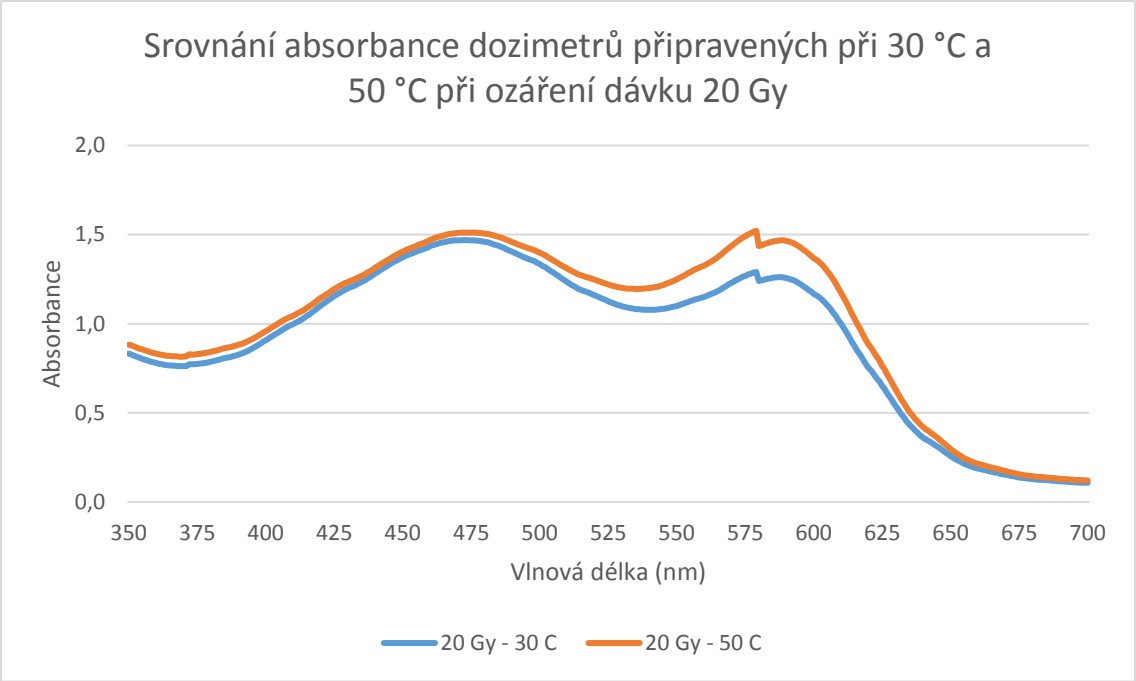
15.2 Vliv teplot při přípravě dozimetru na výsledky měření radiace



