

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018

Andrea Rudická



# 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

# FOTOCITLIVÉ KOMPOZICE V TENKÝCH POLYMERNÍCH VRSTVÁCH

PHOTOSENSITIVE THIN POLYMERIC LAYERS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrea Rudická

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.

BRNO 2018

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1184/2017  
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Studentka: **Andrea Rudická**  
Studijní program: Chemie a chemické technologie  
Studijní obor: Spotřební chemie  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Michal Veselý, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

### Název bakalářské práce:

Fotocitlivé kompozice v tenkých polymerních vrstvách

### Zadání bakalářské práce:

1. Prostudujte relevantní literární zdroje a sestavte rešerši shrnující současný stav poznání o fotoiniciátorech kationtové polymerizace.
2. Prostudujte kinetiku rozkladu vybraných fotoiniciátorů v tenkých polymerních vrstvách.
3. Vrstvy připravte tiskovými technikami nebo technikami plošného nanášení z roztoku.
4. Zhodnoťte a interpretujte naměřená data.

### 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.

-----  
Andrea Rudická  
student(ka)

-----  
prof. Ing. Michal Veselý, CSc.  
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 pojednává o fotocitlivých kompozicích v tenkých polymerních vrstvách. Experimentální část se zabývá přípravou a nanesením vrstev. Připravené vrstvy byly exponovány a podrobně studovány jejich barevné odezvy na osvit. Cílem bylo připravit dozimetr, dosáhnout výrazné barevné změny mezi jednotlivými dávkami, zlepšit mechanickou odolnost vrstev a regulovat citlivost kompozic vůči UVB záření.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with photosensitive thin polymeric layers. The experimental part deals with the composition preparation and layers coating. The prepared layers were exposed and studied in detail for their color response to the light. The aim was to prepare a dosimeter, to achieve significant color change between individual doses, to improve the mechanical resistance of the layers and to adjust the sensitivity of the compositions to UVB radiation.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

UV záření, UVB záření, fotochemie, fotoiniciátory, fotopolymerizace

## **KEY WORDS**

UV radiation, UVB radiation, photochemistry, photoinitiators, photopolymerization

RUDICKÁ, A. *Fotocitlivé kompozice v tenkých polymerních vrstvách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Michal Veselý, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje byly správně a úplně citovány. 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.

.....  
Podpis studenta

### *Poděkování:*

*Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Michalu Veselému, CSc. za jeho veškerou pomoc, věnovaný čas, trpělivost a cenné rady. Můj dík také patří celému kolektivu laboratoře 3078. V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině za podporu během studia.*

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>5</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Teorie barev</b> .....	<b>7</b>
2.1.1 Měření barvy .....	7
2.1.2 Barvé prostory LAB, LUV.....	8
<b>2.2 Podstata světla</b> .....	<b>9</b>
2.2.1 Ultrafialové záření.....	11
2.2.1.1 UVB záření.....	12
2.2.2 Faktory ovlivňující UV záření dopadající na Zemi .....	12
2.2.3 UV index .....	13
2.2.4 MED.....	15
2.2.5 SED .....	15
2.2.6 Zdroje UV záření .....	16
<b>2.3 Fotochemické reakce</b> .....	<b>17</b>
2.3.1 Dělení fotochemických reakcí.....	17
2.3.2 Faktory ovlivňující průběh fotochemických reakcí.....	18
<b>2.4 Fotoiniciátory</b> .....	<b>19</b>
<b>2.5 Fotochemie polymerních látek</b> .....	<b>20</b>
2.5.1 Fotopolymerizace .....	20
2.5.1.1 Fotoiniciovaná kationtová polymerizace .....	21
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 Použité chemikálie, laboratorní vybavení a software</b> .....	<b>22</b>
3.1.1 Použité chemikálie .....	22
3.1.2 Použité laboratorní vybavení.....	22
3.1.3 Použitý software.....	22
<b>3.2 Příprava kompozic</b> .....	<b>23</b>
3.2.1 Příprava zásobních roztoků .....	23
3.2.2 Příprava kompozic pro proces nanášení vrstev .....	23
3.2.3 Proces nanášení vrstev .....	23
3.2.3.1 Bakerovo natahovací pravítko .....	24
3.2.4 Měření spektrální intenzity záření UV zdrojů.....	25
3.2.5 Ozařování UV LED zdrojem a měření .....	26
<b>4 VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1 Ozáření zdrojem UVLUX295-HL-3</b> .....	<b>27</b>
<b>4.2 Ozáření zdrojem UVLUX285-HL-3</b> .....	<b>30</b>
<b>4.3 Rychlostní konstanty</b> .....	<b>32</b>
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>39</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>40</b>
<b>7 SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÝCH SYMBOLŮ</b> .....	<b>42</b>

# 1 ÚVOD

V dnešní době se klade velký důraz na měření UV záření a sledování dávky ozáření kvůli známosti škodlivých účinků UV záření na lidskou pokožku. Sluneční záření má na pokožku negativní účinek vždy, když je mu vystavena a při dlouhé expozici může dojít k zarudnutí kůže a následné tvorbě puchýřů, v nejhorším případě pak k rakovině kůže.

Hlavním zdrojem UV záření je sluneční světlo. Záření UV je rozděleno do tří spektrálních pásem: UVA, UVB a UVC. Část UV záření, zejména UVC, je absorbována stratosférickým O<sub>3</sub>, ale velké množství UV světla proniká na povrch Země. Přestože je podíl UVA záření na povrchu Země vyšší než podíl UVB, je UVB záření nejvíce škodlivé. Lidské činnosti navíc vytváří látky, které poškozují ozonovou vrstvu. Ztráta stratosférického ozonu vede ke snížení absorpce UV a vyššímu proniknutí UVB na troposféru.

Proto je nutno najít způsob, jak monitorovat dávku ozáření a poskytnout množství UVB záření, se kterým dotyčný jedinec přijde do kontaktu. Jednoduchým způsobem monitorování množství UVB záření je použití dozimetru. K vyhodnocení nejsou třeba speciální techniky, pouze stačí vizuální kontrola uživatele. Ten může rychlou metodou zjistit, zda nebyla překročena dávka UVB záření, jež je považována za bezpečnou. Dozimetr pro UVB záření je schopen pracovat na rozdílných principech, a to podle probíhající v něm chemické reakce.

Cílem této studie je zkoumání citlivosti UVB iniciátoru I na UVB záření a následně se pokusit vyvinout tenkovrstvový indikátor neboli dozimetr, sloužící pro vysoké UVB záření během dne. Takový dozimetr je nutno vyrobit levným způsobem a k tomu nám slouží tiskové nebo ovrstvovací techniky.

Experimentální práce vedoucí k vytvoření dozimetrů uvedených v této práci byly součástí projektu, a s ohledem na závazky řešitelů projektu není možné uvést klíčové složky těchto dozimetrů.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Teorie barev

Barva je optický jev nebo také smyslový vjem přenášen okem a mozkiem. Barva není fyzikálně proměnná, tudíž nemá fyzikální jednotku. Objekt není barevný sám o sobě, ale pocit barvy je výsledkem interakce objektu a světla. Sluneční světlo, které se jeví jako bílé, se vyzařuje na objekt a částečně odráží. Na druhé straně úplně absorbující objekt se zdá být černý. Vzhledem k tomu, že vnímání barvy závisí především na pozorovateli, ale také na podmínkách osvětlení, objektivní posouzení barvy vyžaduje vhodné vybavení vycházející z doporučení zavedených CIE (*International Commission on Illumination*).<sup>1</sup>

#### 2.1.1 Měření barvy

Měření barvy je prakticky nemožné, proto měříme vstupní stimul neboli světlo vstupující do oka pozorovatele a vytvářející vjem určité barvy. Reakci, kterou tento stimul vyvolá, lze odvozovat pouze na základě našich zkušeností. Naštěstí ale tyto reakce lze určit s rozumnou mírou přesnosti.

K měření stimulů interpretovaných pozorovateli – jako barva se používají tři základní typy přístrojů. Princip činnosti těchto přístrojů je shodný. Vyzařují světlo s přesně definovanou spektrální charakteristikou na povrch objektu nebo skrz něj a díky detektorům se snaží změřit světlo, které bylo povrchem odraženo nebo jím prošlo. Detektorem je čítač fotonů, jelikož detektor není schopen určit vlnovou délku počítaných fotonů. Pro zjištění vlnové délky je také nutno filtrování světla dopadajícího na detektor. Rozdíly mezi přístroji, kterými jsou kolorimetry, denzitometry a spektrofotometry jsou v počtu a typu použitých filtrů a citlivosti detektorů.<sup>1</sup>

#### Kolorimetry

Kolorimetry jsou přístroje měřící světlo procházející přes filtry, které napodobují reakci několika typů čípků v lidském oku. Výsledkem jsou číselné hodnoty, spočítané v barevném modelu CIE. Základním omezením kolorimetrů je to, že každý z těchto přístrojů je navržen, aby využíval parametry jen některého konkrétního standardního svítidla a pozorovatele. Najdeme ale i takové kolorimetry, u nichž se nachází přepínač nastavující požadované svítidlo. Ačkoliv s pomocí těchto přístrojů lze zjistit, zda se v podmínkách osvětlení daným standardním svítidlem určité barevné vzorky shodují, nelze říci, zda se jedná o metamerní shodu či o vzorky, jejichž spektrální charakteristiky jsou skutečně totožné. Takové vzorky by se potom měly shodovat při osvětlení jakýmkoliv svítidlem.

#### Denzitometry

Denzitometry jsou poměrně specializované přístroje, velmi důležité ve správě barev, ačkoliv většinu jejich funkcí lze nahradit i kolorimetry či spektrofotometry. Optická hustota je míra, s jakou materiál absorbuje světlo. Obecně platí, že čím více světla materiál absorbuje, tím je jeho optická hustota větší. Denzitometry jsou používány v předtiskové přípravě k ověření,



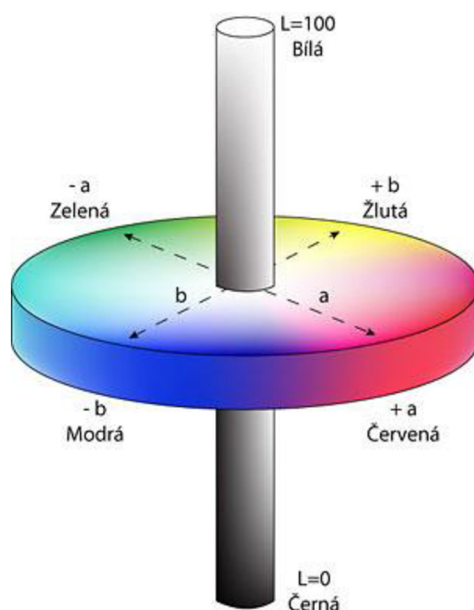
zda-li jsou příslušné filmy správně zpracovány. Při tisku jsou pak denzitometry využívány ke kontrole a úpravám množství inkoustu použitého pro tisk. V neposlední řadě jsou tyto přístroje využívány ke kalibraci zařízení neboli k takovému nastavení zařízení, aby jeho výstup byl, pokud možno optimální.

## Spektrofotometry

Spektrofotometry jsou přístroje využívající se ve spektrofotometrii čili vědě zabývající se měřením spektrální odrazivosti neboli poměrem intenzity dopadajícího světla a světla odraženého do detektoru přístroje, měřený zvláště pro každou vlnovou délku. Spektrální odrazivost je sadou čísel představujících počty fotonů odražených nebo vyzářených při různých vlnových délkách. Spektrofotometry používané v grafice rozdělují viditelné spektrum na pásy o šířce 10 až 20 nm, ve kterých potom provádí měření. Vědecké spektrofotometry rozdělují celé viditelné spektrum na větší počet pásů, které mají šířku kolem 2 nm.<sup>1</sup>

### 2.1.2 Barvé prostory LAB, LUV

Komise CIE vytvořila barevné prostory ve snaze o zmenšení zkreslení barvových vzdáleností. Za tyto dva prostory jsou považovány prostory LAB (**Obrázek 1**) a LUV. V obou prostorech se hodnota měrné světlosti  $L^*$  počítá stejným způsobem, kdy se přibližně jedná o třetí odmocninu hodnoty jasu  $Y$ . Oba prostory se snaží o vytvoření prostoru jednotného z hlediska vnímání, jinak řečeno, by měly vzdálenosti mezi body prostoru odpovídat míře odlišnosti, s jakou bude dané barvy vnímat pozorovatel. Oba prostory tudíž mají vlastnosti, které napodobují jas, sytost a odstín. Prostor LAB se snaží navíc modelovat systém vnímání barevných protikladů, typický pro člověka a nahradil ve spoustě praktických aplikací prostor LUV.<sup>1</sup>



Obrázek 1 Barvový prostor  $CIE L^*a^*b^*$ <sup>2</sup>

## 2.2 Podstata světla

Světlo je elektromagnetické záření vyzařované a pohlcované jako částice a šířící se jako vlny. Jedná se o částicově-vlnový dualismus záření. Na základě elektromagnetické teorie byly objeveny jevy, jako je interference, ohyb a polarizace světla. Ve vakuu se světlo šíří rychlostí  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Světlo spadá do oblasti optického záření zahrnujícího viditelné, ultrafialové a infračervené záření. Ultrafialové a infračervené záření mohou mít z fyzikálního hlediska podobné vlastnosti jako viditelné záření, zrak jej však nedokáže vnímat. Světlo je tedy elektromagnetické záření schopné vybudit zrakový vjem.

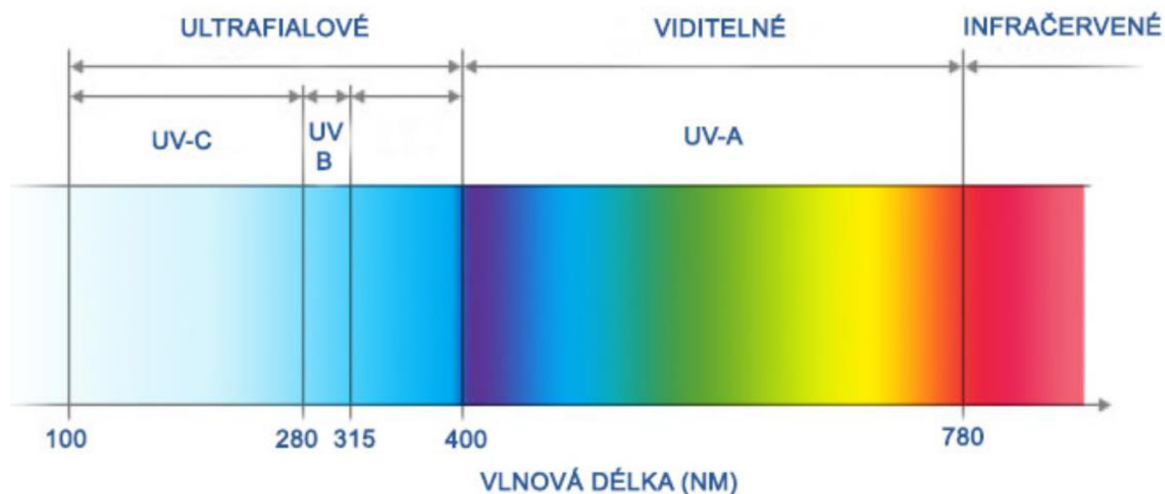
Elektromagnetické záření lze definovat následujícími vztahy:

$$\lambda = c_0 \cdot T \quad (1)$$

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{c_0}{\lambda} \quad (2)$$

kde  $c_0$  je rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu,  $\lambda$  je vlnová délka [nm],  $\nu$  je kmitočet [ $\text{s}^{-1}$ ],  $T$  je doba kmitu [s].

