



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

ZRYCHLENÉ TESTOVÁNÍ SVĚTLOSTÁLOSTI INTERIÉROVÝCH NÁBYTKOVÝCH POVLAKŮ

ACCELERATED TESTING OF LIGHTFASTNESS OF INDOOR FURNITURE COATINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michaela Kulhánková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1179/2017
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Michaela Kulhánková**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Spotřební chemie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Název bakalářské práce:

Zrychlené testování světlostálosti interiérových nábytkových povlaků

Zadání bakalářské práce:

1. Prostudujte relevantní literární zdroje a sestavte rešerši shrnující současný stav poznání o zrychleném testování světlostálosti polymersních materiálů
2. Ve spolupráci se zadavatelem navrhnete experiment
3. Provedte experiment zrychleného stárnutí
4. Zpracujte naměřená data a diskutujte možnosti předpovědi reálné životnosti

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.

Michaela Kulhánková
student(ka)

doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2018

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá studiem současných metod testování a hodnocení světlostálosti interiérových nátěrů. Jejich blednutí je způsobeno zejména vlivem slunečního záření. V první části jsou uvedeny základní informace potřebné k pochopení experimentu.

V druhé části byly dřevěné vzorky s různými bílými laky a nátěry podrobeny zrychlenému testování světlostálosti. Experiment byl proveden expozicí těchto vzorků xenonové výbojce přes filtr okenního skla ve sluneční komoře. Změny v barevnosti vzorků byly vyhodnoceny na základě měření odrazových spekter, ze kterých byly vypočteny kolorimetrické veličiny a následně zobrazeny v barvovém prostoru CIE 1976 $L^*a^*b^*$.

Závěr byl zaměřen na výslednou reálnou životnost vzorků, jejich vzájemné porovnání a vyhodnocení nejvhodnějších materiálů.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the study of the current methods of testing and evaluation of lightfastness of interior paints. Their fading is caused mainly by the influence of solar radiation. The first part provides the basic information needed to understand the experiment. In the second part, wood samples with various white varnishes and coatings were subjected to accelerated testing of lightfastness. The experiment was performed by exposing these samples to xenon lamp through the window glass filter in the solar chamber. Changes in the color of the samples were evaluated based on the measurement of the reflection spectra from which the colorimetric quantities were calculated and then displayed in the color space CIE 1976 $L^*a^*b^*$.

The conclusion was focused on the final real life of the samples, their mutual comparison and evaluation of the most suitable materials.

KLÍČOVÁ SLOVA

světlostálost, zrychlené stárnutí, interiérové nátěry, barvová odchylka

KEYWORDS

lightfastness, accelerated aging, interior coatings, color deviation

KULHÁNKOVÁ, M. *Zrychlené testování světlostálosti interiérových nábytkových povlaků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 34 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D..

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:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Dzikovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	TEORETICKÁ ČÁST	2
2.1	Radiometrie	2
2.1.1	Energie elektromagnetického záření	2
2.1.2	Denní světlo	4
2.1.3	Umělé laboratorní zdroje světla	5
2.2	Kolorimetrie	6
2.2.1	Trichromatické složky	7
2.2.2	Barvové prostory	8
2.2.3	Barvové odchylky a jejich hodnocení	10
2.3	Denzitometrie	10
2.4	Světlostálost polymerních materiálů	11
2.4.1	Hodnocení světlostálosti	12
2.4.2	Testování umělým urychleným ozářením	12
2.4.3	ISO 16474	13
2.4.4	Sledování změn	14
2.4.5	Přípustná změna	14
2.4.6	Přepočet na reálnou životnost	15
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	16
3.1	Použité materiály a přístrojové vybavení	16
3.1.1	Vzorky	16
3.1.2	Zařízení	16
3.1.3	Software	18
3.2	Experiment	18
3.2.1	Příprava vzorků	18
3.2.2	Ozářením vzorků	19
3.2.3	Měření spektrofotometrem	20
3.2.4	Vyhodnocování	21
3.2.5	Tvorba grafů	21
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	23
5	ZÁVĚR	30
6	LITERATURA	32
7	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	34

1 ÚVOD

V současné době je rozvoj technologií ve velkém progresu a každý se snaží vyvinout lepší materiály a další, ještě účinnější povrchové úpravy těchto materiálů. Jedním z odvětví, kde se těchto nových materiálů využívá je truhlářství. V tomto oboru už dávno nejde jen o práci se dřevem, využívají se také různá lamina, fólie, patinace, laky a nátěry.

Nejčastějším truhlářským výrobkem jsou dvířka, a to jak kuchyňská, tak mnohem využívanější nábytková. Můžeme se s nimi setkat v obývacích a dětských pokojích, koupelnách, ložnicích či domácích pracovnách a samozřejmě také v kancelářích a ordinacích. Široké využití těchto dvířek klade mnohem větší požadavky na variabilitu, protože každý prostor je jinak náročný na materiál a také jinak stylizován.

Jelikož jsou dvířka většinou na místech ozářených slunečním světlem, postupem času degradují. To může být způsobeno mnoha faktory jako je světlo, vlhkost, nebo teplota. Z tohoto důvodu se vyvíjí velké množství variant, které se mohou používat v odlišných podmínkách, aby se degradaci co nejvíce předešlo. Bohužel zabránit jí úplně nejde, a proto se provádí testy na jejichž základě se stanoví životnost nábytkových dvířek zhotovených určitou metodou za daných podmínek.