Graf 6: Srovnání absorbance neozářených dozimetrů připravených při 30 °C a 50 °C

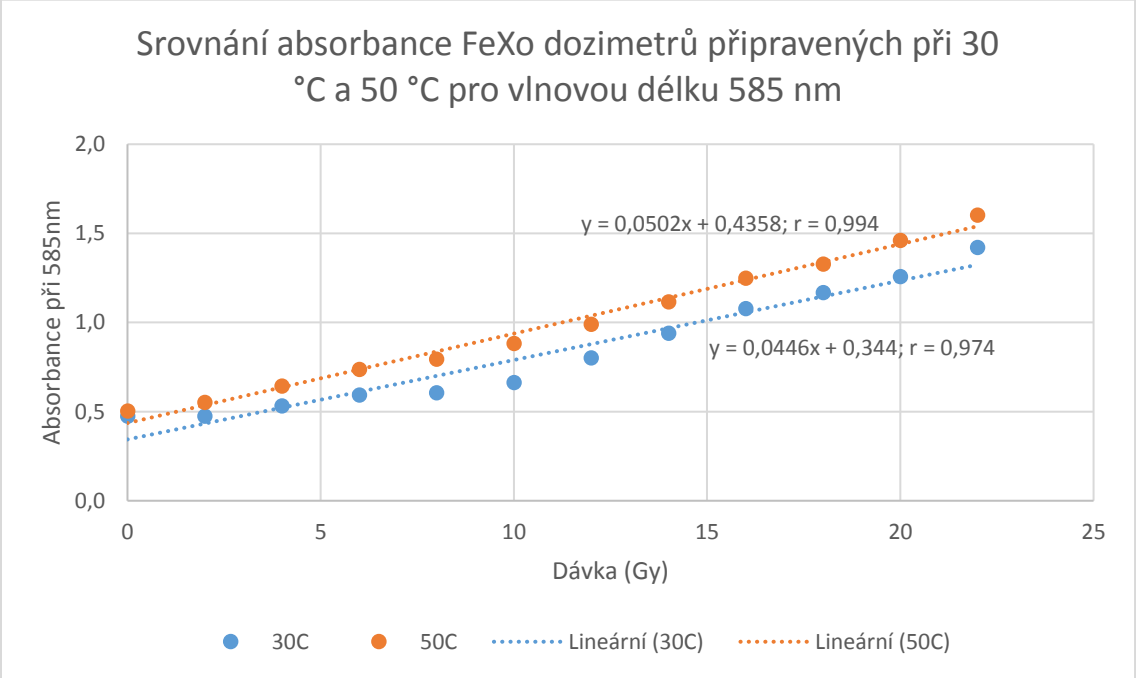


Graf 7: Srovnání absorbance dozimetrů připravených při 30 °C a 50 °C při ozáření dávkou 10 Gy



Graf 8: Srovnání absorbance FeXo dozimetru při 30 °C a 50 °C pro dávku 20 Gy

Grafy 6 – 8 porovnávají závislost absorbance na vlnové délce dozimetrů, které byly připraveny při 30 a 50 °C. U grafu 6 můžeme vidět, že absorbance neozářeného dozimetru připraveného při 30 °C je téměř shodná, jako u dozimetru namíchaného za 50 °C. U grafů 6 a 7 můžeme pozorovat, že zvyšující se podaná dávka u dozimetru připraveného při 50 °C je spojena s vyšší absorbancí, která je dána vyšší tvorbou FeXo a $FeXo_2$.



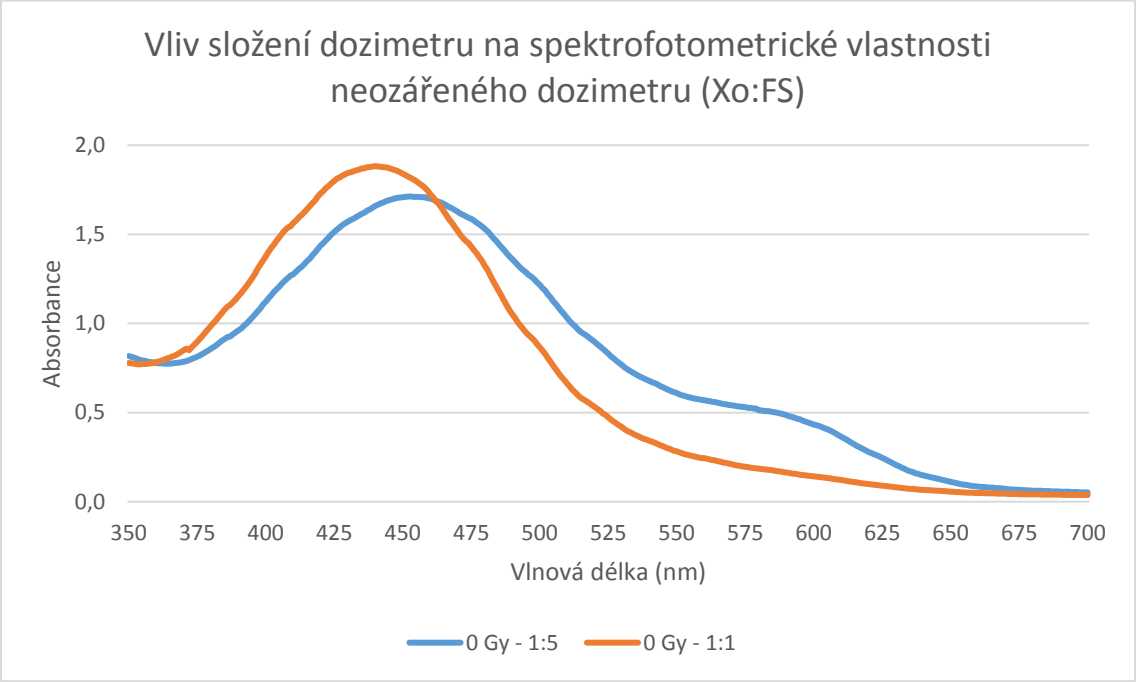
Graf 9: Srovnání absorbance FeXo dozimetru při 30 °C a 50 °C pro vlnovou délku 585 nm