Rozsah vlnové délky viditelného záření se uvádí 400–780 nm (**Obrázek 2**). Dle doporučení Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) se rozeznávají tři druhy infračerveného záření IRA, IRB a IRC s vlnovou délkou od 780 nm. Dle CIE jsou také definovány tři druhy ultrafialového záření UVA, UVB a UVC v rozsahu 100–400 nm. <sup>3,4</sup>



**Obrázek 2** Složky elektromagnetického spektra <sup>5</sup>

Pro popis vlastností elektromagnetického záření celého rozsahu vlnových délek slouží tzv. radiometrické veličiny. Jednotky jednotlivých veličin jsou uvedeny v tabulce (**Tabulka 1**) <sup>6</sup>

**Tabulka 1** Radiometrické a fotometrické veličiny<sup>6</sup>

Radiometrické veličiny			Fotometrické veličiny		
Název	Symbol	Jednotka	Název	Symbol	Jednotka
Zářivá energie	$Q_e$	J	Světelná energie	$Q$	lm·s
Zářivý tok	$\Phi_e$	W	Světelný tok	$\Phi$	lm
Ozáření	$E_e$	W·m <sup>-2</sup>	Osvětlení	$E$	lm·m <sup>-2</sup> (lx)
Zář	$L_e$	W·sr <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>	Jas	$L$	cd·m <sup>-2</sup> (nt)
Dávka ozáření	$H_e$	J·m <sup>-2</sup>	Osvit	$H$	lx·s

Chemické působení světla neboli množství fotochemicky vytvořeného produktu či zaniklé látky, je úměrné celkovému množství absorbovaného světla daného součinem intenzity a času působení světla, což znamená úměrné celkové absorbované energii záření. Lidské oko ale není citlivé na světlo různých vlnových délek a tuto závislost citlivosti oka na vlnové délce vystihuje tzv. fotopická křivka, což znamená, že určité záření v daném rozsahu vlnových délek lze popsat intenzitou ozáření [W·m<sup>-2</sup>]

$$E_e = \int_{\lambda} E_e^{\lambda} \cdot d\lambda \quad (3)$$

kde  $E_e$  je ozáření a  $E_e^{\lambda}$  je spektrální ozáření [W·m<sup>-2</sup>·nm<sup>-1</sup>], avšak v oku vyvolá odezvu zvanou osvětlení [lm·m<sup>-2</sup> = lx], které je svázáno s fotopickou funkcí a spektrálním ozářením dle vztahu

$$E = \int_{\lambda} K_m \cdot V_{\lambda} \cdot E_e^{\lambda} \cdot d\lambda \quad (4)$$

kde  $K_{\lambda} = K_m \cdot V_{\lambda}$  je spektrální světelná účinnost záření a  $V_{\lambda}$  je normalizovaná hodnota fotopické křivky neboli celková relativní spektrální citlivost oka.

Pro časově proměnné ozáření se dostane dávka ozáření [J·m<sup>-2</sup>]

$$H_e = \int_t E_e \cdot dt \quad (5)$$

a pro časově proměnné osvětlení [lx·s]

$$H = \int_t E \cdot dt \quad (6)$$

se dostane dávka světla neboli osvit.

## Denní světlo

Za přirozený zdroj energie, kterou lze ihned využít se považuje denní záření, jehož primárním zdrojem je Slunce. Zdrojem takového světla jsou procesy uvnitř Slunce, které je zdrojem velkého množství energie vyzařované v podobě elektromagnetického záření do prostoru. Kolem 10 % slunečního záření je vyzařováno v ultrafialové oblasti spektra. Sluneční světlo je pak po průchodu atmosférou absorbováno a rozptýleno. Atmosféra dokáže pohltit záření s vlnovými délkami pod 300 nm, k dalšímu pohlcení dojde vlivem aerosolových částic, vodní páry a plynů. Množství světla dopadajícího na zemský povrch je ovlivňováno několika aspekty a vlivy, jako je například roční období nebo denní doba. Světlo dopadá na zemský povrch ve formě přímého slunečního světla a světla rozptýleného atmosférou obsahujícího podíl ultrafialového záření.<sup>7</sup>

## Umělé světlo

Jako denní světlo obsahuje i umělé světlo viditelné spektrum a určitý podíl ultrafialového záření. Světelným zdrojem se rozumí zařízení vysílající viditelné záření přeměňující určitý druh energie na světlo. Předmět vyzařující světlo vznikající v něm samém přeměnou energie nazýváme primární zdroj světla. Pokud je světlo vysíláno v důsledku odrazu nebo prostupu, jedná se o sekundární světelný zdroj.

Významným zdrojem světla v oblasti osvětlování je elektrický světelný zdroj. Takový zdroj se dělí na výbojový a teplotní. Pro výbojový světelný zdroj je typické nespojité spektrum a patří sem výbojky. Za teplotní světelný zdroj jsou považovány žárovky se znakem spojitého spektra. Ultrafialové záření vyzařují v menší či větší míře všechny umělé světelné zdroje.<sup>7</sup>

### 2.2.1 Ultrafialové záření

Ultrafialové záření je forma elektromagnetického záření přítomného ve slunečním světle a umělých zdrojích. Jeho rozsah vlnových délek od 10 nm do 400 nm je kratší než vlnová délka viditelného světla, ale delší než měkké rentgenové záření.

UV záření lze dělit dle několika parametrů, např. dle ISO 21348 (**Tabulka 2**). U nás se UV záření nejčastěji rozděluje do tří spektrálních pásem obsahující různé vlastnosti a představující rozdílné druhy rizika pro každý objekt citlivý na UV záření. UVA elektromagnetické záření spadá do rozsahu vlnové délky od 315 do 400 nm. Jedná se o nejběžnější formu UV záření. Do této spektrální oblasti patří zhruba 99 % UV záření dopadajícího na zemský povrch. Záření dopadá na zemský povrch bez jakékoliv interakce s ozonem (O<sub>3</sub>), považuje se za méně škodlivé a není prokázána zhoubnost pro živé organismy. Na rozdíl od záření UVA, které je jedinou formou UV záření nevýrazně absorbovaného atmosférou kvůli vlnové délce, je UVB s vlnovou délkou od 280 do 315 nm převážně absorbováno, avšak s výrazným poklesem ozonové vrstvy vzrůstá nebezpečí představováno tímto zářením. UVC záření s vlnovou délkou od 100 do 280 nm je zcela absorbováno atmosférou, tudíž není důsledkem pro účely venkovních osobních dozimetrů na Zemi.<sup>8,9</sup>

**Tabulka 2** Rozdělení UV záření dle ISO 21348<sup>10</sup>

Název záření	Označení	Vlnová délka [nm]
Ultrafialové	UV	400–100
Ultrafialové A	UVA	400–315
Ultrafialové B	UVB	315–280
Ultrafialové C	UVC	280–100
Blízké Ultrafialové	NUV	400–300
Střední Ultrafialové	MUV	300–200
Daleké Ultrafialové	FUV	200–122
Vodíkové Lyman-alfa	H Lyman- $\alpha$	122–121
Extrémní Ultrafialové	EUV	121–10
Vakuové Ultrafialové	VUV	200–10

### 2.2.1.1 UVB záření

Záření, které nás nejvíce zajímá je UVB záření. Ačkoliv toto záření přináší lidskému organismu pozitivní fyziologické účinky díky vyhovujícím požadavkům těla na vitamín D, vystavení takovému záření může být nebezpečné pro lidské zdraví. Závažnost poškození závisí na mnoha faktorech, včetně zdroje UV, vlnové délky, intenzity, doby expozice a citlivosti jedince na toto záření. V letním dni je asi 6 % pozemského světla UVB a z 80 % přispívá ke škodlivým účinkům spojených se sluncem. Jeho energie je schopna rozložit nebo narušit bílkoviny či jiné životně důležité organické sloučeniny s vážnými následky pro metabolismus postiženého jedince a zničit jednobuněčné organismy. Dlouhodobé zvýšení UVB záření by mohlo způsobit změny nepředvídatelné třeba ve struktuře biosféry. UVB má také dopad na oči. Takto tvrdé záření dokáže poničit nebo spálit tyčinky, čípky, gangliové buňky a nervová zakončení na rohovce. Často zmiňovaným problémem a důvodem ke zpracování této práce je dopad UVB záření na kůži. Mluvíme-li o krátkodobé expozici, dochází ke způsobení erytému neboli zčervenání kůže či vzniku spáleniny. Pokud se ale jedná o dlouhodobou expozici, dochází k řadě závažnějších zdravotních důsledků v oblasti kůže, hlavně ke vzniku rakoviny.<sup>12,13</sup>

### 2.2.2 Faktory ovlivňující UV záření dopadající na Zemi

Ultrafialové záření a jeho úroveň intenzity působení jsou ovlivněny několika faktory:

**Výška slunce** – čím výš je slunce na obloze, tím vyšší je úroveň UV záření. Stejně tak se liší úroveň záření podle denní doby a roční doby. Nejvyšší úroveň nastává během poledne v letních měsících při maximální nadmořské výšce.

**Zeměpisná šířka** – čím blíže je region k rovníku, tím vyšší úroveň UV záření zde působí.

**Oblačnost** – nejvyšší úroveň UV záření nastává při bezoblačné obloze, ovšem UV záření nám působí i při oblačnosti.

**Nadmořská výška** – ve větších nadmořských výškách absorbuje tenčí atmosféra méně UV záření. Při každých tisíci metrech nárůstu nadmořské výšky se zvyšuje úroveň UV záření cca o 10 %.

**Ozón** – některá z UV záření, která dosáhnou povrchu Země, ozón absorbuje. Hladina ozónu se však v průběhu dne i roku mění.

**Půdní odraz** – různé povrchy dokáží odrážet nebo rozptylovat UV záření v různém rozsahu. Čerstvý sníh může odrážet až 80 % UV záření, suchý písek 15 % a mořská pěna cca 25 %. <sup>14</sup>

### 2.2.3 UV index

V souvislosti s ultrafialovým zářením jsou často zmiňovány incidenční hladiny související s globálním slunečním UV indexem (UVI), který charakterizuje úroveň UV záření na Zemi s hodnotou poskytující celkovou indikaci intenzity UV záření dopadajícího slunečního světla se schopností způsobit červené zbarvení kůže neboli erytém. Hodnoty mohou stoupat od nuly nahoru, přičemž vyšší hodnoty vyznačují větší potenciál způsobit škody v daném období. <sup>12,14</sup>

Výrazný nárůst výskytu rakoviny kůže u lidí je silně spojeno s nadměrným UV zářením ze slunce. UVI je důležitý prostředek ke zvyšování povědomí veřejnosti o rizicích nadměrné expozice a přijmutí potřeby ochranných opatření. Tento krok povzbuzující ke snížení vystavení slunečnímu záření může vést k poklesu škodlivých účinků na zdraví.

UVI by měl být jako integrální součást programu pro informování veřejnosti o zdravotních rizicích, ochraně před slunečním zářením a změnách lidského postoje a chování s ohledem na UV záření. UVI by měl být zaměřen především na vysoce exponované skupiny populace, např. na děti nebo turisty, a měl by informovat o rozsahu UV zářením vyvolaných účinků na zdraví, včetně spálení, stárnutí pokožky či rakoviny kůže.

Úroveň UV záření a tím i hodnoty UVI se mění po celý den. Největší důraz je kladen na maximální hodnotu UV záření během daného dne. Záleží na geografickém místě a na letním slunečním záření mezi polednem a dvěma hodinami odpoledne.

UVI by měl být prezentován jako jedna hodnota zaokrouhlená na nejbližší celé číslo. Pokud je však oblačnost proměnlivá, měl by být UVI prezentován jako rozsah hodnot. Hodnoty seskupené do úrovní expozice jsou uvedeny v tabulce (**Tabulka 3**).

**Tabulka 3** Hodnoty UV indexu

ÚROVEŇ EXPOZICE	UVI ROZSAH
NÍZKÝ	< 2
STŘEDNÍ	3 - 5
VYSOKÝ	6 - 7
VELMI VYSOKÝ	8 - 10
EXTRÉMNÍ	11 +

Globální sluneční UV index je definován pomocí referenčního spektra *Mezinárodní komise pro osvětlení (CIE-International Commission on Illumination)* pro indukovaný UV erytém na lidské pokožce. UVI je jednotkové množství definované vztahem:

$$I_{UV} = k_{er} \cdot \int_{250 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_e^\lambda \cdot s_{er}^\lambda d\lambda \quad (7)$$

kde  $E_e^\lambda$  je sluneční spektrální ozáření [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ] při vlnové délce,  $s_{er}^\lambda$  je akční spektrum erytému při vlnové délce a  $k_{er}$  je konstanta rovnající se  $40 \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ .<sup>14</sup>

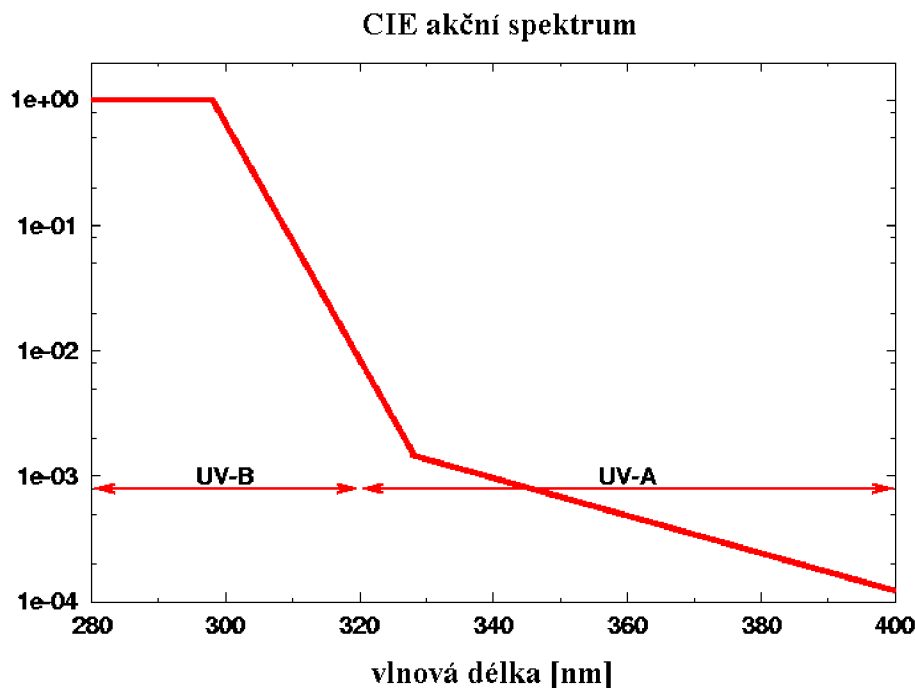
Akční spektrum erytému (**Obrázek 3**) je schopnost UV záření produkovat erytém na lidské kůži, je vysoce závislé na vlnové délce záření a na účincích jednotlivých druhů UV záření na pokožku.