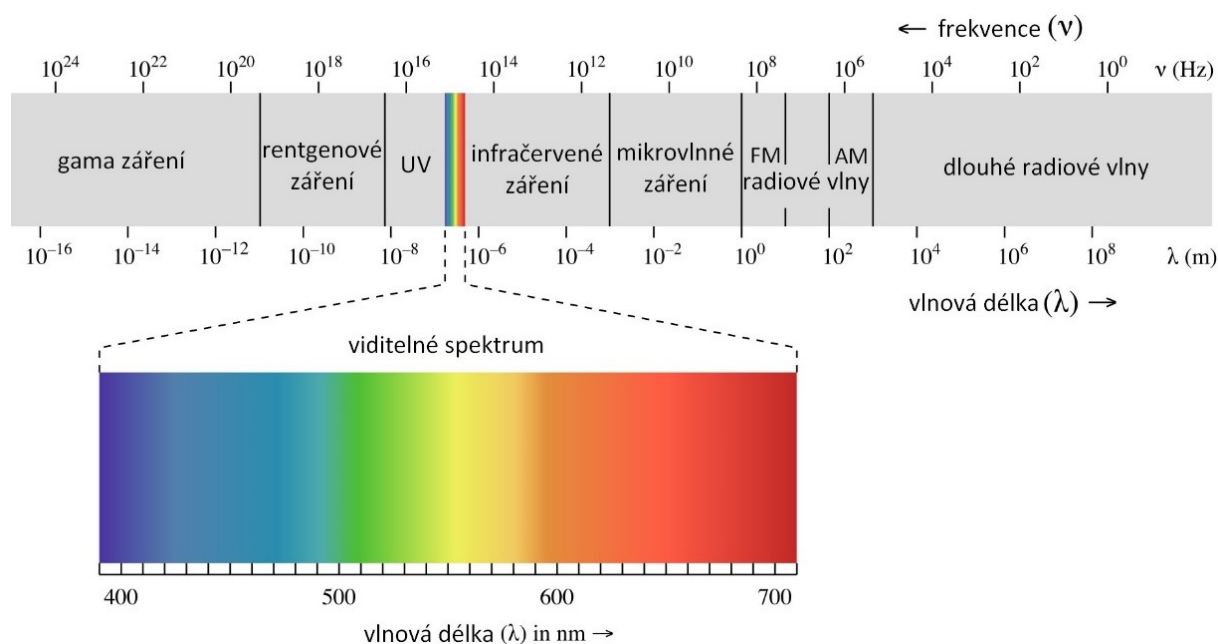
Díky tomu, že se nábytková dvířka nachází v interiéru, je sluneční záření jedním z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje degradaci, zvláště pak světlostálost. Tím, že se nacházejí uvnitř obydlí, tedy za okenním sklem, prochází skrz pouze část slunečního záření a většina škodlivého UV záření je právě sklem pohlcena.

Cílem této práce je vypracování rešerše, která zahrnuje současný stav poznání o zrychleném testování světlostálosti interiérových povrchových úprav nábytku. Součástí je také test zrychleného stárnutí, při kterém byly vzorky vystaveny intenzivnímu osvětlení xenonové výbojky přes okenní filtr a následné porovnání výsledků všech vzorků.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Radiometrie

Radiometrie zkoumá vyzařování a přenos energie elektromagnetickým zářením všech vlnových délek spektra. Popis celého elektromagnetického záření je uveden níže na *Obrázku 1*. Ve spektru elektromagnetického záření patří viditelné světlo do oblasti optického záření, které zahrnuje záření viditelné (VIS) a s ním sousedící záření ultrafialové (UV) a záření infračervené (IČ) (1) (2).



Obrázek 1: Popis elektromagnetického spektra s přiblížením viditelného spektra (21)

2.1.1 Energie elektromagnetického záření

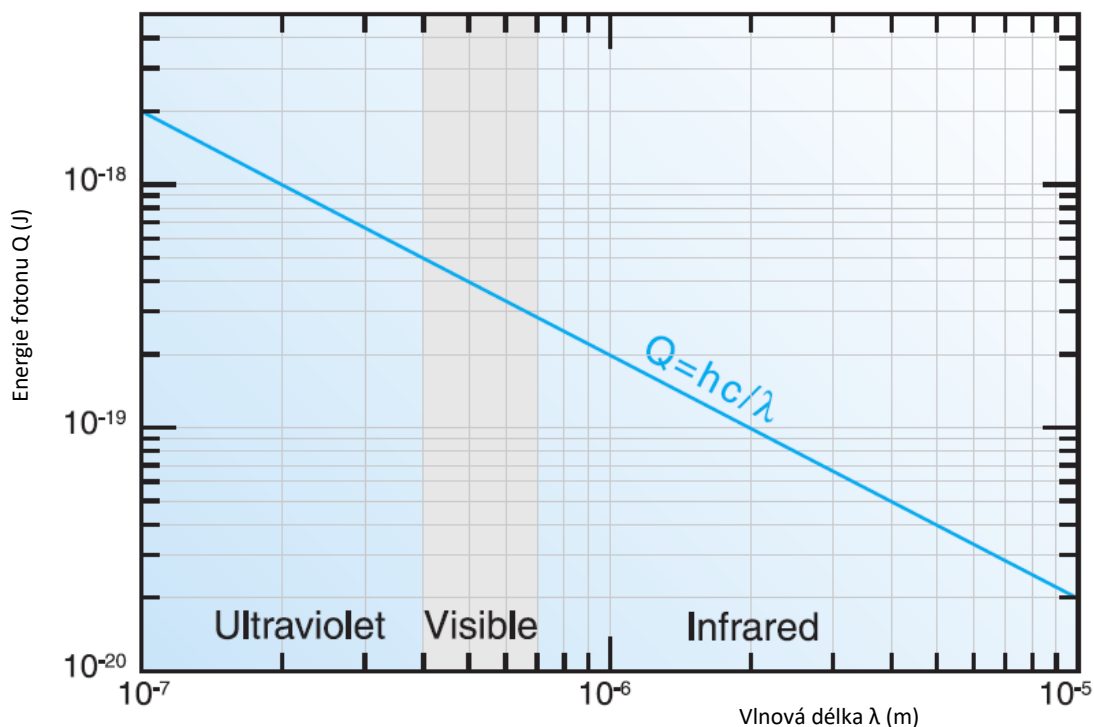
Světlo je ve své podstatě elektromagnetické záření, jež je vyzařováno a pohlcováno jako částice a šíří se jako vlny. Jedná se o tzv. korpuskulárně-vlnový dualismus záření, kde vztah mezi částicovým a vlnovým chováním je vyjádřen Planckovou rovnicí. Foton o energii Q v joulech je připisován vlně o vlnové délce λ a frekvenci f . Mezi těmito veličinami platí následující vztahy (1), (2), (3), kde h je Planckova konstanta, která má hodnotu $6,623 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ a c je rychlost světla s hodnotou $2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (1) (3).