Graf 9 ukazuje rozdíly mezi srovnávanými dozimetry v absorbanci světla o vlnové délce 585 nm pro celé spektrum velikostí hodnocených dávek. U dozimetru, který byl připraven při 50 °C,

si lze povšimnout, že má vyšší absorbanci při 585 nm. Nicméně velikost směrnic u obou grafů je téměř stejná. Lze tedy říci, že citlivost dozimetrů, které byly připraveny při 30 a 50 °C, je přibližně shodná.

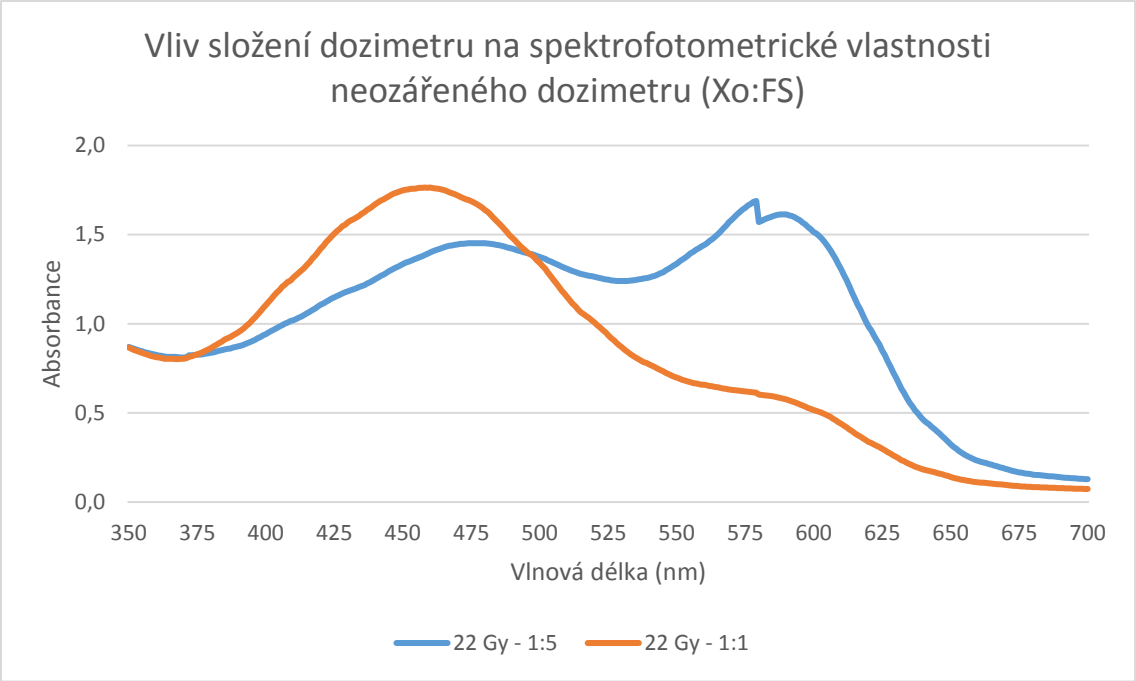
Korelace hodnot absorbance při 585 nm vlnové délky činila u dozimetru, který byl namíchán při 30 °C, 0,974. U hodnot naměřených na dozimetru, který byl namíchán při 50 °C, byla korelace 0,994.