Erytemální efektivní ozáření  $E_{eff}$  zdroje UV záření je intenzita záření, která způsobí erytém, hodnota  $E_{eff}$  je získána dle vztahu

$$E_{eff} = \int_{280 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_e^\lambda \cdot s_{er}^\lambda d\lambda \quad (8)$$

pro všechny vlnové délky zdroje UV záření, kde  $E_e^\lambda$  je spektrální intenzita záření při dané vlnové délce v jednotkách  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ,  $s_{er}^\lambda$  je akční spektrum erytému při vlnové délce. Jednotka  $E_{eff}$  je  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Dávka získaná za čas  $t$  v sekundách je dána vztahem<sup>15,16</sup>

$$H_e = E_{eff} \cdot t \quad (9)$$



**Obrázek 3** CIE akční spektrum erytému

## 2.2.4 MED

Množství UV záření, které je absorbované pokožkou za určitý čas, je známo jako erytemální dávka (9). Při kvantifikaci individuálního vystavení jednotlivce UV záření se používá termín *Minimální Erytemální Dávka* (MED), kde je MED definována jako minimální množství záření způsobující erytém neboli také jako minimální množství energie potřebné k dosažení erytemové odpovědi, obvykle po 24 hodinách. Pro jednotlivce je do značné míry závislá na typu kůže. Jelikož MED označuje konkrétní osobu, existuje související standardizovaná jednotka SED (*Standardní erytemální dávka*).<sup>12,17,18</sup>

## 2.2.5 SED

*Standardní erytemální dávka* (SED) je standardizovaná jednotka odpovídající  $100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$  záření mezi 280–400 nm a používá se především v dermatologii k vyčíslení schopnosti zdroje UV záření produkovat povrchové zčervenání kůže či erytém. Existuje ovšem několik druhů kůže, které se vyznačují množstvím přítomného melaninu. To je faktor určující, jak snadno se člověk dokáže opálit nebo jak snadno se vyvine erytém.

**Tabulka 4** Klasifikace typů kůže na základě jejich náchylnosti ke slunečnímu záření a jejich schopnosti opálení<sup>17</sup>

Fototyp kůže	Citlivost na slunce	Citlivost na spálení	Dosažené opálení	Třídy jednotlivců
I	velmi citlivý	extrémně citlivý <2 SED	žádné	melanově ohrožený
II	mírně citlivý	vysoce citlivý 2–3 SED	světlé	melanově ohrožený
III	mírně necitlivý	mírně citlivý 3–5 SED	střední	melanově kompetentní
IV	necitlivý	málo citlivý 5–7 SED	hnědé	melanově kompetentní
V	necitlivý	velmi málo citlivý 7–10 SED	přírozeně hnědá kůže	melanově chráněný
VI	necitlivý	extrémně málo citlivý >10 SED	přírozeně tmavá kůže	melanově chráněný

Na rozdíl od MED, která poskytuje fyziologickou míru poškození kůže, je SED čistě fyzickou jednotkou nezávislou na typu kůže. Pokud jde o tuto jednotku, prahové hodnoty pro erytém se pohybují od 2 SED do 20 SED.



Standardní dávka erytému se liší také pro jednotlivá pracoviště, kdy na pracovníky ve krytých budovách připadá zhruba 300 SED ročně ze slunečního záření, avšak na pracovníky ve volné přírodě připadá ve stejných zeměpisných šířkách 3–5krát tolik expoziční dávky.<sup>17,19</sup>

## 2.2.6 Zdroje UV záření

Nejvýznamnějším přirozeným zdrojem UV záření je Slunce. UV záření lze ale produkovat i uměle při průchodu elektrického proudu plynem, zpravidla odpařující se rtuť. Mezi umělé zdroje patří různé lampy využívané v medicíně například pro léčbu akné, ekzému a lupénky. Dále se umělé zdroje záření využívají v průmyslu při sváření, polymerizaci a dezinfekci pitné vody nebo ve výzkumu.<sup>20,21</sup>

Zdroj UV záření využívaný v praxi musí splňovat několik podmínek:

- efektivně přeměňovat dodanou elektrickou energii ve stabilní záření s vysokou intenzitou
- být po dlouhou dobu provozně spolehlivý
- emisní vlnová délka musí být optimální pro fotochemické reakce

Dalšími požadavky může být možnost chlazení, možnost měnit teplotu, intenzitu záření nebo možnost pracovat v inertní atmosféře.

Mezi zdroje UV záření v průmyslu patří výbojky, a to nízkotlakové plynové výbojky, střednětlaké plynové výbojky a vysokotlaké plynové výbojky a dále LED.

**Výbojky** – základem funkce výbojových zdrojů jsou procesy, které souvisí s průchodem elektrického proudu prostředím obsahujícím vhodné páry nebo plyny a jejich směsi. Jedná se tak hlavně o páry rtuť, sodíku či halogenidů celé řady kovů, především ze skupiny vzácných zemin, používané společně se vzácnými plyny, například s argonem nebo kryptonem. Výbojové zdroje se dělí dle typu výboje na obloukový, doutnavý, impulsní a bezelektrodový-vysokofrekvenční. Dále se dělí na výbojky plynové, plynové s parami kovů, luminiscenční nebo výbojky, u nichž jsou zdrojem záření elektrody nažhavené v plynovém výboji na vysokou teplotu. Výhodou výbojek je především dlouhá životnost.<sup>11</sup>

**LED** – LED dioda je elektronická polovodičová součástka vyzařující elektromagnetické záření a obsahující P-N přechod. Diody poskytují záření o několika konkrétních vlnových délkách a podle energie záření může LED vyzařovat ultrafialové, viditelné nebo infračervené záření. DUV LED je LED s vlnovou délkou, která odpovídá UVB a UVC oblasti. Výhodou je možnost okamžitého použití diod a výrazně nižší spotřeba energie, která činí až o 80 % nižší spotřebu oproti běžným UV obloukovým lampám. Mezi další výhody patří malé rozměry, velká účinnost a dlouhá životnost.<sup>10</sup>

## 2.3 Fotochemické reakce

Fotochemické reakce jsou chemické reakce, které probíhají z excitovaného stavu sloučenin. Průběh reakcí závisí do značné míry na energii, struktuře a délce života excitovaného stavu částic. S fotochemickými reakcemi souvisí fotoreaktivita, což je schopnost látek podléhat fotochemickým reakcím. Reakce se dělí na primární a sekundární fotochemické děje. Primární děje se vyznačují přímou účastí elektronově excitovaných částic jako reaktantů. Sekundárními ději pak chápeme následné termické reakce produktů primárních procesů v základním elektronovém stavu.

Fotochemické reakci může podléhat částice absorbující foton při fotoexcitaci nebo částice excitující se přenosem energie z primárně excitované částice. Takové reakce se označují jako fotosenzibilizované.<sup>22,23</sup>

### 2.3.1 Dělení fotochemických reakcí

Podle **primárního děje a mechanismu** – často se mechanismus fotochemických reakcí nesleduje podrobně, tudíž není zřejmé, které reakce jsou primární a sekundární. Pokud se ale berou v úvahu jen primární děje, lze reakce dělit do skupin fotoizomeračních, fotoasociačních, fotodisociačních procesů a procesu přenosu elektronu. Fotoizomerační reakcí vznikají částice důsledkem excitace bez rozpadu částic reaktantu. Fotoasociací vznikají větší útvary z menších částic spojením v důsledku změn elektronového systému způsobených vlivem vzniku excitovaného stavu alespoň jedné reagující částice. Fotodisociací se rozumí rozpad částice na více fragmentů v důsledku změn elektronového systému. Co se týče přenosu elektronu, může být intračasticový, interčasticový nebo mezi částicí a prostředím.

Podle **energetických aspektů** – chemické reakce zahrnující excitovaný stav lze rozdělit do několika skupin z hlediska vztahu mezi energií excitovaného stavu, aktivační Gibbsovou energií termické reakce a změnou Gibbsovy energie při přechodu od reaktantů k produktům.

V prvním případě se jedná o skupinu, kam spadá fotokatalýza. Ta je definovaná jako změna rychlosti chemické reakce vlivem absorpce elektromagnetického záření fotokatalyzátorem. Fotokatalyzátor se v excitovaném stavu účastní mechanismu přeměny reaktantů na produkty a v této reakci se nespotebovává.

V druhém případě jde o konverzi energie záření na chemickou energii. Část energie záření absorbovaného jedním z reaktantů se uchovává v produktech reakce. Při zreagování produktů se uchovaná energie uvolní. V produktu reakce se energie může uchovat za daných podmínek, kdy brání velká energie zpětné přeměně produktů na reaktanty.

V třetím případě se mluví o klasické fotochemické reakci a v posledním případě o chemiluminiscenci. Zde nastává existence velmi energeticky bohatých reaktantů termické reakce a produktem této reakce jsou excitované částice.

Fotochemická reakce se považuje za energeticky i ekonomicky méně nákladnou, jelikož při reakci se do vyšších vibračních hladin dostanou jen excitující se částice, díky čemuž dochází ke zvýšení teploty. U nezúčastňujících částic se teplota nemění.<sup>22</sup>

### 2.3.2 Faktory ovlivňující průběh fotochemických reakcí

**Vlnová délka** – průběh fotochemické reakce může do značné míry ovlivňovat vlnová délka záření použitého k iniciaci této reakce. Běžným jevem je ovlivnění kvantového výtěžku, který lze rozdělit do tří skupin. První skupina obsahuje reakce, u nichž kvantový výtěžek nezávisí na vlnové délce záření. Do druhé skupiny se řadí takové reakce, při kterých se s klesající vlnovou délkou zvýší hodnota kvantového výtěžku. Třetí skupinou je tzv. zvonovitý tvar závislosti kvantového výtěžku na vlnové délce, při kterém kvantový výtěžek vzrůstá s vlnovou délkou, ale při dalším zvyšování klesá.

**Teplota a tlak** – vliv teploty na rychlostní konstantu chemického děje lze vyjádřit Arrheniovým vztahem

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{-E^\#}{RT}\right) \quad (10)$$

kde  $A$  je konstanta pro danou reakci,  $E^\#$  je aktivační energie [ $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ],  $R$  je univerzální plynová konstanta [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ] a  $T$  teplota [K].

Aktivační energie  $E^\#$  primárních fotochemických reakcí je malá a změny teploty způsobí nepatrný vliv na rychlostní konstantu primárního děje. Viditelná změna rychlosti a kvantového výtěžku se změnou teploty je způsobena změnou viskozity rozpouštědla a důsledkem teplotní závislosti sekundárních termických reakcí.

Vliv tlaku na rychlost chemických reakcí lze vyjádřit vztahem

$$\left(\frac{d \ln k}{dp}\right)_T = -\frac{\Delta V^\#}{RT} \quad (11)$$

kde  $\Delta V^\#$  je aktivační objem [Pa],  $R$  je univerzální plynová konstanta [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ] a  $T$  teplota [K].

Pokud je rozdíl objemů aktivovaného komplexu a reaktantů  $\Delta V^\#$  kladný, zvýšení tlaku vede ke snížení rychlostní konstanty a opačně. Hodnota  $\Delta V^\#$  zajímá fotochemii pro primární děj. Zvýšení tlaku může vést například ke změně pořadí energií excitovaných stavů.

**Vlastnosti rozpouštědla** – mezi vlastnosti rozpouštědla ovlivňující fotochemickou reakci patří viskozita. Mimo ni reakce ovlivní schopnost rozpouštědla zhaset excitované stavy, přímo se účastnit fotochemických reakcí, vázat se vodíkovými můstky, působit stabilizačními faktory nebo ovlivňovat vlastnosti elektronového systému reagujících částic.

**Viskozita prostředí** – ve fotochemii se viskozita prostředí chápe jako odpor prostředí proti pohybu částic a projevuje se u rychlostní konstanty difúzně řízených dvou či vícemolekulárních dějů. Při bimolekulárních dějích je  $k_{\text{dif}}$  maximální rychlostní konstantou představující rychlost děje, kdy srážka reaktantů vede k produktům.<sup>22</sup>

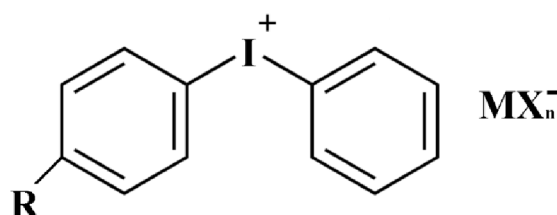
## 2.4 Fotoiniciátory

Fotoiniciátor je sloučenina podléhající fotoreakci po absorpci záření a produkující reaktivní druhy. Ty jsou schopny iniciovat nebo katalyzovat chemické reakce vedoucí k významným změnám v rozpustnosti nebo fyzikálních vlastnostech. Proto je fotoiniciátor sloučeninou, která může transformovat fyzikální energii světla na vhodnou chemickou energii ve formě reaktivních meziproduktů. Tyto změny jsou nejčastěji dosaženy polymerizačními nebo polykondenzačními reakcemi. Fotoiniciátory lze rozdělit do dvou skupin:

**Radikálové fotoiniciátory** – Radikálová polymerizace na bázi akrylátu nebo styrenu je dosud nejrozšířenější aplikací a bylo vyvinuto široké spektrum radikálových fotoiniciátorů. Záření se provádí s využitím ultrafialového záření v rozsahu 300 až 400 nm, ale jsou k dispozici také iniciátory zasahující do viditelného nebo infračerveného rozsahu.

**Kationtové fotoiniciátory** – Jako iniciátory kationtových polymerizačních materiálů nebo pro pryskyřice schopné podstoupit zesílení pomocí polykondenzačních reakcí se používají kationtové fotoiniciátory produkující Brønstedovu nebo Lewisovu kyselinu. Použití světla k vyvolání iniciačního procesu je pak klíčem k vynikajícím výhodám technologie vytvrzování zářením.<sup>24</sup>

Průlom přinesl objev fotoiniciátorů na bázi jodoniových solí. Tyto soli jsou stabilnější za nepřítomnosti světla i při laboratorních teplotách a taktéž nedochází k jejich degradaci vlivem vlhkosti. Molekulární struktura diaryljodoniové soli je znázorněna na obrázku (**Obrázek 4**).

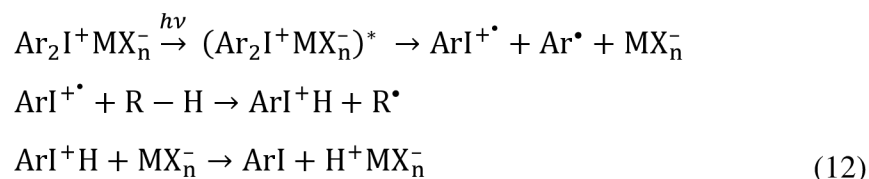


**Obrázek 4** Struktura diaryljodoniové soli

R představuje substituent zvolený tak, aby došlo ke zvýšení rozpustnosti v daném monomeru nebo ke zvýšení absorpce elektromagnetického záření zdroje,  $\text{MX}^-$  představuje halogenid kovu.