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

$$Q = h \cdot f \quad (2)$$

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3)$$

Ze závislosti energie Q na vlnové délce λ díky nepřímé úměře vyplývá, že krátkovlnné UV záření má mnohem větší energii fotonu, než viditelné světlo nebo infračervené záření viz *Obrázek 2* (3).



Obrázek 2: Závislost energie fotonu Q na vlnové délce λ (3)

Světlo je tedy elektromagnetické záření, schopné vybudit zrakový vjem a zhodnocené měřítky lidského zraku. Touto oblastí spektra se zabývá fotometrie. Ultrafialové a infračervené záření má z fyzikálního hlediska obdobné vlastnosti jako záření viditelné, zrak je však není schopen vnímat. Světlo i jakékoliv elektromagnetické záření, lze popsat také radiometrickými energetickými veličinami a pojmy bez ohledu na zrakový aparát člověka. Souhrn základních radiometrických a fotometrických veličin je uveden v *Tabulce 1* (1) (3).

Ultrafialové záření má nižší vlnové délky než viditelné světlo, a proto vykazuje více kvantových vlastností. Dělí se na tři základní typy UV-A (315–400 nm), UV-B (280–315 nm) a UV-C (100–280 nm). UV-A je nejčastější a nejméně škodlivé UV záření díky jeho nejnižší energii, a tedy i největší vlnové délce. Ve viditelné oblasti způsobuje emisi fluoreskujících materiálů. UV-B je pro lidský organismus nejškodlivější, protože má dostatek energie k poškození biologických tkání a způsobuje rakovinu kůže. Před mimozemskou UV-B nás chrání ozónová vrstva v atmosféře. Krátkovlnné UV-C záření má největší energii a reaguje s kyslíkem za vzniku ozónu (1) (3).

Tabulka 1: Souhrn základních radiometrických a fotometrických veličin a jejich jednotek (1), (2)

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
Zářivá energie	J	Světelná energie	$\text{lm} \cdot \text{s}$
Zářivý tok	W	Světelný tok	lm
Intenzita ozáření	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Osvětlení	lx
Zář	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Jas	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
Dávka ozáření	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	Osvit	$\text{lx} \cdot \text{s}$

Intenzita ozáření je plošná hustota zářivého toku dopadlého na plošný prvek o určité velikosti. Značí se E a jednotkou je $W \cdot m^{-2}$.

Intenzita osvětlení neboli osvětlenost je podíl světelného toku, který dopadá na element této plochy obsahující daný bod a velikosti tohoto plošného elementu. Jednotkou je lux a znamená intenzitu osvětlení světelným tokem jednoho lumenu rovnoměrně rozděleným na plochu $1 m^2$. Z toho plyne, že $1 lx = 1 lm \cdot m^{-2}$.

Dávka ozáření je zářivá energie procházející určitou plochou. Značí se H a její jednotkou je $J \cdot m^{-2}$ (1) (3) (4).

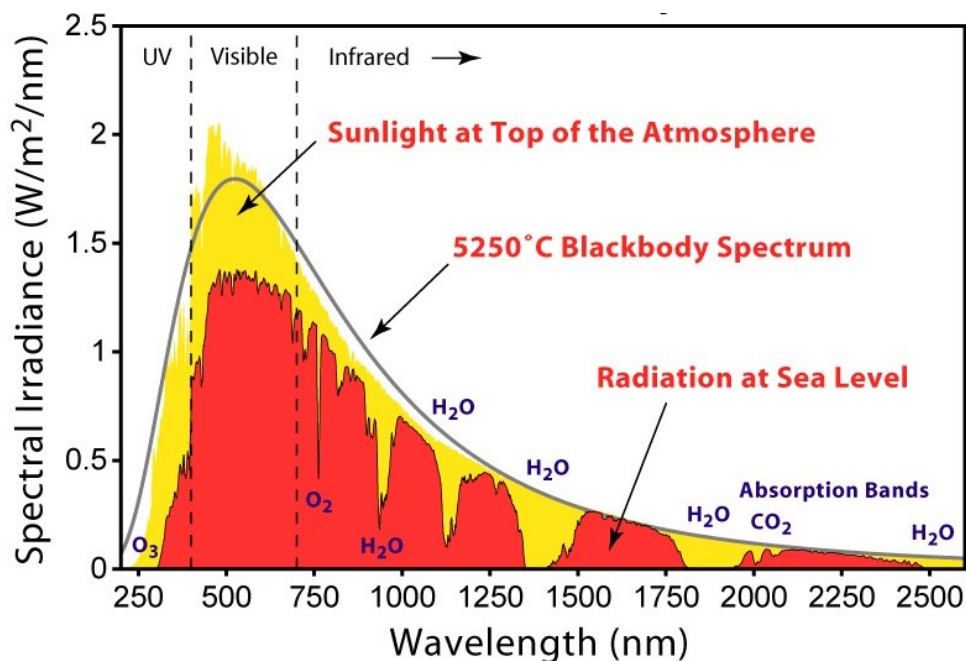
2.1.2 Denní světlo

Denní světlo obsahuje vždy určitý podíl ultrafialového a infračerveného záření. Asi polovina slunečního záření je vyzařována v infračervené oblasti spektra, přibližně 40 % ve viditelné oblasti a kolem 10 % v ultrafialové a rentgenové oblasti spektra.