15.3 Vliv složení gelu na výsledky měření radiace



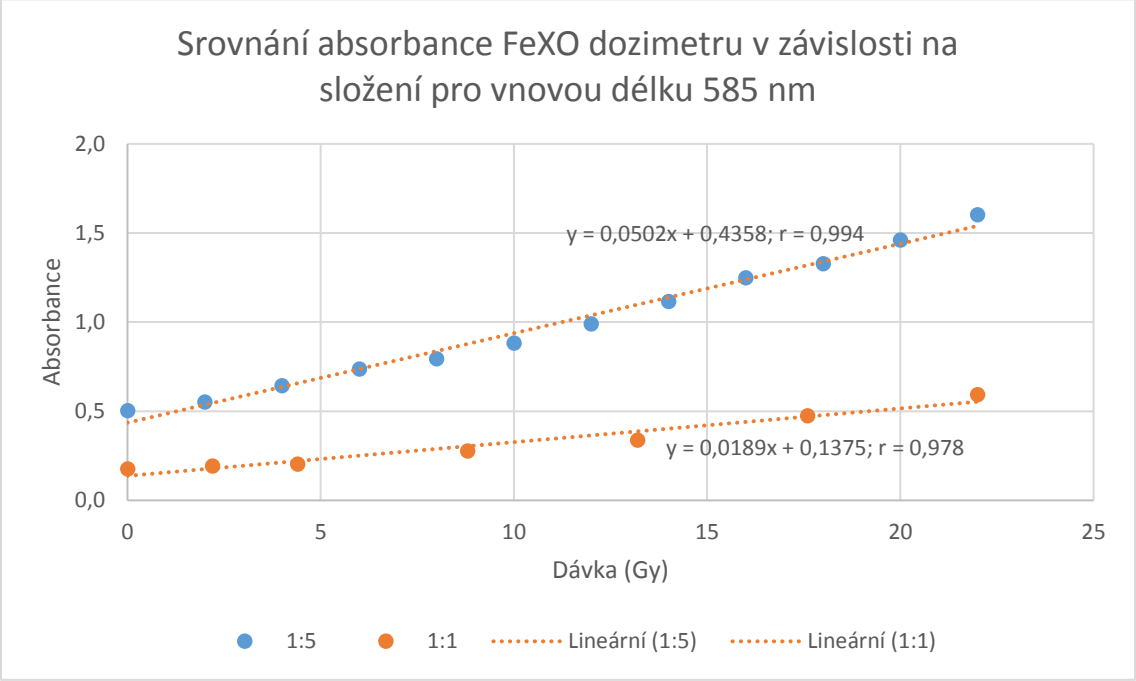
Graf 10: Vliv složení dozimetru na fotochemické vlastnosti neozářeného dozimetru (Xo:FS)

Jak je znázorněno na grafu 10, snížený obsah Mohrovy soli ve složení dozimetru s poměrem Xo:FS = 1:1 snižuje absorbanci pro světlo o delší vlnové délce (>460 nm).



Graf 11: Vliv složení na fotochemické vlastnosti dozimetru při ozáření dávkou 0 a 22 Gy (Xo:FS = 1:5)

Graf 11 ukazuje, že gelový dozimetr obsahující Xo a FS v poměru 1:5 dobře reaguje na ozáření dávkou 22 grayů. Gelový dozimetr s poměrem Xo:FS = 1:1 má po ozáření stejnou dávkou výrazně nižší citlivost danou malým vzestupem absorbance, což je odrazem menší tvorby $XoFe_2$. Stejný efekt je patrný na grafu 12, který ukazuje změnu absorbance v závislosti na dávce a složení dozimetru. Nejvyšší směrnice a tedy i citlivost byla pozorována u dozimetru s poměrem Xo:FS = 1:5. Směrnice u dozimetru s poměrem Xo:FS = 1:1 byla velmi nízká, ukazující na nízkou citlivost tohoto gelu na měření dávky radiace.