Kationt slouží jako absorbent, přičemž o vlnových délkách absorbovaného záření rozhodují substituenty na aromatických kruzích. Absorpční maximum u nesubstituované jodoniové soli se pohybuje okolo 220 nm a vhodnými substituenty jej lze zvýšit. Struktura kationtu taktéž ovlivňuje kvantový výtěžek a tepelnou stabilitu fotoiniciátoru. Kationt má tedy velký vliv na iniciaci, ale nepatrný na propagaci, kde je důležitý anion. Pro rychlý průběh propagační reakce je nutno, aby měla aktivní centra snadný přístup k monomeru, se kterým by mohla reagovat a nebyla zatížena přidruženým protiiontem. Lze toho docílit při dostatečně velkém protiiontu a zápornému náboji rozptýleného na velké ploše. Mezi nejpoužívanější aniony patří  $\text{PF}_6^-$  a  $\text{BF}_4^-$ .

Mechanismus, kterým dochází ke vzniku aktivních center, je složitý. Obecně uznávaný mechanismus je znázorněn v rovnici (12).



Rozpadem molekuly fotoiniciátoru vznikne kationtový radikál jodonia, který je velmi reaktivní a je schopen odštěpit atom vodíku z jakékoliv vhodné molekuly. Vzniká aryljodoniový kationt a neutrální organický radikál schopný iniciovat radikálovou polymerizaci. Aryljodoniový kationt odevzdá proton za tvorby neutrální jodarylové molekuly a superkyseliny, která vznikla přijetím protonu protiiontem. Ta iniciuje kationtovou polymerizaci adicí na monomer.<sup>25</sup>

## 2.5 Fotochemie polymerních látek

Fotochemické a fotofyzikální procesy se v makromolekulární chemii využívají hlavně ve třech oblastech – fotoreaktivní polymery, fotodegradace a fotostabilizace materiálů. Technologie fotoreaktivních polymerů zahrnují zejména tvorbu polymerů neboli fotopolymeraci a iniciaci reakcí v polymerních materiálech za působení elektromagnetického záření nebo fotosíťovací reakce. Záření se využívá především ultrafialové.<sup>26</sup>

### 2.5.1 Fotopolymerizace

Fotopolymerizace je řetězová reakce, u které dochází ke vzniku aktivních center fotochemickými ději. V důsledku absorpce fotonu dochází k nárůstu molekulové hmotnosti sloučeniny. Proces fotopolymerizace začíná iniciací s vytvořením aktivních center, následuje propagace, kdy reagují aktivní centra s monomerními jednotky jejich zapojováním do polymerního řetězce pomocí kovalentních vazeb a zakončí se terminací se zánikem aktivních center.

Pouze během iniciace dochází k absorpci záření světlocitlivou složkou směsi a k tvorbě reaktivních částic. Fotopolymerizace se rozděluje na dvě skupiny, kdy první je založena na přímé absorpci fotonu monomerem bez účasti iniciátoru a nazývá se přímá fotopolymerizace. Druhou skupinu označujeme jako iniciovanou fotopolymerizaci za účasti fotoiniciátoru. Fotopolymerizace se také dělí dle typu aktivního centra na kationtovou a radikálovou.

Systémy fotopolymerizace obsahují několik složek – iniciátor, reaktant a aditiva dodávající požadované vlastnosti. Reaktantem mohou být monomery, oligomery a předpolymery. Fotopolymerizace je založena na stejných principech jako běžná tepelně iniciovaná polymerizace, ale má výhodu v prostorové a časové kontrolovatelnosti iniciace. Aktivní centra vznikají efektně, rychle a nezávisle na teplotě. Tyto výhody se nejvíce využívají při tvorbě tenkých filmů a vrstev.

Průběh a typ polymerizace závisí zejména na struktuře monomerů, kdy základními mechanismy jsou polykondenzace a polyadice. Nejvíce využívaná fotopolymerizace v průmyslu je radikálová. Vyznačuje se rychlým průběhem, avšak její nevýhodou je inhibice

kyslíkem. Další možností je kationtová fotopolymerizace, jež není inhibována kyslíkem a na rozdíl od radikálové fotopolymerizace probíhá i po ukončení osvit. Nevýhodou je však inhibice vodní párou. Aniontová fotopolymerizace se využívá zřídka.<sup>26,27,28,29</sup>

#### ***2.5.1.1 Fotoiniciovaná kationtová polymerizace***

U kationtové polymerizace je za aktivní centrum považován kladně nabitý karbeniový iont  $C^+$ . Tento iont je vytvořen osvitěm fotoiniciátoru, který se dělí na dva typy. Prvním typem je fotoiniciátor vhodný pro konkrétní monomerní systém a druhým typem je fotoiniciátor schopný vyvolat polymerizace u širší škály systémů.

Jako inhibitory kationtové polymerizace působí aminy a chemikálie, které vystupují jako donory elektronů.

Výhodou kationtové polymerizace je nízká citlivost k atmosférickému kyslíku, ale také živý charakter polymerizace, jež je po UV ozáření schopna pokračovat i v temnotě. Na rozdíl od radikálové polymerizace, která je omezena nutností použití nenasycených sloučenin, lze kationtovou polymerizaci využít u nasycených sloučenin. Nevýhodou však je poměrně malý výběr fotoiniciátorů schopných vytvořit aktivní centra nutná pro propagaci.<sup>30,31</sup>

## **3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **3.1 Použité chemikálie, laboratorní vybavení a software**

#### **3.1.1 Použité chemikálie**

- Barvivo BCG (Bromkresolová zeleň)
- Lak 2A (polymer)
- Kalibrační činidlo I
- Kalibrační činidlo F
- Ethanol

#### **3.1.2 Použité laboratorní vybavení**

- Laboratorní sklo
- Analytické digitální váhy Sartorius Entris 224I – 1S
- Ultrazvuk – Ultrasonic compact cleaner PS 02000A
- Automatický aplikátor filmu TQC
- Bakerovo natahovací pravítko
- Sušárna Venticell, MBT Medical Technology s.r.o.
- Spektrofotometr RED TIDE USB650UV
- Spektrofotometr Eye-One Pro
- UV LED dioda – UVLUX285-HL-3, Roithner Laser Technik
- UV LED dioda – UVLUX295-HL-3, Roithner Laser Technik
- PC

#### **3.1.3 Použitý software**

- Key Wizard, Gretag Macbeth
- Microsoft Excel
- Microsoft Word
- Origin 7,5
- Adobe Photoshop CS2, verze 9.0

## 3.2 Příprava kompozic

### 3.2.1 Příprava zásobních roztoků

Roztok barviva BCG

- BCG – 1,644 % hm. v ethanolu

Roztok kalibračního činidla I

- Kalibrační činidlo I – 4,448 % hm. v ethanolu

Roztok kalibračního činidla F

- Kalibrační činidlo F – 9,245 % hm. v ethanolu

### 3.2.2 Příprava kompozic pro proces nanášení vrstev

Pro proces natahování byly do kádinek připraveny kompozice z 5 g polymeru (Lak 2A), dále bylo přidáno 0,25 g roztoku barviva BCG a 1,25 g roztoku kalibračního činidla I. Do takto připravené kompozice bylo přidáváno různé množství kalibračního činidla F (**Tabulka 5**).

Výsledné roztoky byly pro lepší rozpuštění vloženy na 3 minuty do ultrazvukové lázně a následně zadělány laboratorním parafilmem.

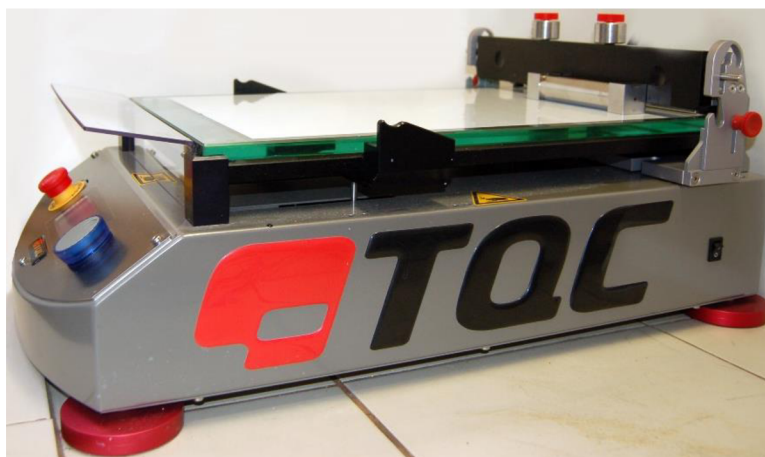
**Tabulka 5** Navážky jednotlivých kompozic

Číslo vzorku	Polymer [g]	Roztok kalibračního činidla I [g]	Roztok BCG [g]	Roztok kalibračního činidla F [g]
11	5,0125	1,2595	0,2570	0,2596
12	5,0352	1,2530	0,2519	0,2707
13	5,0231	1,2543	0,2510	0,2893
14	5,0553	1,2503	0,2517	0,3088
15	5,0065	1,2532	0,2557	0,3292
16	5,0228	1,2520	0,2590	0,3392

### 3.2.3 Proces nanášení vrstev

Po přípravě roztoků byla pomocí řezačky nachystána bílá PET tisková fólie o tloušťce 50  $\mu\text{m}$ , jež byla následně uchycena na automatickém aplikátoru filmu TQC (**Obrázek 5**). Automatický aplikátor filmu TQC zajišťuje rovnoměrné a přesné nanesení filmu, a také výbornou opakovatelnost. Na přístroji je možnost nastavení velikosti nanášené plochy a rychlost nanášení. Dále přístroj podporuje dva způsoby nanášení, a to pomocí Bakerova natahovacího pravitka nebo Mayerovy tyče. Při přípravě vrstev bylo využito Bakerovo natahovací pravitko.



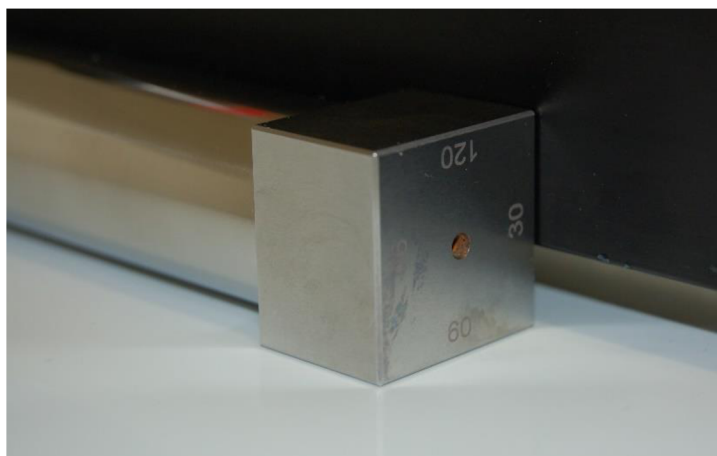


**Obrázek 5** Automatický aplikátor filmu TQC

### ***3.2.3.1 Bakerovo natahovací pravítko***

Bakerovo natahovací pravítko je vyrobeno z nerezové oceli a je tvořeno válcovým aplikátorem se čtvercovými aplikačními stěnami o určité tloušťce. Při nanášení vrstev je možnost změny tloušťky otáčením pravítka o 90°. Bakerovo natahovací pravítko je při nanášení vrstev umístěno před automatický aplikátor a před pravítko nanesen roztok připravené kompozice. Je nutno nanést roztok tak, aby nepodtekl pod čtvercové aplikační stěny. Následně je spuštěno automatické nanášení vrstvy a roztok kompozice prochází pod válcovým aplikátorem za vytvoření jednolité hladké vrstvy o určité tloušťce.

Díky Bakerovu natahovacímu pravítku byly nanесeny připravené kompozice. Konkrétně byly natahovány vrstvy o tloušťce 90 a 120  $\mu\text{m}$  a to vždy dvakrát. Vrstvy byly sušeny samovolně na vzduchu po dobu 10–15 minut.



**Obrázek 6** Bakerovo natahovací pravítko

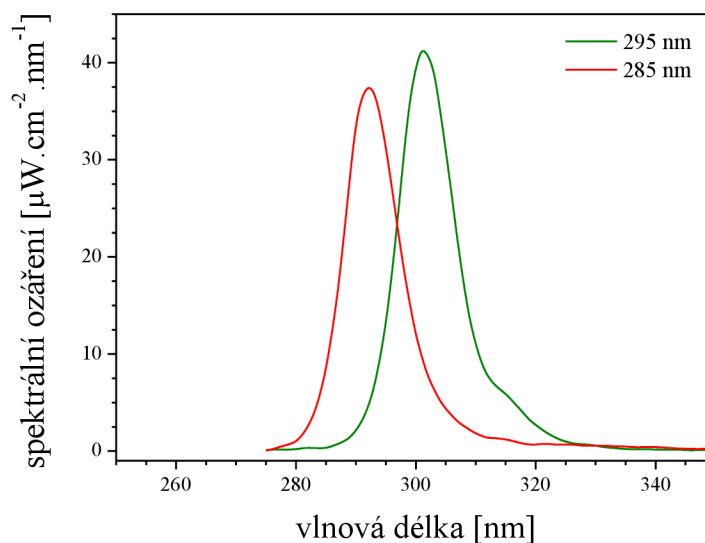
### 3.2.4 Měření spektrální intenzity záření UV zdrojů

Pro experiment byly vybrány LED UVLUX285-HL-3 a UVLUX295-HL-3, se kterými došlo k proměření spektrální intenzity ozáření použitého zdroje v závislosti na procházejícím proudu a na vzdálenosti od ozařované plochy. Při měření spektrální intenzity v závislosti na vzdálenosti byl nastaven konstantní procházející proud 20 mA a při proměřování spektrální intenzity v závislosti na procházejícím proudu byla nastavena konstantní vzdálenost 3,2 cm mezi zdrojem záření a kosinovým sběračem optického vlákna spektrofotometru. Tato vzdálenost byla následně použita i při ozařování vzorků. Měření bylo provedeno ve světlotěsném měchu, s přesně nastavitelnou vzdáleností LED zdroje od kosinového sběrače vlákna spektrofotometru. Ten byl nakalibrován na absolutní hodnoty spektrální intenzity ozáření.