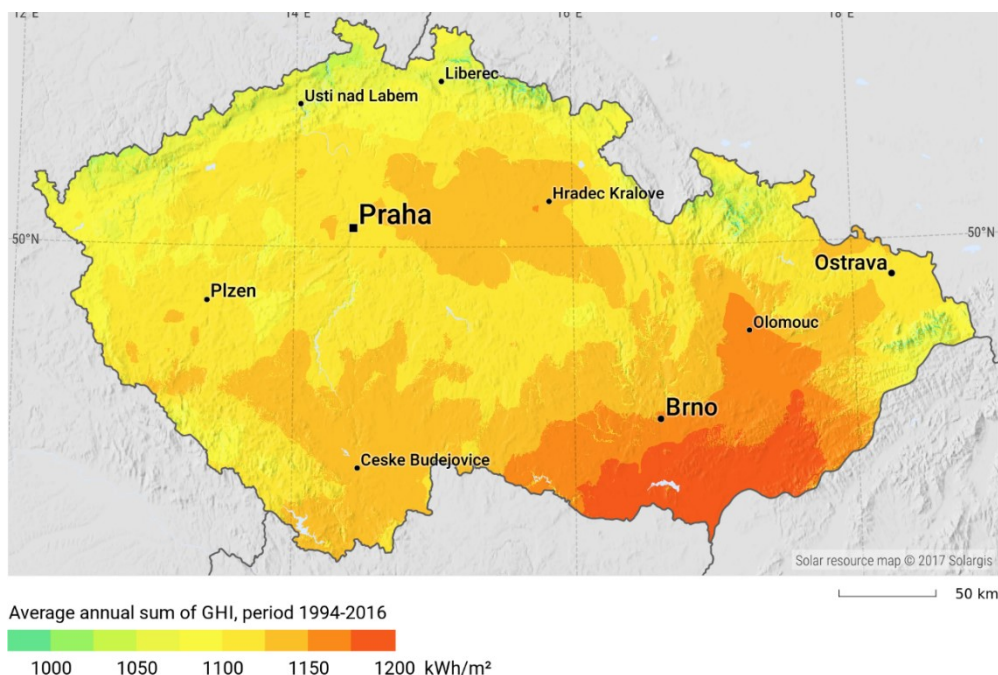
Množství energie záření ze Slunce, které dopadá na jednotku plochy roviny kolmé ke slunečním paprskům (měřené mimo zemskou atmosféru) se nazývá solární konstanta. Její hodnota je přibližně $1370 W \cdot m^{-2}$. Vlivem změny vzdálenosti Země od Slunce během roku se mění i její hodnota (intenzita ozáření) od $1320 W \cdot m^{-2}$ do $1410 W \cdot m^{-2}$ (1).

Slunečního záření je z části pohlceno atmosférou, týká se to hlavně UV záření o vlnových délkách menších než $0,3 \mu m$ a některých vlnových délkách IR záření (viz *Obrázek 3*). Na zemský povrch proto dopadá maximálně asi $1100 W \cdot m^{-2}$ (1).

Spektrální složení a intenzita slunečního záření závisí na výšce Slunce nad obzorem, na obsahu aerosolových částic, ozónu a vodní páry ve vzduchu. Značně se mění se zeměpisnou šířkou a typem klimatu jako na *Obrázku 4*. Na tomto obrázku je znázorněno globální sluneční záření, což je součet přímého a rozptýleného (difúzního) slunečního záření vztahovaný na jednotku horizontální plochy (1).



Obrázek 3: Spektrum slunečního záření na zemském povrchu (červená oblast) a nad atmosférou (navíc žlutá oblast) (23)



Obrázek 4: Průměrný roční součet globálního slunečního záření (22)

Při zjišťování fotochemického účinku optického záření je kladen důraz na použití laboratorního zdroje, jež zejména v UV oblasti, která výsledek nejvíce ovlivňuje, co nejlépe odpovídá spektrálnímu složení slunečního záření. To je zřejmé už z *Obrázku 2 (1) (4)*.

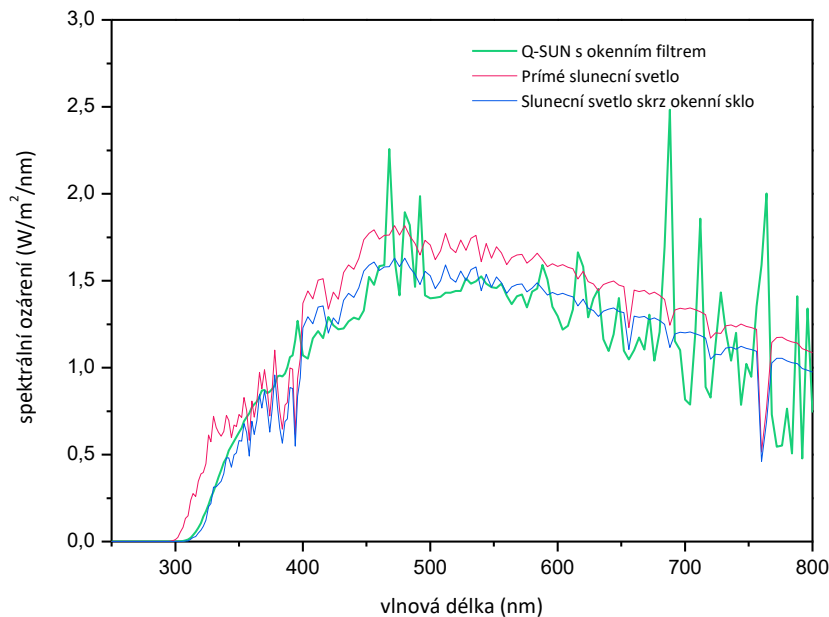
V tomto případě, kdy se zjišťuje fotochemický účinek optického záření v interiéru, je vliv UV záření menší, protože okenní sklo nejkratší UV záření odfiltruje a propustí až vlnové délky nad 310 nm oproti původním 295 nm (viz *Obrázek 5*). Pouze 8 % z celkového ozáření je v oblasti UV (300-400 nm), 26 % v modré (400-500 nm), 31 % v zelené (500-600 nm) a 35 % v červené (600-700 nm). Sklo, které je špinavé, tlusté, tónované, laminované nebo dvojité, má ještě menší propustnost UV záření (1) (5).