Graf 12: Srovnání absorbance FeXo dozimetru v závislosti na složení pro vlnovou délku 585 nm

16 DISKUZE

Gelová dozimetrie je jeden z nástrojů, které slouží k plánování radioterapeutické léčby u pacientů s nádorovými onemocněními. Jedním z typů gelových dozimetrů, které se k tomuto účelu používají je i modifikovaný Frickeho gelový dozimetr FeXo, na který byla zaměřena praktická část této práce. Cílem praktické části tohoto projektu bylo vyhodnotit, jaký vliv na výsledky měření radiace u tohoto dozimetru mají stáří dozimetru, teplota, za které byl dozimetr připraven, a pozměněné látkové množství Mohrovy soli a xylenolové oranži v jeho složení.

V praktické části této práce byly úspěšně potvrzeny dvě ze tří hypotéz.

Z výsledků vyplynulo, že první hypotéza byla potvrzena. Tato hypotéza předpokládala, že za čtyři dny od ozáření dojde k podstatnému zhoršení výsledků.

V dozimetru i bez působení ionizujícího záření došlo již během 24 hodin k samovolné přeměně komplexů Xo a Xo_2Fe na komplexy XoFe a $XoFe_2$. Z toho vyplývá, že modifikovaný Frickeho gelový dozimetr je nutné ozařovat i vyhodnocovat v den přípravy. Z výsledků také vyplývá, že se zvyšujícím se stářím dozimetru se podstatně zhoršuje korelace hodnot absorbance při 585 nm při různých velikostech dávek, což znamená, že výsledky již nejsou tak lineární jako první den. Zhoršení kvality výsledků měření bylo zaznamenáno již druhý den, nicméně zde bylo možné na základě absorbance na vlnové délce 585 nm rozlišit v porovnání s ostatními dozimetry z této série, jakou velikost dávky dozimetr obdržel. Čtvrtý den nebyl ve velikosti absorbance při 585 nm vlnové délky světla téměř žádný rozdíl ve velikosti dávky, kterou dozimetr obdržel.

Druhá hypotéza, která říká, že výsledky z dozimetru budou stejné při dvou různých teplotách přípravy, byla vyvrácena.

Dozimetry připravené za 30 a 50 °C vykazovaly téměř shodnou citlivost. Dozimetr připravený při 50 °C vykazoval lepší linearitu, nicméně rozdíl mezi linearitami těchto dvou dozimetrů nebyl příliš velký. Na základě těchto dat lze říci, že modifikovaný Frickeho gelový dozimetr FeXo je možné namíchat při teplotách želatiny od 30 do 50 °C. Nicméně dozimetr, který byl připraven za 50 °C, vykazoval vyšší hodnoty absorbance než dozimetr, který byl připraven za 30 °C. Tento poznatek je důležitý, pokud se připravuje série dozimetrů, které mají mít stejné vlastnosti, ale jsou připravovány ve více baňkách. V takovémto případě je potřeba, aby byly teploty želatiny při přidání Mohrovy soli a xylenolové oranže ve všech baňkách stejné.

Na základě výsledků třetí části výzkumu, byla potvrzena třetí hypotéza, která předpokládala vliv změny složení gelu na měření radiace.