Obrázek 7 Měření intenzity UV LED zdroje světlotěsným měchem

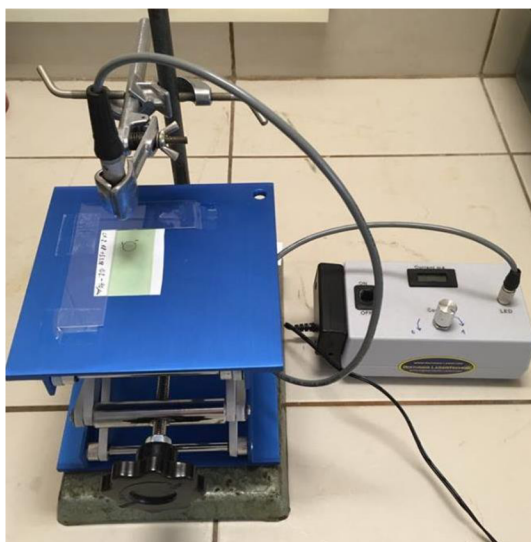
Naměřená spektrální intenzita ozáření byla integrována v rozsahu vlnových délek 275–330 nm pro UVLUX285-HL-3 i pro UVLUX295-HL-3.



Obrázek 8 Spektrální ozáření pro UVLUX295-HL-3 a UVLUX285-HL-3

### 3.2.5 Ozařování UV LED zdrojem a měření

UV ozáření bylo provedeno pomocí UV LED diody s použitím intenzity cca  $0,54 \text{ m} \cdot \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$  pro UVLUX295-HL-3 a cca  $0,45 \text{ m} \cdot \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$  pro UVLUX285-HL-3 (**Tabulka 6**). Z kompozice byly vystříženy potřebně velké proužky, na nich byla vybrána taková místa, jež byla nejvíce jednolitá. Následně bylo označeno místo, na kterém se měřila spektra, aby se eliminovala chyba. Celková doba ozáření byla třicet minut, po každých třech minutách bylo provedeno měření reflektance a souřadnic barvového prostoru (CIE Lab) pomocí spektrofotometru. Změřená data byla zaznamenána a uložena do programu Excel. Na základě získaných souřadnic barvového prostoru (Lab) z každého měření byly vytvořeny barevné stupnice s pomocí programu Adobe PhotoShop, které byly přiloženy k jednotlivým grafům pro lepší vizuální představu. Spektrofotometr byl nastaven pro  $2^\circ$  pozorovatele s osvětlením D50, spektrum bylo měřeno v rozsahu 400–730 nm s krokem 10 nm. Před zahájením měření byla provedena kalibrace spektrofotometru pomocí bílého standardu. Jednotlivé kompozice pak byly měřeny na vyznačených místech a na bílé podložce, aby byly sjednoceny podmínky měření.



Obrázek 9 UV LED zdroj UVLUX-HL-3, Roithner Laser Technik

Tabulka 6 Parametry použitých LED zdrojů v experimentální sestavě

LED	Intenzita ozáření	Dávka ozáření	Erytemálně účinná intenzita ozáření (8)	Erytemálně účinná dávka ozáření (9)
UVLUX285-HL-3	0,451	811	0,399	717
UVLUX295-HL-3	0,538	968	0,255	459

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Vzorky byly ozařovány UV LED zdrojem. V prvním případě byl vybrán zdroj UVLUX295-HL-3, nicméně v průběhu měření došlo k jeho nenávratnému poškození, tudíž byly tímto zdrojem ozářeny pouze vzorky číslo 12–16 s tloušťkou 90  $\mu\text{m}$  a vzorky číslo 13–16 s tloušťkou 120  $\mu\text{m}$ . Následně byl vybrán zdroj UVLUX285-HL-3, kterým byly změřeny všechny vzorky, a to vzorky číslo 12–16 s tloušťkou 90  $\mu\text{m}$  a vzorky číslo 12–16 s tloušťkou 120  $\mu\text{m}$ .

U všech vzorků byla naměřena reflektanční spektra  $-\log R$ , která jsou vynesena v grafech v závislosti na vlnové délce v nm (**Obrázek 10**, **Obrázek 12**, **Obrázek 14**, **Obrázek 16**).

Pro vytvoření dozimetru bylo vybráno barvivo Bromkresolová zeleň, jelikož dochází k jeho barevné změně v důsledku reakce s fotogenerovanými meziprodukty aktivních látek ve vrstvě. Barevná změna je okem viditelná a nevratná. Bylo připraveno velké množství vzorků neboli kompozic, lišící se přidavkem kalibračního činidla F. Vzorky číslo 1–10 nebyly následně použity, protože nízkým přidavkem kalibračního činidla F nesplňovaly požadavky barevné změny. Taktéž vzorky následující po čísle 16 nebyly dále použity, z důvodu nevýrazného barevného přechodu. Kompozice nejlépe splňující požadované vlastnosti byly připraveny dle složení uvedeného v tabulce (**Tabulka 5**).

Po nanesení výsledných kompozic na PET folii (**kapitola 3.2.2**) byl vzorek usušen samovolně na vzduchu po dobu cca 10–15 minut, po předchozím vysledování tvorby matného a lepkavého povrchu na nanesených vrstvách při sušení v sušárně při teplotě 100  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 1,5 minuty pro tloušťku 90  $\mu\text{m}$  a při stejné teplotě po dobu 3 minut pro tloušťku 120  $\mu\text{m}$ . Usušené vzorky byly ozařovány zdrojem (**kapitola 3.2.5**). Po každé expozici byla proměřena reflektance a následně byly z naměřených dat zpracovány grafy, které ukazují závislost poklesu  $-\log R$  na vlnové délce při jednotlivých expozicích. Všechny kompozice byly ozařovány po dobu 30 minut.

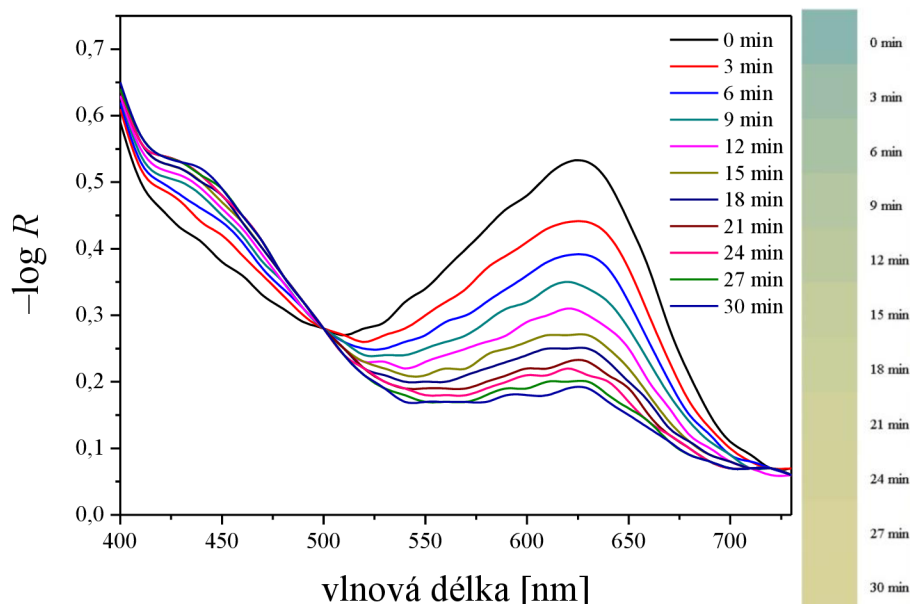
Tištěný tenkovrstvový UVB dozimetr by měl vykazovat významnou a dobře okem rozlišitelnou barevnou změnu odpovídající požadované dávce záření. Z toho důvodu byly vybrány vzorky číslo 13 o tloušťce 90  $\mu\text{m}$  a 120  $\mu\text{m}$  ozářené UVLUX295-HL-3 a vzorky číslo 11 o tloušťce 90  $\mu\text{m}$  a 120  $\mu\text{m}$  ozářené UVLUX285-HL-3.

### 4.1 Ozáření zdrojem UVLUX295-HL-3

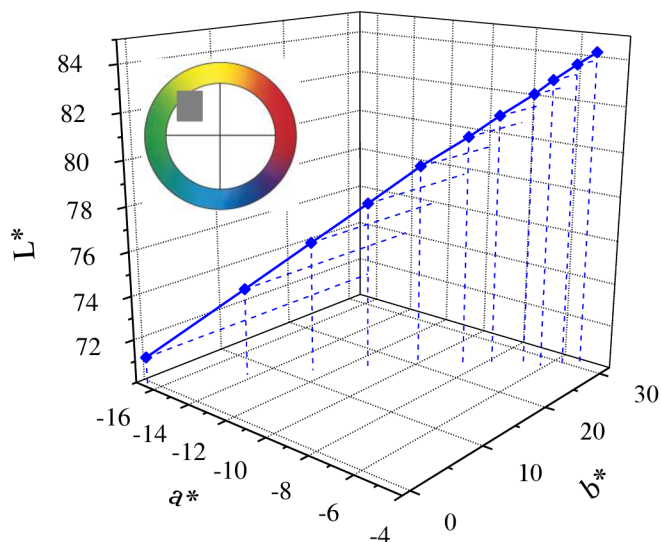
Na obrázcích (**Obrázek 10** a **Obrázek 12**) jsou uvedena pouze spektra vzorku číslo 13 o tloušťce 90 a 120  $\mu\text{m}$ , obsahující barvivo BCG, při přechodu z modré barvy na žlutou po ozáření zdrojem UVLUX295-HL-3, pouze pro ilustraci barevných změn při expozici. Z naměřených spekter byly dále počítané rychlostní konstanty prvního řádu.

Z prvního spektra (**Obrázek 10**) je zřejmé, že k přeměně na žlutou barvu dojde již po 27 minutách. Největší pík neozářené kompozice při  $\lambda_{\text{max}}=620$  nm odpovídá modré barvě, po jednotlivých intervalech ozařování dochází k poklesu při 620 nm a nárůstu absorbance modré oblasti spektra při 430 nm a tedy změně na žlutou barvu. Na tomtéž obrázku vpravo lze vidět přechod zpracovaný pomocí barvových souřadnic  $L^*a^*b^*$  v programu Adobe Photoshop.

Na obrázku (**Obrázek 11**) jsou znázorněny pro tentýž vzorek o stejné tloušťce barvé souřadnice  $L^*a^*b^*$ , které charakterizují barvový prostor. Osa  $a^*$  znázorňuje barevnou změnu od zelené po červenou, osa  $b^*$  popisuje barevnou změnu od modré po žlutou a osa  $L^*$  vyjadřuje měrnou světlost.  $L^*=100$  odpovídá bílé a  $L^*=0$  černé barvě. V grafu je také vložen malý obrázek vyjadřující pouze osy  $a^*$  a  $b^*$ , který má pozorovateli přiblížit, ve kterém barvovém prostoru se nachází.



**Obrázek 10** Reflektanční spektrum a barevná škála vzorku číslo 13 o tloušťce 90  $\mu\text{m}$  a intenzitě ozáření  $0,54 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$



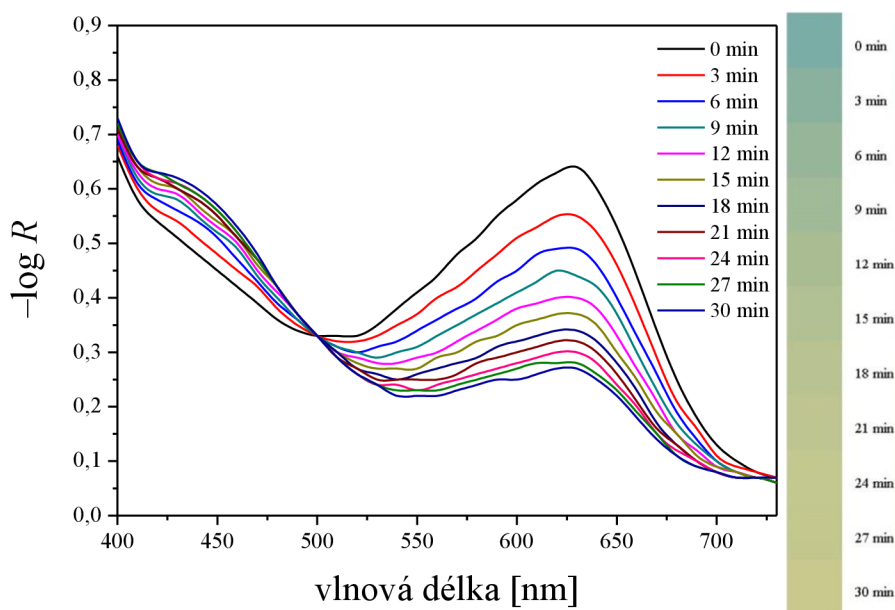
**Obrázek 11** Barevná změna v prostoru  $L^*a^*b^*$  vzorku číslo 13 o tloušťce 90  $\mu\text{m}$  a intenzitě ozáření  $0,54 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$

Na druhém spektru (**Obrázek 12**) je zřejmé, že dojde k odbarvení modré na žlutou barvu až po 30 minutách. Největší pík neozářené kompozice při  $\lambda_{\text{max}}=630 \text{ nm}$  odpovídá modré barvě, po jednotlivých intervalech ozařování opět dochází k poklesu při 630 nm a nárůstu absorpance

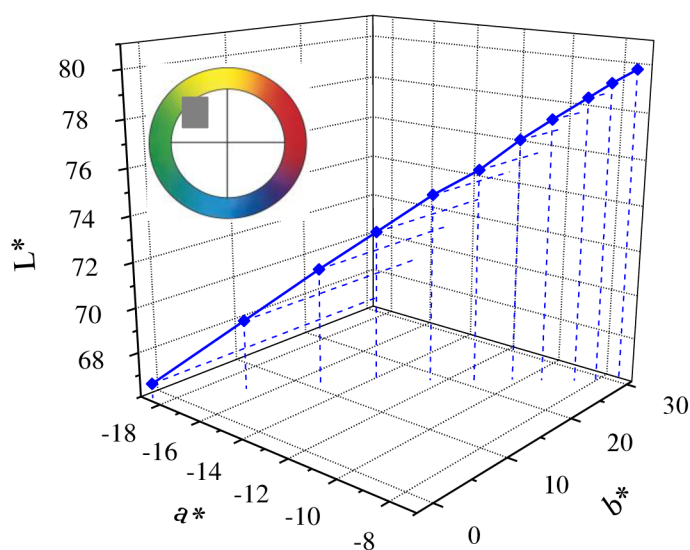
modré oblasti spektra při 430 nm a tedy změně na žlutou barvu. Nicméně tento přechod je pomalejší než u stejného vzorku o tloušťce 90  $\mu\text{m}$ . Na tomto obrázku lze opět vidět přechod zpracovaný pomocí barevných souřadnic  $L^*a^*b^*$  v programu Adobe Photoshop.

Všechny zjištěné změny ve spektrech korespondují se změnou rychlostní konstanty studovaného procesu přeměny BCG.

Na obrázku (**Obrázek 13**) jsou pro tentýž vzorek ale o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  taktéž znázorněny barevné souřadnice  $L^*a^*b^*$  charakterizující barvosvětelnost a malý obrázek pro představu výskytu v barvosvětelném prostoru.