2.1.3 Umělé laboratorní zdroje světla

Za světelný zdroj se považuje takové zařízení, jež vysílá viditelné záření. Zdroj umělého světla přeměňuje určitý druh energie na světlo. Všechny současné zdroje světla kromě viditelného záření emitují ve větší či menší míře i záření ultrafialové a infračervené. V oblasti osvětlování mají největší význam elektrické světelné zdroje. Podle vzniku světla se elektrické světelné zdroje dělí na zdroje teplotní a výbojové (1).

Typickým představitelem teplotních zdrojů světla jsou všechny druhy žárovek i sluneční světlo. Jejich charakteristickým znakem je spojitě spektrum. Ve výbojových světelných zdrojích se využívá elektrického výboje v plynech a parách různých kovů. Patří mezi ně sodíkové, xenonové, rtuťové a halogenidové výbojky. Charakteristickým znakem těchto světelných zdrojů je čárové (nespojité) spektrum (1).

Spektru slunečního záření se nejvíce podobají xenonové výbojky, což lze pozorovat i na *Obrázku 5*. Tyto xenonové obloukové lampy sestávají ze skleněné trubice naplněné xenonem, ve které je mezi dvěma elektrodami vytvořen elektrický výboj. Vzhledem k tomu, že vytváří přebytek UV záření s velmi krátkou vlnovou délkou, je nutné použít speciální filtry pro jeho modifikaci a vytvoření požadovaného spektra. Xenonový oblouk, je-li řádně filtrován, poskytuje velmi dobrou simulaci slunečního světla v interiéru a simuluje všechny poškozující vlnové délky, včetně UV, viditelného světla a infračerveného záření. V důsledku toho několik průmyslových odvětví standardizovalo na xenonovém oblouku testování světlostlosti výrobků v interiéru (1) (5).



Obrázek 5: Spektrum slunečního záření a slunečního záření skrz okenní sklo (podle normy ASTM G177) a spektrum xenonové výbojky filtrované okenním filtrem (od firmy Q-SUN použité při experimentu) (5)

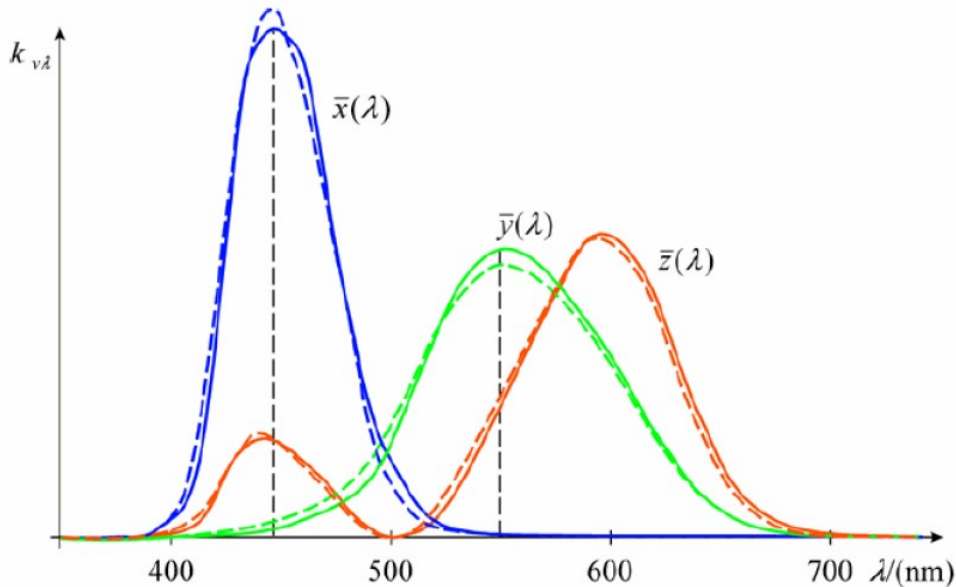
2.2 Kolorimetrie

Kolorimetrie je věda zabývající se objektivním popisem barvy. Vjem barvy je podmíněn spektrálním složením záření zdroje světla, spektrálním činitelem odrazu či prostupu pozorovaného předmětu a výsledný vjem vzniká v pozorovateli. Pokud se změní kterýkoliv z těchto tří aspektů, pak se změní i výsledný vjem. O světle už bylo napsáno v podkapitole 2.1, tato část bakalářské práce se zabývá barevným předmětem a výsledným vjemem (4) (6).

O rozvoj a standardizaci kolorimetrie se stará instituce CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), která definovala standardní kolorimetrické pozorovatele (2°, 10°), chromatické diagramy (CIE Yxy, CIE u'v'), barvové prostory (CIE LAB, CIE XYZ) a vlastnosti standardních zdrojů světla (např. D65, D55) (7).

K objektivnímu popisu barev je nutné znát základní tři atributy barev, a to jsou odstín, sytost a jas. Odstín neboli barevný tón je určován jeho dominantní vlnovou délkou (odlišení jedné barvy od druhé). Sytost (brilantnost) vyjadřuje rozdíl mezi vjemem dané chromatické barvy a achromatické šedé barvy o stejné světlosti. Poslední složkou je měrná světlost a ta udává relativní jas barvy (8).

Hodnocení je prováděno tzv. standardním pozorovatelem, který posuzuje, kdy nastane stejný vjem (metamerie) při srovnávání obrazu analyzovaného a obrazu složeného zpravidla ze tří barevných složek. Rozeznáváme dva typy pozorovatelů (viz *Obrázek 6*), které rozlišujeme podle úhlu vstupu paprsků do oka. Standardní 2° pozorovatel (se využívá pro většinu kolorimetrických měření a výpočtů, které se vztahují k obrazovému a grafickému zobrazování. Doplnkový 10° pozorovatel, se využívá pro kolorimetrické výpočty a měření vztahující se na velké oblasti barev (7) (9).