Změny ve složení gelu v podobě změny množství xylenolové oranže a Mohrovy soli mají skutečně vliv na měření radiace. Z výsledků lze říci, že se snižujícím se množstvím Mohrovy soli klesá citlivost dozimetru. Nejlepší vlastnosti vykazoval dozimetr, který byl namíchán při poměru xylenolové oranže a Mohrovy soli 1:5 s tím, že molární koncentrace byla 0,1 mM u xylenolové oranže a 0,5 mM u Mohrovy soli. Tento dozimetr měl nejlepší linearitu výsledků a zároveň byl citlivý už od nižších dávek.

ZÁVĚR

Tento projekt byl zaměřen na gelovou dozimetrii. Experimentální část projektu se zabývala modifikovaným Frickeho gelovým dozimetrem. Úlohy v experimentální části byly zaměřeny na vliv času, vliv teploty přípravy dozimetru a vliv složení dozimetru na vlastnosti měření radiace.

Z výsledků výzkumů byly potvrzeny dvě ze tří hypotéz. První hypotéza, která říkala, že kvalita výsledků dozimetru se výrazně zhorší během 3 dní od ozařování, byla úspěšně potvrzena. Druhá hypotéza, která říkala, že výsledky měření z dozimetru budou stejné při dvou různých teplotách přípravy, byla vyvrácena. Třetí hypotéza, která říkala, že změna složení gelu bude mít vliv na vlastnosti měření radiace, byla potvrzena.

Hlavními výstupy z tohoto projektu jsou, že dozimetr je třeba vyhodnocovat v co nejkratším čase od jeho ozáření. S přibývajícím časem dochází k samovolné přeměně komplexů a znehodnocení výsledků měření.

Dalším výstupem je, že je rozdíl mezi dozimetry namíchanými při 30 a 50 °C. Dozimetr, který byl namíchán při 50 °C, měl vyšší absorbanci než dozimetr, který byl namíchán při 30 °C. Dozimetr, který byl namíchán při 50 °C, vykazoval i lepší linearitu výsledků. Citlivost u těchto dvou dozimetrů byla víceméně stejná. Tento poznatek je podstatný, pokud se připravuje série dozimetrů, které mají mít stejné vlastnosti, ale jsou připravovány ve více baňkách. V takovémto případě je potřeba, aby byly teploty želatiny při přidání Mohrovy soli a xylenolové oranže ve všech baňkách stejné.

Posledním výstupem je, že se snižujícím se množstvím Mohrovy soli klesá citlivost dozimetru. Nejlepší vlastnosti vykazoval dozimetr, který byl namíchán při poměru xylenolové oranže a Mohrovy soli 1:5 s tím, že molární koncentrace byla 0,1 mM u xylenolové oranže a 0,5 mM u Mohrovy soli. Tento dozimetr měl nejlepší linearitu výsledků, a zároveň byl citlivý už od nižších dávek.

LITERATURA

AstroNuklFyzika – Ionizující záření. AstroNuklFyzika [online]. Ostrava [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: http:///JadRadFyzika6.htm

Dozimetrie ionizujícího záření – Dozimetrie ionizujícího záření. Dozimetrie IZ [online]. České Budějovice, 2007 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: http://www.lestinas.webzdarma.cz/dozimetrie.htm

encyklopedie.vseved.cz – Radiačně chemický výtěžek. Vševěd: encyklopedie v pohybu [online]. Praha, 2005, 2011 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: http://encyklopedie.vseved.cz/radia%C4%8Dn%C4%9B+chemick%C3%BD+v%C3%BDt%C4%9B%C5%BEek

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT – Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská [online]. Praha, 2014, 2014 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://www.fjfi.cvut.cz/cz/studium/bakalarske-studium/obory-studia/daiz-bc

Gama záření – Gama záření. SPECT - jednofotonová emisní tomografie [online]. Praha, 2009, 12.3.2009 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://cz7asm.wz.cz/fyz/index.php?page=zargam

Hejsková – HEJSKOVÁ, Veronika. UV/VIS spektrofotometrie a možnosti jejího využití v rámci vzdělávání učitelů chemie. Praha, 2016. Diplomová práce. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE PEDAGOGICKÁ FAKULTA KATEDRA CHEMIE A DIDAKTIKY CHEMIE. Vedoucí práce Hana Kotoučová.