**Obrázek 12** Reflektanční spektrum a barevná škála vzorku číslo 13 o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  a intenzitě ozáření  $0,54 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$



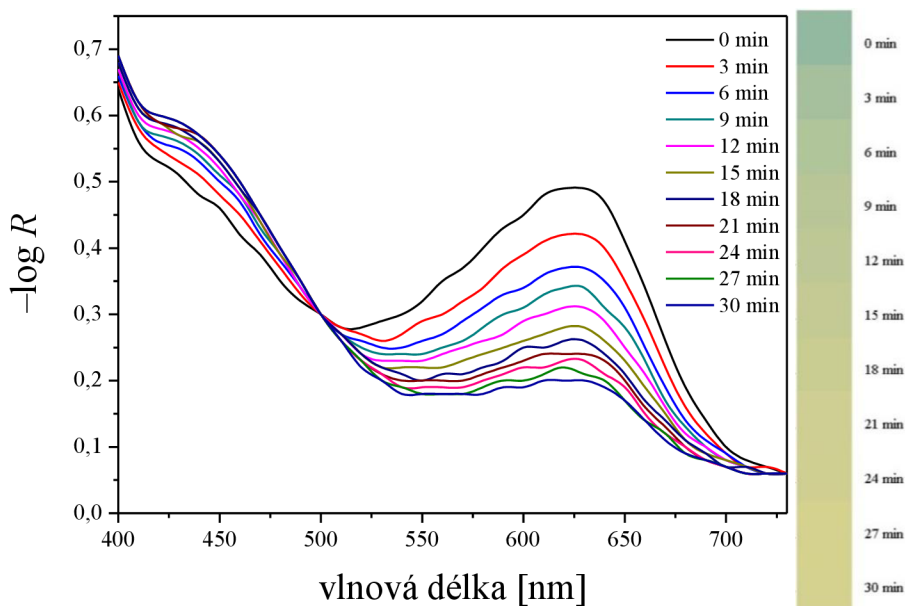
**Obrázek 13** Barevná změna v prostoru  $L^*a^*b^*$  vzorku číslo 13 o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  a intenzitě ozáření  $0,54 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$

## 4.2 Ozáření zdrojem UVLUX285-HL-3

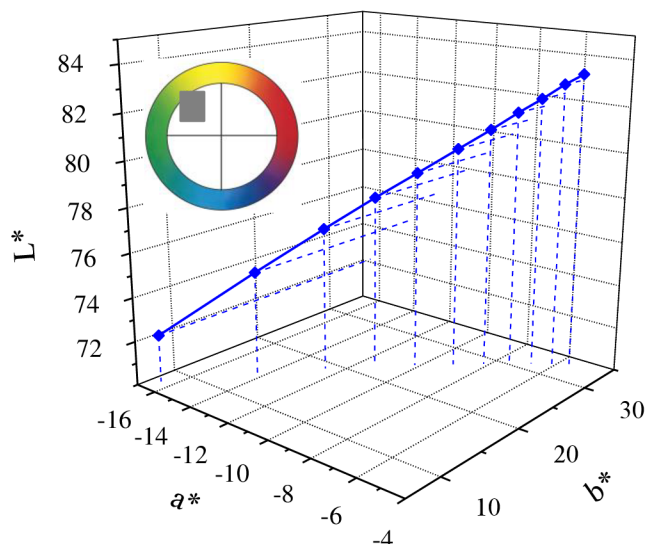
Na obrázcích (**Obrázek 14** a **Obrázek 16**) jsou opět uvedena spektra, nicméně jiného vzorku, a to vzorku číslo 11 o tloušťce opět 90 a 120  $\mu\text{m}$ , obsahující barvivo BCG, při přechodu z modré barvy na žlutou, tentokrát po ozáření zdrojem UVLUX285-HL-3.

Z prvního spektra (**Obrázek 14**) je zřejmé, že k přeměně na žlutou barvu dojde již po 27 minutách. Největší pík neozářené kompozice při  $\lambda_{\text{max}}=620\text{ nm}$  odpovídá modré barvě, po jednotlivých intervalech ozařování opět dochází k poklesu při 620 nm a nárůstu absorbance modré oblasti spektra při 430 nm a tedy změně na žlutou barvu. Tento přechod je rychlejší než u vzorku číslo 13 ozářeného UVLUX295-HL-3 (**kapitola 4.1**). To lze vidět na tomtéž obrázku vpravo, kde je znázorněn barevný přechod pomocí souřadnic  $L^*a^*b^*$  v programu Adobe Photoshop.

Na obrázku (**Obrázek 15**) jsou znázorněny pro tentýž vzorek o stejné tloušťce barvové souřadnice  $L^*a^*b^*$ , které charakterizují barvový prostor a malý obrázek pro představu výskytu v barvovém prostoru.



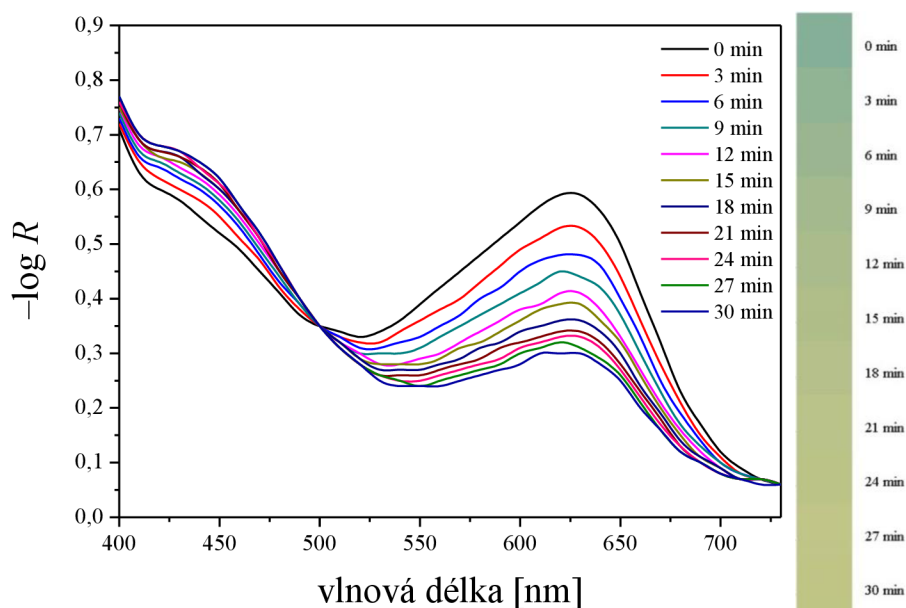
**Obrázek 14** Reflektanční spektrum a barevná škála vzorku číslo 11 o tloušťce 90  $\mu\text{m}$  a intenzitě ozáření  $0,45\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$



**Obrázek 15** Barevná změna v prostoru  $L^*a^*b^*$  vzorku číslo 11 o tloušťce  $90\ \mu\text{m}$  a intenzitě ozáření  $0,45\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$

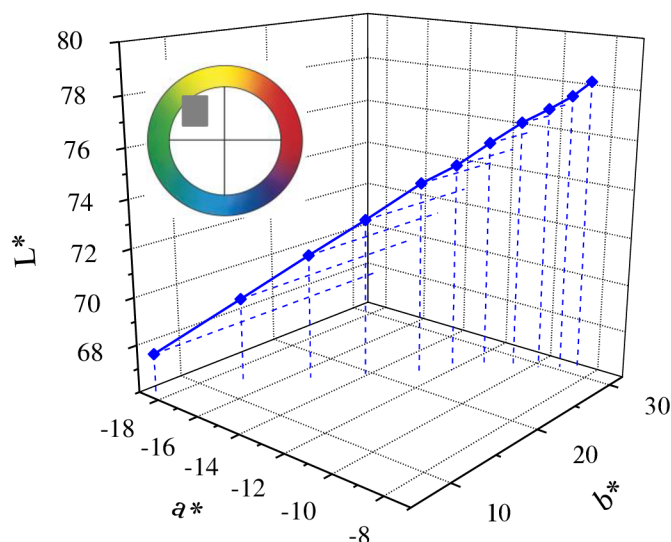
Na druhém spektru (**Obrázek 16**) je zřejmé, že dojde k odbarvení modré na žlutou barvu po 30 minutách. Největší pík neozářené kompozice při  $\lambda_{\text{max}}=620\ \text{nm}$  odpovídá modré barvě, po jednotlivých intervalech ozařování opět dochází k poklesu při  $620\ \text{nm}$  a nárůstu absorbance modré oblasti spektra při  $430\ \text{nm}$  a tedy změně na žlutou barvu. Nicméně tento přechod je pomalejší než u stejného vzorku o tloušťce  $90\ \mu\text{m}$ . Na tomtéž obrázku lze opět vidět přechod zpracovaný pomocí barevných souřadnic  $L^*a^*b^*$  v programu Adobe Photoshop.

Na obrázku (**Obrázek 17**) jsou pro tentýž vzorek ale o tloušťce  $120\ \mu\text{m}$  taktéž znázorněny barevné souřadnice  $L^*a^*b^*$  charakterizující barevný prostor a malý obrázek pro představu výskytu v barevném prostoru.



**Obrázek 16** Reflektanční spektrum a barevná škála vzorku číslo 11 o tloušťce  $120\ \mu\text{m}$  a intenzitě ozáření  $0,45\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$





**Obrázek 17** Barevná změna v prostoru  $L^*a^*b^*$  vzorku číslo 11 o tloušťce  $120\ \mu\text{m}$  a intenzitě ozáření  $0,45\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$

Ze všech uvedených spekter je zřejmé, že na rychlost barevné přeměny z modré na žlutou barvu vlivem UV záření, má vliv tloušťka vrstvy a samozřejmě také zdroj UV záření. Rychlejší odbarvování dochází při tloušťce  $90\ \mu\text{m}$ . Co se týče zdroje, dochází k rychlejšímu odbarvení zdrojem UVLUX295-HL-3, protože kromě posunu emisního pásu poskytuje o 15 % větší intenzitu ozáření.

### 4.3 Rychlostní konstanty

Rychlejší přeměnu z modré na žlutou barvu u tloušťky  $90\ \mu\text{m}$  a zdroje UVLUX295-HL-3 potvrzují i rychlostní konstanty prvního řádu v závislosti přidavku roztoku kalibračního činidla F (**Obrázek 22**, **Obrázek 27**). Rychlostní konstanty prvního řádu byly získány z naměřených hodnot reflektance, které byly přepočítány na záporný dekadický logaritmus. Byly vybrány hodnoty při maximálních vlnových délkách v nm. Absorbance při těchto vlnových délkách reprezentují koncentrace absorbujícího barviva. Získané hodnoty byly dělené hodnotami v čase nula (před expozicí) a byly označeny jako relativní spektrální optická hustota se značkou  $D_{\text{rel}}$ . Přirozený logaritmus tohoto podílu je lineárně závislý na čase expozice (**13**). Závislost přirozeného logaritmu  $D_{\text{rel}}$  v závislosti na čase proložená přímkou lineární regrese je zobrazená v grafech (**Obrázek 18**, **Obrázek 20**, **Obrázek 23**, **Obrázek 25**). Pomocí funkce Linregrese v programu Microsoft Excel byly vypočteny rychlostní konstanty prvního řádu (**Tabulka 7**, **Tabulka 8**). Dále byly z funkce Linregrese použity vypočtené hodnoty standardních chyb a vyjádřeny v grafech pomocí úseček. Z těchto grafů je patrné, že přidavek roztoku kalibračního činidla F měl vliv na rychlost přeměny modré barvy na žlutou. Větším přidavkem roztoku kalibračního činidla F se snižují rychlostní konstanty, tudíž dochází k pomalejšímu blednutí modré barvy na žlutou.

$$\frac{-\log R}{-\log R_0} = D_{\text{rel}} \quad (13)$$

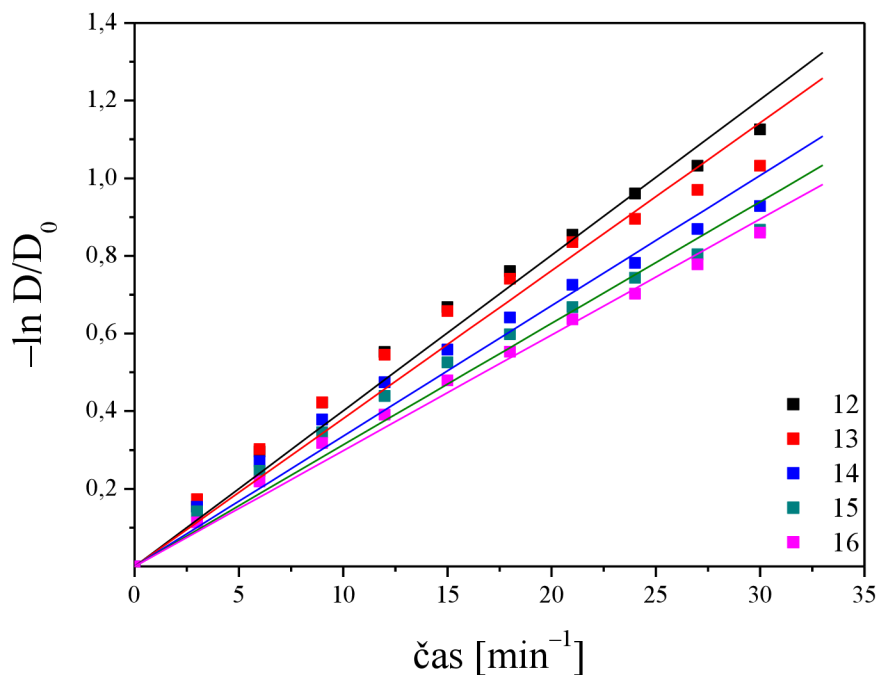
**Tabulka 7** Vypočtené hodnoty rychlostních konstant prvního řádu a standardních chyb pro vzorky o tloušťce 90 a 120 μm ozařovaných zdrojem UVLUX295-HL-3

UVLUX295-HL-3		Tloušťka 90 μm		Tloušťka 120 μm	
Číslo vzorku	Přídavek roztoku kalibračního činidla F [g]	Rychlostní konstanta	Standardní chyba	Rychlostní konstanta	Standardní chyba
12	0,2707	0,0401	0,0009	chybí	
13	0,2893	0,0381	0,0012	0,0320	0,0010
14	0,3088	0,0336	0,0010	0,0316	0,3088
15	0,3292	0,0313	0,0009	0,0294	0,3292
16	0,3392	0,0298	0,0005	0,0276	0,3392

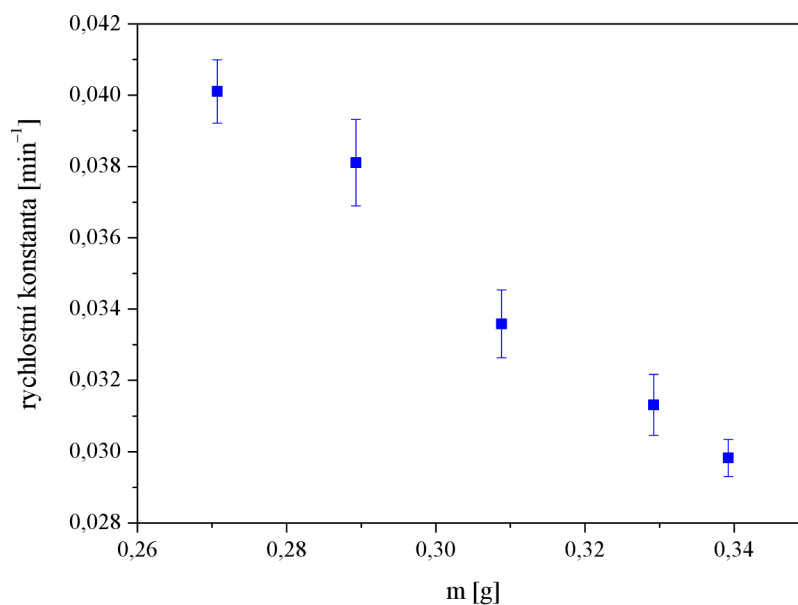
**Tabulka 8** Vypočtené hodnoty rychlostních konstant prvního řádu a standardních chyb pro vzorky o tloušťce 90 a 120 μm ozařovaných zdrojem UVLUX285-HL-3