Obrázek 6: Spektrální charakteristika standardního 2° pozorovatele (plná čára) a 10° pozorovatele (přerušovaná čára) (7)

2.2.1 Trichromatické složky

Každou barvu lze charakterizovat pomocí určitých hodnot tří měrných podnětů X, Y, Z kolorimetrické soustavy. Tato množství měrných podnětů se nazývají trichromatické složky. Počítají se pomocí funkcí standardního 2° pozorovatele CIE 1931 (\bar{x} , \bar{y} , \bar{z}), nebo doplnkového 10° pozorovatele CIE 1964 (\bar{x}_{10} , \bar{y}_{10} , \bar{z}_{10}) podle vztahů (4), (5) a (6), kde $S(\lambda)$ je spektrální distribuce osvětlení, $R(\lambda)$ je spektrální reflektance objektu, \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} jsou funkce trichromatických členitelů a k je normalizační konstanta určená vztahem (7), která se volí tak, aby se hodnota Y rovnala 100 pro absolutně bílé (nebo absolutně průzračné) těleso.

$$X = k \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda) \quad (4)$$

$$Y = k \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda) \quad (5)$$

$$Z = k \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda) \quad (6)$$

$$k = \frac{100}{\sum S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)} \quad (7)$$

Tyto trichromatické složky X , Y a Z definují polohu barvy v trojrozměrném prostoru CIE XYZ, ale častěji se využívá rovinný řez tímto prostorem (diagram chromatičnosti na *Obrázku 7*). Z těchto trichromatických složek lze pomocí příslušných vztahů (8), (9) a (10) vypočítat trichromatické souřadnice x, y, z . Mezi trichromatickými souřadnicemi platí vztah (11) uvedený níže (10).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (8)$$

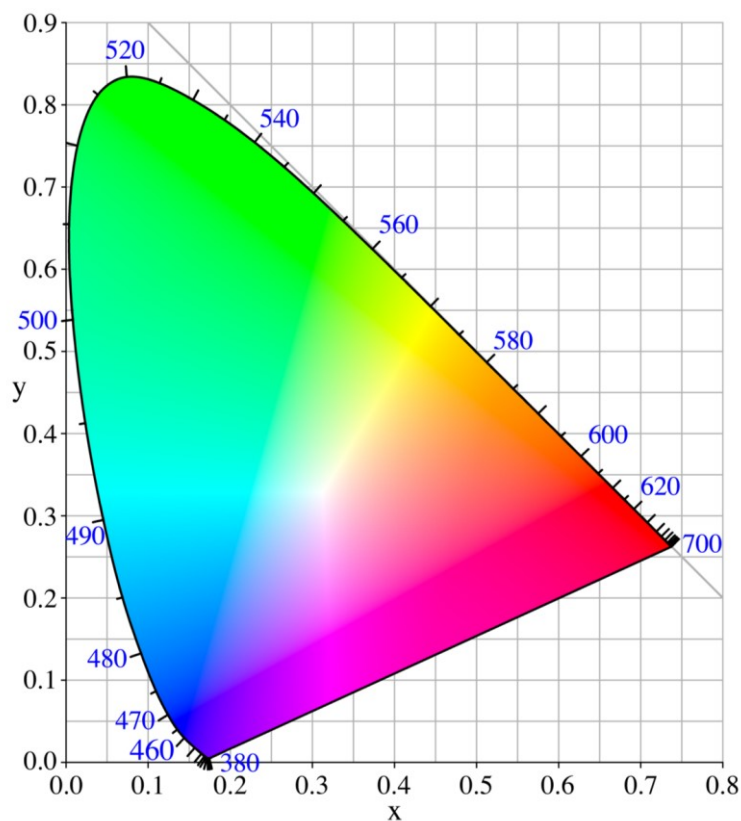
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (9)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (10)$$

$$x + y + z = 1 \quad (11)$$

2.2.2 Barvé prostory

Barvu lze tedy chápat jako bod v trojrozměrném prostoru. Základním barvovým prostorem je CIE XYZ, z něhož byl odvozen plošný diagram chromatičnosti CIE x, y , nazývaný někdy také kolorimetrický trojúhelník (viz *Obrázek 7*). Obvod tohoto trojúhelníku odpovídá škále



Obrázek 7: Diagram chromatičnosti CIE x, y (20)

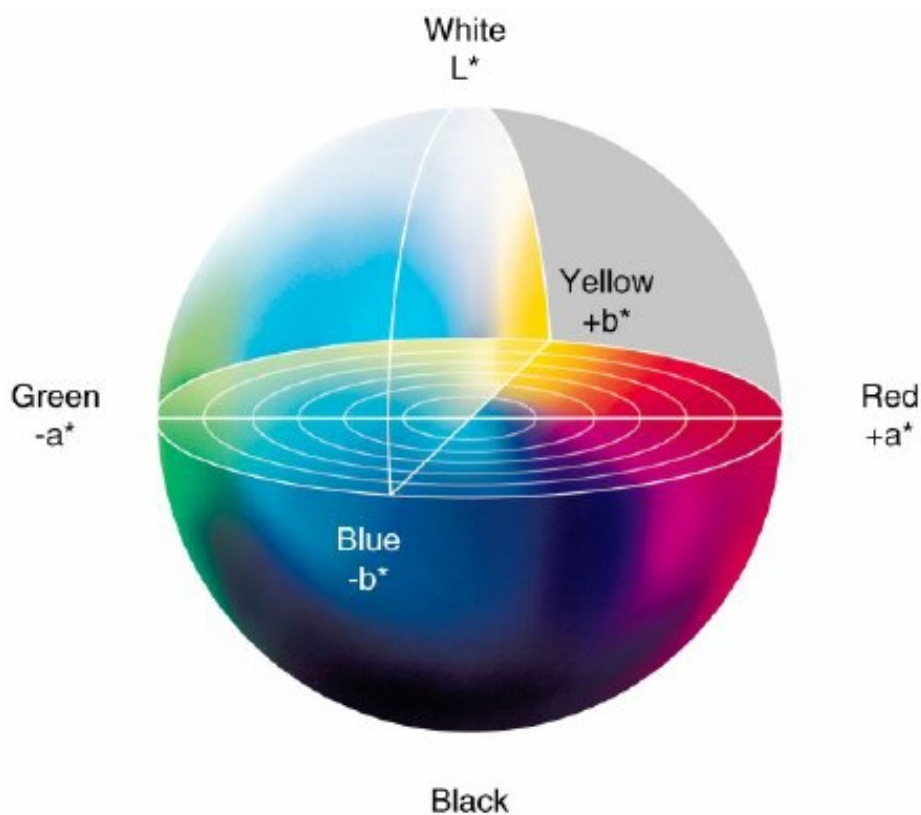
spektrálních barev viditelného světla. Na obvodu trojúhelníka se nacházejí syté barevné tóny, sytost barvy se snižuje směrem k jeho středu. Barvy se stejným odstínem leží na přímkě spojující bod na obvodu trojúhelníka a bod odpovídající bílé barvě. Tento barvový prostor však není vhodný pro vyjadřování barvových odchylek, protože vzdálenost dvou bodů neodpovídá změně odstínu (neuniformita) (6) (11).