Jednotky.cz – Elektronvolt. Jednotky.cz: Převody jednotek [online]. [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: https://www.jednotky.cz/prace-energie/elektronvolt/

Enpedie – Rozpadová konstanta. Enpedie [online]. 2012 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: http://enpedie.cz/wiki/Rozpadov%C3%A1_konstanta

Jarošová – JAROŠOVÁ, Radmila. Sledování vlivu přídavku síťovadel na vlastnosti kolagenních filmů [online]. Zlín, 2015 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33626/jaro%C5%A1ov%C3%A1_2015_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

kdt-38.karlov.mff.cuni.cz – Závislost radioaktivity na druhu a tloušťce vrstvy stínicího materiálu. Vzdálená školní laboratoř pro studium radioaktivity [online]. Praha, 2011 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: http://kdt-38.karlov.mff.cuni.cz/shielding/theory.html

Lázníčková a kolektiv – LÁZNÍČKOVÁ, Alice a Vladimír KUBÍČEK. Základy fyzikální chemie: vybrané kapitoly pro posluchače Farmaceutické fakulty. 3. vyd. V Praze: Karolinum, 2014. ISBN 978-802-4627-915.

Oskole.sk – Chémia. Oskole.cz [online]. Bratislava, 2010 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: http://www.oskole.sk/wap/index.php?id_cat=53&new=4711

Radiobiologie – Veličiny dozimetrie ionizujícího záření. Radiobiologie [online]. [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/15/154.html

Spěváček – SPĚVÁČEK, Václav. Chemie gelových dozimetrů. Praha, 2012. České vysoké učení technické v Praze fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.

Testima – Osobní elektronický dozimetr DMC 3000. Testima [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: http://www.testima.eu/osobni-elektronicky-dozimetr-dmc-3000

Volka a kolektiv – VOLKA, Karel, Marcela TKADLECOVÁ a Kamil ZÁRUBA. Příklady z analytické chemie pro bakaláře. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0610-9.

Wikiskripta 1 – Aktivita radionuklidu. Wikiskripta [online]. 2015 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/w/Aktivita_radionuklidu

Wikiskripta 2 – Vylučování radioaktivních látek organismem. Wikiskripta [online]. 2014 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/w/Vylu%C4%8Dov%C3%A1n%C3%AD_radioaktivn%C3%ADch_l%C3%A1tek_organismem

Wikiskripta 3 – Radiolýza. Wikiskripta [online]. 2016 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/w/Radiol%C3%BDza

Wikiskripta 4 – Matematické operace. Wikiskripta [online]. 2018 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Matematick%C3%A9_operace

Wikiskripta 5 – Zákon radioaktivního rozpadu. Wikiskripta [online]. 2015 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Z%C3%A1kon_radioaktivn%C3%ADho_rozpadu

www.dejvikovy.estranky.cz – Www.dejvikovy.estranky.cz. Www.dejvikovy.estranky.cz [online]. 2010 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: http://www.dejvikovy.estranky.cz/clanky/obecna-chemie/excitovany-stav.html

Chemie pro začátečníky – Polymerace. Chemie: pro začátečníky [online]. 2000 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: https://xantina.hyperlink.cz/organika/polymerace.html

OBRÁZKY A TABULKY

Chemie pro začátečníky – Polymerace. Chemie: pro začátečníky [online]. 2000 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: https://xantina.hyperlink.cz/organika/polymerace.html

Základy medicíny katastrof – Ochrana před pronikavou radiací. Základy medicíny katastrof [online]. České Budějovice [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: http://zsf.sirdik.org/kapitola5/5-4-3-principy-ochrany-pred-ionizujicim-zarenim

ROZHOVOR

Se svolením Mgr. Hany Bártové z Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického v Praze proběhl dne 19.6.2017 rozhovor.