UVLUX285-HL-3		Tloušťka 90 μm		Tloušťka 120 μm	
Číslo vzorku	Přídavek roztoku kalibračního činidla F [g]	Rychlostní konstanta	Standardní chyba	Rychlostní konstanta	Standardní chyba
11	0,2596	0,0326	0,0011	0,0248	0,0009
12	0,2707	0,0286	0,0009	0,0231	0,0008
13	0,2893	0,0260	0,0007	0,0217	0,0005
14	0,3088	0,0239	0,0006	0,0193	0,0005
15	0,3292	0,0236	0,0008	0,0182	0,0004
16	0,3392	0,0226	0,0005	0,0179	0,0004

Ozáření zdrojem UVLUX295-HL-3 vzorků o tloušťce 90 μm

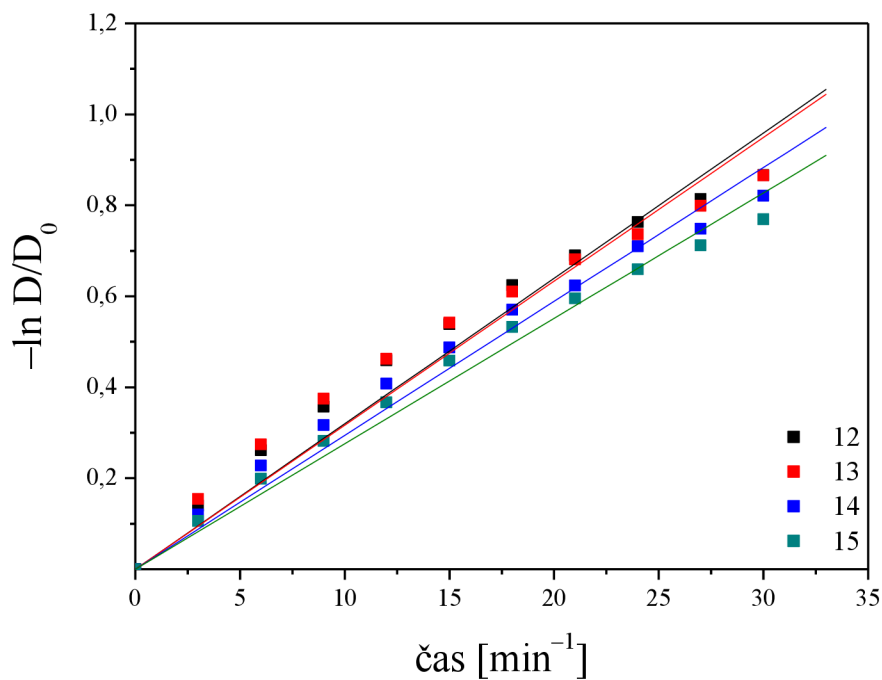


Obrázek 18 Závislost přirozeného logaritmu  $D_{rel}$  v závislosti na čase proložená přímkou lineární regrese vzorků o tloušťce 90 μm

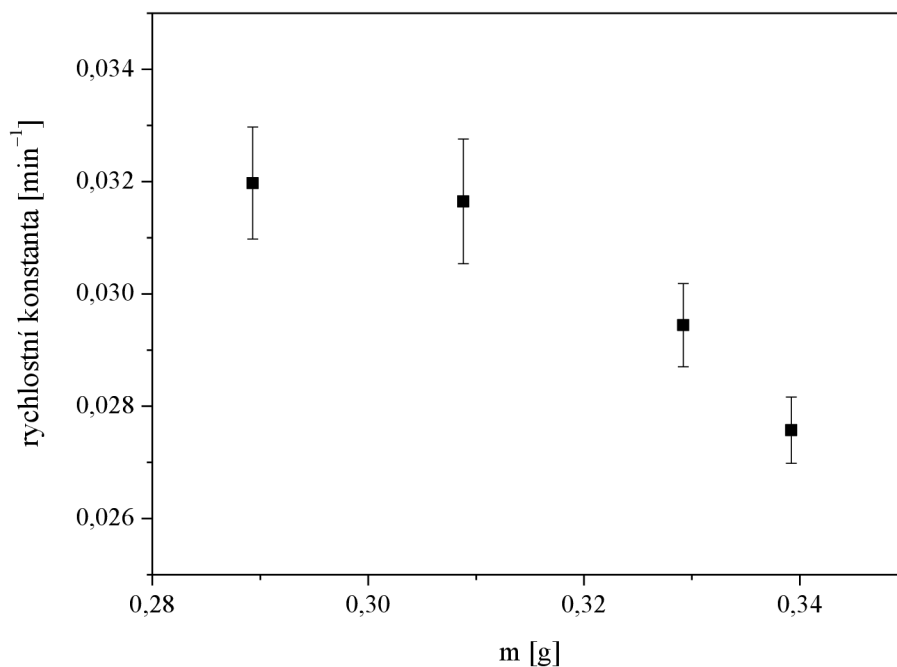


Obrázek 19 Závislost rychlostní konstanty na přidavku roztoku kalibračního činidla F u vzorků o tloušťce 90 μm ozářených zdrojem UVLUX295-HL-3 (Tabulka 7)

Ozáření zdrojem UVLUX295-HL-3 vzorků o tloušťce 120  $\mu\text{m}$

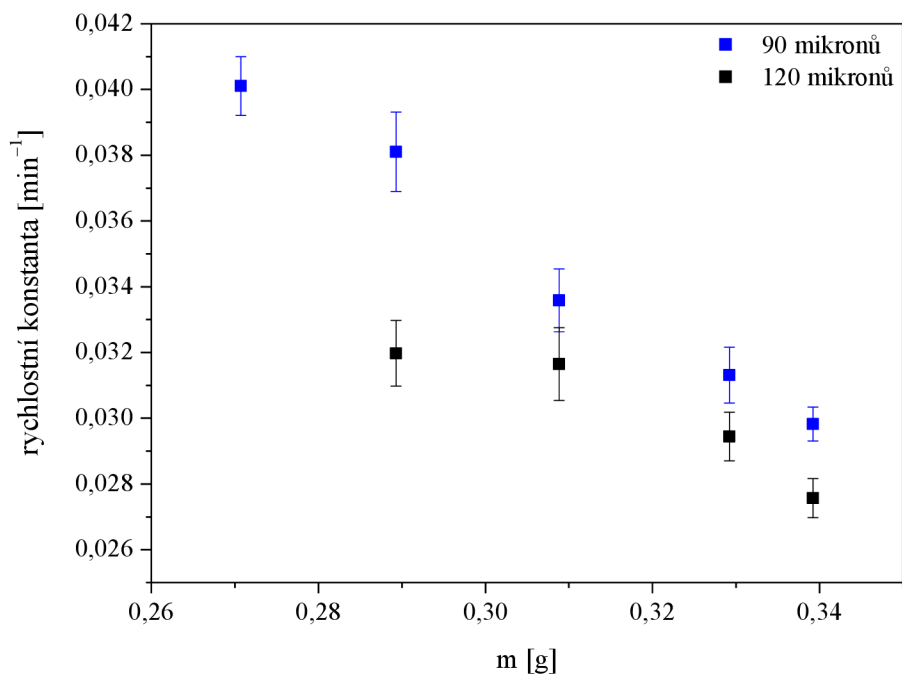


Obrázek 20 Závislost přirozeného logaritmu  $D_{\text{rel}}$  v závislosti na čase proložená přímkou lineární regrese vzorků o tloušťce 120  $\mu\text{m}$



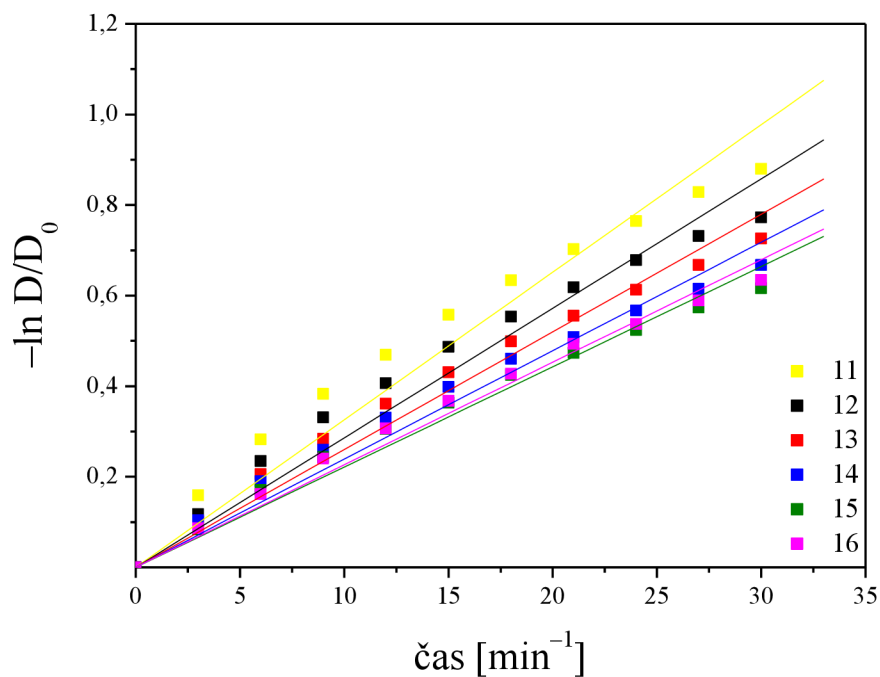
Obrázek 21 Závislost rychlostní konstanty na přidavku roztoku kalibračního činidla F u vzorků o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  ozářených zdrojem UVLUX295-HL-3 (Tabulka 7)

### Ozáření zdrojem UVLUX295-HL-3 vzorků o tloušťce 90 a 120 $\mu\text{m}$

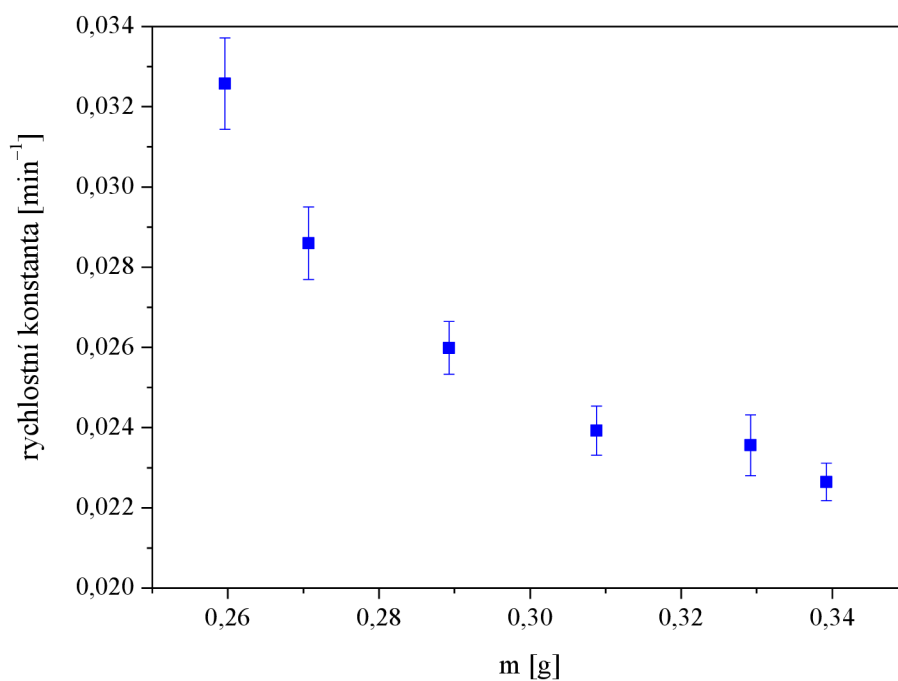


**Obrázek 22** Závislost rychlostní konstanty na přidavku roztoku kalibračního činidla F u vzorků o tloušťce 90 a 120  $\mu\text{m}$  ozářených zdrojem UVLUX295-HL-3 (**Tabulka 7**)

### Ozáření zdrojem UVLUX285-HL-3 vzorků o tloušťce 90 $\mu\text{m}$

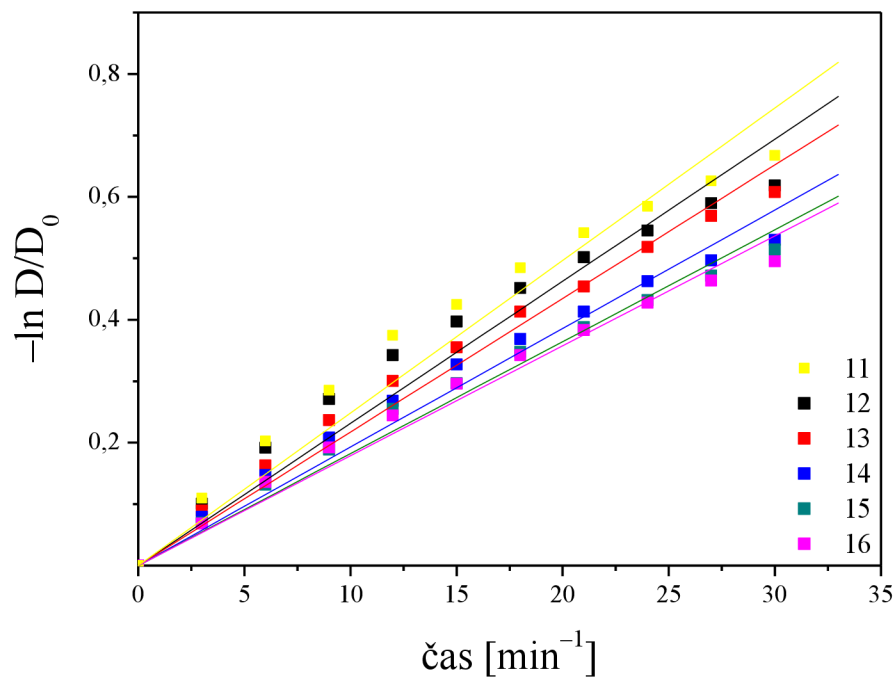


**Obrázek 23** Závislost přirozeného logaritmu  $D_{\text{rel}}$  v závislosti na čase proložená přímkou lineární regrese vzorků o tloušťce 90  $\mu\text{m}$