Proto v roce 1976 CIE vytvořila další standardní barevné prostory z nichž nejvíce používaný je model $L^*a^*b^*$ (Obrázek 8). Tento prostor má pravouhlý souřadnicový systém, který je vymezen třemi osami (osa měrné světlosti L^* , chromatická osa zeleno-červená a^* a chromatická osa modro-žlutá b^*), které dohromady jednoznačně určují odstín, sytost i měrnou světlost dané barvy. K výpočtu těchto souřadnic podle vztahů (12), (13) a (14) jsou zapotřebí trichromatické složky X_n a Z_n (Y_n má vždy hodnotu 100), které se mění v závislosti na typu pozorovatele a druhu použitého osvětlení (4) (11).

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (12)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (13)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (14)$$



Obrázek 8: Barvový prostor CIE 1976 $L^*a^*b^*$ (12)

2.2.3 Barvé odchyly a jejich hodnocení

Při vyhodnocování rozdílů mezi dvěma barvami má zásadní vliv barvová odchylna ΔE^*_{ab} , která lze jednoduše vypočítat ze vztahu (15). Je to geometrická vzdálenost dvou bodů v trojrozměrném prostoru. Pro lepší orientaci byla stanovena stupnice udávající stupeň neshody dvou barev (viz *Tabulka 2*) a stupnice hodnocení barvových odchylek jednotlivých složek (viz *Tabulka 3*).

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (15)$$

Tabulka 2: Stupnice hodnocení barvové odchyly (7)

ΔE^*_{ab}	rozdíl
0,0 až 0,2	nepostřehnutelný
0,2 až 1,0	postřehnutelný
1,0 až 2,0	rozeznatelný
2,0 až 4,0	ještě nerušící
4,0 až 8,0	mírně rušící
větší než 8,0	rušící

Tabulka 3: Stupnice hodnocení barvové odchyly jednotlivých složek (13)

barvové odchyly jednotlivých složek	rozdíl
$\Delta L^* > 0$	vzorek je světlejší (a naopak tmavší)
$\Delta a^* > 0$	vzorek je červenější (a naopak zelenější)
$\Delta b^* > 0$	vzorek je žlutější (a naopak modřejší)

2.3 Denzitometrie

Barva vzniká pouze jako vjem v mysli pozorovatele a její měření je prakticky nemožné. Proto se měří vstupní stimul neboli světlo vstupující do oka pozorovatele, které vytváří vjem určité barvy (6).

Denzitometrie je metoda, která slouží k měření optické hustoty. Denzita je míra s jakou materiál absorbuje světlo v určitém rozsahu vlnových délek. Při měření se používají filtry, jejichž barva odpovídá barvě měřeného materiálu (do detektoru dopadá neutrální šedé světlo). Platí, že čím více světla materiál absorbuje, tím je jeho hustota větší. Kvůli nelineární logaritmické reakci lidského oka na intenzitu světla se pro snazší výpočet denzity z naměřených hodnot používá logaritmická funkce viz rovnice (17) a (19).