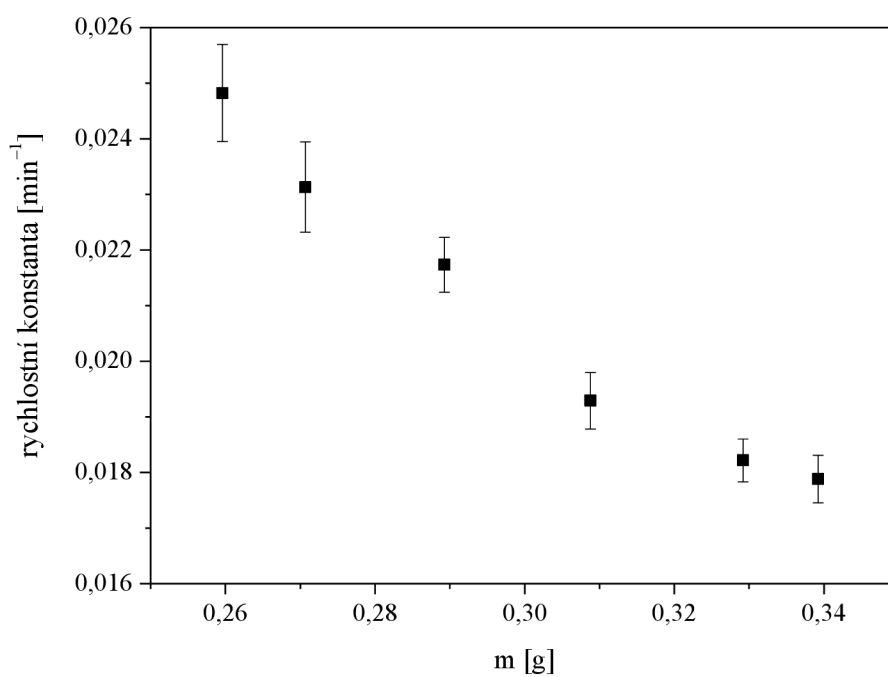


**Obrázek 24** Závislost rychlostní konstanty na přidavku roztoku kalibračního činidla F u vzorků o tloušťce 90  $\mu\text{m}$  ozářených zdrojem UVLUX285-HL-3 (**Tabulka 8**)

**Ozáření zdrojem UVLUX285-HL-3 vzorků o tloušťce 120  $\mu\text{m}$**

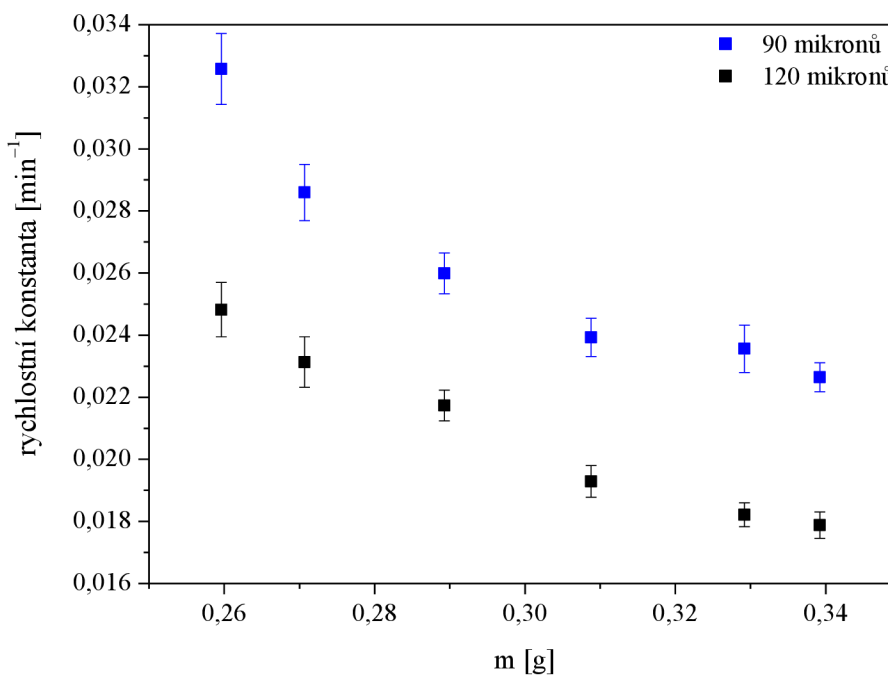


**Obrázek 25** Závislost přirozeného logaritmu  $D_{\text{rel}}$  v závislosti na čase proložená přímkou lineární regrese vzorků o tloušťce 120  $\mu\text{m}$



**Obrázek 26** Závislost rychlostní konstanty na přidavku roztoku kalibračního činidla F u vzorků o tloušťce 120 µm ozářených zdrojem UVLUX285-HL-3 (**Tabulka 8**)

### Ozáření zdrojem UVLUX295-HL-3 vzorků o tloušťce 90 a 120 µm



**Obrázek 27** Závislost rychlostní konstanty na přidavku kalibračního činidla F u vzorků o tloušťce 90 a 120 µm ozářených zdrojem UVLUX285-HL-3 (**Tabulka 8**)

## 5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo připravit UVB dozimetr a následně jej optimalizovat pro stanovenou dávku ozáření. Pro tento účel byla sestavena série kompozic a díky tomu byl vytvořen dozimetr, u kterého barvivo reaguje s produkty fotolýzy kalibračního činidla I, mění svoji strukturu a s tím souvisí jeho změna na žlutou barvu. Celá tato práce probíhala v rámci projektu, a proto byly klíčové složky všech kompozic utajené.

Připravený dozimetr obsahoval kalibrační činidlo I, kalibrační činidlo F, lak 2A, ethanol a barvivo Bromkresolovou zeleň. Finální kompozice byly naneseny na PET fólii pomocí natahovacího pravitka dle Bakera za použití automatického aplikátoru vrstev TQC, konkrétně o tloušťce 90 a 120  $\mu\text{m}$ . U takto nanesených vrstev bylo zjištěno, že velký vliv na výsledný vzhled jednotlivých kompozic má jejich sušení. Byly otestovány dva typy sušení, a to v sušárně při 100 °C po dobu 1,5 minuty pro tloušťku 90  $\mu\text{m}$  a při stejné teplotě po dobu 3 minut pro tloušťku 120  $\mu\text{m}$ . Druhým typem bylo samovolné sušení nanesených kompozic na vzduchu po dobu cca 10–15 minut. Vrstvy usušené v sušárně vytvořily matný a lepkavý povrch, kdežto vrstvy usušené samovolně na vzduchu nikoliv.

Usušené vrstvy byly ozářeny LED zdrojem, konkrétně UVLUX295-HL-3 a UVLUX285-HL-3 po dobu 30 minut. LED zdrojem UVLUX295-HL-3 nebyly exponovány všechny vzorky z důvodu nenávratného poškození zdroje. Po 3minutových intervalech byly vzorky změřeny spektrofotometrem a hodnoty byly zaznamenány v programu Excel. Z hodnot byly vypočteny rychlostní konstanty a standardní chyby.

Z vypočtených rychlostních konstant bylo zjištěno, že se rychlost reakce se zvyšujícím přídatkem roztoku kalibračního činidla F snižovala. Z rychlostních konstant je také patrné, že u tloušťky 90  $\mu\text{m}$  vychází větší rychlostní konstanty, což dokazuje, že přeměna modré barvy na žlutou probíhá rychleji než u tloušťky 120  $\mu\text{m}$ . Co se týče LED zdroje, větší rychlostní konstanty vychází u UVLUX295-HL-3, což taky potvrzuje rychlejší barevnou přeměnu, nicméně je to také způsobeno tím, že kromě posunu emisního pásu poskytuje tento zdroj o 15 % větší intenzitu ozáření. (**Tabulka 6**)

Porovnání barevných přechodů bylo možné díky  $L^*a^*b^*$  souřadnicím, kterými se vytvořila barevná škála v programu Adobe Photoshop.



## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FRASER, B., F. BUNTING a Ch. MURPHY. *Správa barev: průvodce profesionála v grafice a pre-pressu*. Brno: Computer Press, 2003. ISBN 80-722-6943-7.
2. Vše o světle - barevné modely. In: *FotoRoman* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: [http://www.fotoroman.cz/tech2/svetlo05color\\_model.htm](http://www.fotoroman.cz/tech2/svetlo05color_model.htm)
3. DOSTÁL, J. a Z. JANÁČEK, 1997. *Fyzika*. Vysoké učení technické v Brně.
4. KUCHLING, H., 1980. *Fyzika*. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry.
5. Složky elektromagnetického spektra, dostupné na: <https://www.jnjvisioncare.cz/vzdelavani/uv-poskozeni>
6. DOHNAL, Miroslav, 2003. *Fyzikální základy reprodukce obrazu*. Pardubice: Univerzita Pardubice. ISBN 80-719-4567-6.
7. KABELKOVÁ, M. *Optimalizace tiskových inkoustů pro galerijní dozimetry* [Bakalářská práce]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017.
8. NEWMAN, P. *An introduction to stratospheric ozone: Stratospheric ozone* [HTML document]. USA: NASA's Goddard Space Flight Center Atmospheric Chemistry and Dynamics Branch, 2000 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: [http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/class/Chap\\_1/index.htm](http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/class/Chap_1/index.htm)
9. TAN, K. Ch, H. S. LIM a M. Z. MAT JAFRI. Study on solar ultraviolet erythemat dose distribution over Peninsular Malaysia using Ozone Monitoring Instrument. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2017, 105-110. DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.01.001. ISSN 11109823. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1110982317300042>
10. STASIAK, M. *Vytvrzování cykloalifatických epoxidů pomocí UV záření* [Diplomová práce]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2014.
11. Výbojové světelné zdroje, dostupné na: [https://www.stavebniklub.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOJharv68jIJFJGsVn0jXBWWFCBcB3dohQA](https://www.stavebniklub.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOJharv68jIJFJGsVn0jXBWWFCBcB3dohQA)
12. BANO, Ch., N. AMIST, SUNAINA a N.B. SINGH. UV-B radiation escalate allelopathic effect of benzoic acid on *Solanum lycopersicum* L. *Scientia Horticulturae* [online]. 2017, 199-205 [cit. 2018-04-14]. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.03.052. ISSN 03044238. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423817302248>
13. JONES, R.R. OZONE DEPLETION AND CANCER RISK. *The Lancet* [online]. 1987 [cit. 2018-04-14]. DOI: 10.1016/S0140-6736(87)90972-X. ISSN 01406736. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014067368790972X>
14. *Global solar UV index: a practical guide*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2002. ISBN 92-415-9007-6.
15. DE PAULA, Leonardo R., André L. A. PARUSSULO, Koiti ARAKI a Henrique E. TOMA. Evaluation of sun protection factor of cosmetic formulations by a simple visual in vitro method mimicking the in vivo method. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2012, vol. 101, issue 2, s. 726-732. DOI: 10.1002/jps.22797. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jps.22797>

16. DIFFEY, B.L., C.T. JANSÉN, F. URBACH a H.C. WULF. The standard erythema dose: a new photobiological concept. *Photodermatology, Photoimmunology*. 1997-02-04, vol. 13, 1-2, s. 64-66. DOI: 10.1111/j.1600-0781.1997.tb00110.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0781.1997.tb00110.x>
17. ICNIRP STATEMENT—PROTECTION OF WORKERS AGAINST ULTRAVIOLET RADIATION. *Health Physics*. 2010, **99**(1), 66-87. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181d85908. ISSN 0017-9078.
18. <https://www.iarc.fr/en/publications/pdfs-online/wrk/wrk1/ArtificialUVRad&Skin4.pdf>
19. RATIONALIZING NOMENCLATURE FOR UV DOSES AND EFFECTS ON HUMANS. ISBN 978-3-902842-35-0.
20. DIFFEY, B. L. (2002): Sources and Measurement of Ultraviolet Radiation. *Methods*, 2002, roč. 28, č. 1, s. 4 – 13.
21. WHO a IARC (2006): World Meteorological Organization a International Agency for Research on Cancer: Exposure to Artificial UV Radiation and Skin Cancer, 64 s., ISBN 92-832-2441-8.
22. ŠIMA, J. *Fotochémiá: princípy a aplikácie*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-227-3440-0.
23. WARDLE, B. *Principles and applications of photochemistry*. Chichester, U.K.: Wiley, 2009. ISBN 04-700-1494-6.
24. Photoinitiators, dostupné na: [https://www.dispersions-pigments.basf.com/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1\\_556340](https://www.dispersions-pigments.basf.com/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_556340)
25. KUČERA, V. *Fotopolymerace* [Bakalárska práca]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012.
26. SCRANTON, A. B., Ch. N. BOWMAN a R. W. PEIFFER. *Photopolymerization: fundamentals and applications*. Washington, DC: American Chemical Society, 1997. ISBN 08-412-3520-1.
27. YAGCI, Y., S. JOCKUSCH a N. J. TURRO. Photoinitiated Polymerization: Advances, Challenges, and Opportunities. *Macromolecules*. 2010. DOI: 10.1021/ma1007545. ISSN 0024-9297. Dostupné také z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ma1007545>
28. KROSCWITZ, J. a H. F. MARK. *Encyclopedia of polymer science and technology*. 3rd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2004. ISBN 04-712-8780-6.
29. ELIAS, H.G. *Macromolecules*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 35-273-1172-6.
30. PAPPAS., S.P. *UV curing: science and technology*. Norwalk, Conn: Technology Marketing, 1980. ISBN 06-862-3773-0.
31. DECKER, Christian. UV-radiation curing chemistry. *Pigment & Resin Technology*; 2001

## 7 SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÝCH SYMBOLŮ

UV	ultrafialové záření
UVA	ultrafialové záření A
UVB	ultrafialové záření B
UVC	ultrafialové záření C
NUV	blízké ultrafialové záření
MUV	střední ultrafialové záření
FUV (DUV)	daleké ultrafialové záření
H Lyman- $\alpha$	vodíkové Lyman-alfa
EUV	extrémní ultrafialové
VUV	vakuové ultrafialové
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
IRA	infračervené záření A
IRB	infračervené záření B
IRC	infračervené záření C
UVI ( $I_{UV}$ )	ultrafialový index
MED	minimální erytemální dávka
SED	standardní erytemální dávka
$\lambda$	vlnová délka
$c_0$	rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu
T	perioda
$\nu$	kmitočet
$Q_e$	zářivá energie
$\Phi_e$	zářivý tok
$E_e$	ozáření
$L_e$	zář
$H_e$	dávka ozáření
$Q$	světelná energie
$\Phi$	světelný tok
$E$	osvětlení
$L$	jas

$H$	osvit
$k_{er}$	konstanta rovnající se $40 \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$
$E_e^\lambda$	sluneční spektrální ozáření
$S_{er}^\lambda$	akční spektrum erytému
$E_{eff}$	erytemální efektivní ozáření
$t$	čas
$k$	rychlostní konstanta
$A$	konstanta pro danou reakci
$E^\#$	aktivační energie
$R$	univerzální plynová konstanta
$T$	teplota
$V^\#$	aktivační objem
$k_{dif}$	maximální rychlostní konstanta
$R$	reflektance
BCG	Bromkresolová zeleň