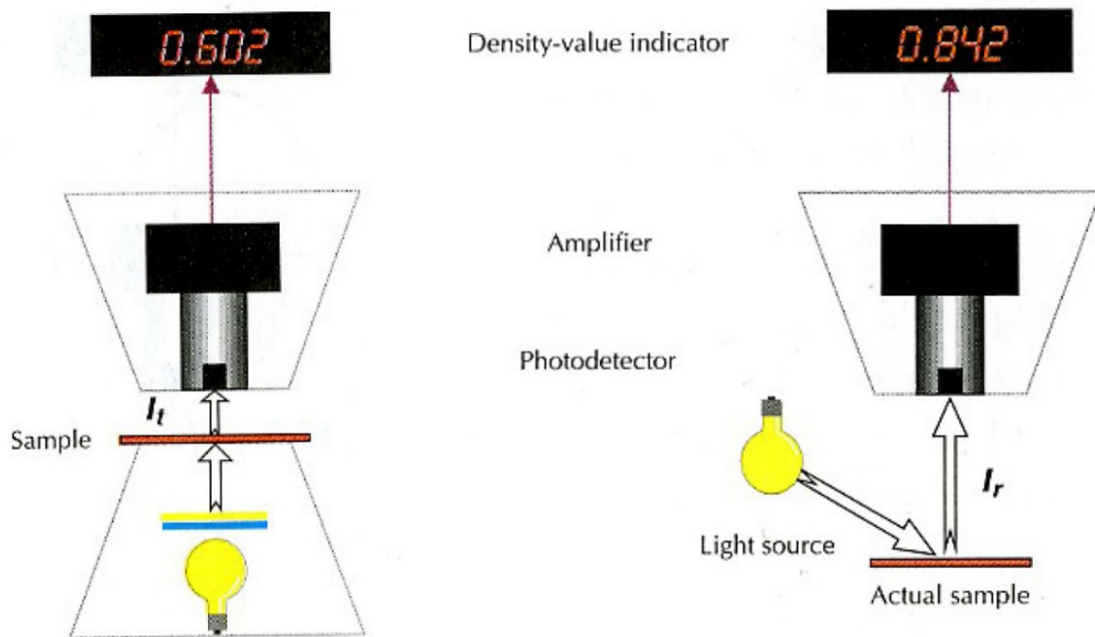
Přístroje na měření optické hustoty se nazývají denzitometry a neměří přímo optickou hustotu, ale zjišťují poměr intenzity prošlého nebo odraženého světla I_t (I_r) a intenzitu dopadajícího světla I_0 . Tento poměr (viz rovnice (16) a (18)) se nazývá odrazivost (R) či propustnost (T), což závisí na tom, zda přístroj měří odrazivé nebo propustné povrchy. Přístroje vyzařují světlo s přesně definovanou spektrální charakteristikou na povrch objektu a následně pomocí detektorů měří světlo, které bylo povrchem odraženo nebo jím prošlo. Existují dva druhy fungující na odlišných principech. Propustné vzorky se měří na transmisním denzitometru, kde se měří množství prošlého světla. Vzorky, které světlo nepropouštějí se měří na reflexním denzitometru a zjišťuje se kolik světla se odrazilo. Porovnání obou typů přístrojů lze vidět na *Obrázku 9* (6).

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (16)$$

$$D = \log\left(\frac{1}{T}\right) = -\log T \quad (17)$$

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (18)$$

$$D = \log\left(\frac{1}{R}\right) = -\log R \quad (19)$$



Obrázek 9: Porovnání transmisního (vlevo) a reflexního denzitometru (vpravo) (9)

2.4 Světlostálost polymerních materiálů

Většina materiálů podléhá rozkladu, což se opticky projeví jako degradace. Toto znehodnocení materiálu většinou probíhá následkem několika mechanismů (vzduch, vlhkost, teplota, nečistoty, různá chemická struktura barviva i substrátu, intenzita a spektrální složení dopadajícího světla), které mohou probíhat zároveň nebo se v rychlosti degradace vzájemně ovlivňovat. Při zkoumání pouze světelného účinku na materiál vzorku se tato vlastnost nazývá světlostálost (1) (14).

Při absorpci fotonu polymerem dochází k excitaci elektronu (pokud je absorbované energetické kvantum větší nebo alespoň stejné jako disociační energie vazeb), čímž foton iniciuje fotochemickou reakci. Je to proces, při kterém molekuly podléhají chemické změně jejíž aktivační energie je odvozena od absorpce fotonu. Pokud objekt není zcela odolný k působení světla, každá srážka s fotonem vyvolá s určitou pravděpodobností trvalou změnu. Sama fotochemická reakce organických materiálů je velmi složitá. Většinou tato reakce zahajuje první stupeň řetězových chemických změn, kde rychlosti následujících stupňů mohou být významně ovlivněny jinými vlivy jako je působení kyslíku, teploty, vlhkosti a atmosférických polutantů (14) (15).

Chemické změny způsobené fotochemickou reakcí mohou vyvolat u většiny pigmentů a barviv vyblednutí či zežloutnutí, u jiných naopak tmavnutí nebo změnu barvy a ztrátu mechanických vlastností (zkřehnutí, praskliny). Je to spojeno se štěpením vláken, křehnutím polymerů a vznikem prasklin na jejich površích. Tyto vlivy mají za následek pokles pevnosti, tažnosti a houževnatosti (1).

Pro snížení nežádoucích účinků slunečního záření na polymerní materiály bylo vyvinuto několik metod od záměrné strukturní modifikace barviv až po použití různých ochranných prostředků. Byla navržena řada aditiv, které mohou být použity buď před, během nebo po procesu barvení nebo mohou být včleněny do polymeru při výrobě. Takové přísady mohou chránit barvivo, polymerní substrát nebo ideálně obojí. Celkový rozsah ochrany polymeru vhodnou přísadou je samozřejmě ovlivněn rychlostí fyzikální a chemické ztráty přísady během životnosti materiálu (15).

Když je materiál vystaven přímému slunečnímu záření, je působením UV záření vyvoláno těžké poškození, protože fotony UV záření mají dostatečnou energii pro degradační pochody. V případě objektů umístěných v interiéru je spektrum slunečního světla většinou filtrováno okenním sklem, což má za následek snížení intenzity UV záření (16).

2.4.1 Hodnocení světlostálosti

Povlaky z nátěrových hmot se často využívají ve vnitřním prostředí, kde bývají dlouhodobě vystaveny slunečnímu záření filtrovanému přes okenní sklo. Je tedy velmi důležité stanovit účinky tohoto zeslabeného slunečního záření na barevný odstín a jiné vlastnosti polymerů v interiérech (17).

Často však bývá nezbytné stanovit účinky světla, tepla a vlhkosti na fyzikální, chemické a optické vlastnosti nátěrů rychleji než dlouhodobou expozicí na slunci. V dnešní době se k hodnocení světlostálosti využívá několika standardních postupů a hlavně ISO norem, které se zabývají testováním barev a laků.

V těchto standardech jsou udány informace o podmínkách testování, následném vyhodnocení a konečných kritériích. V této práci byla nejvíce uplatňována ISO norma 16474 z roku 2013, která se zabývá metodami vystavení vzorků laboratorním zdrojům světla konkrétně xenonovým lampám (17).

2.4.2 Testování umělým urychleným ozářením

Rychlejších výsledků světlostálosti daného materiálu lze dosáhnout pomocí umělého urychleného ozářením, při kterém se používají specifické laboratorní zdroje světla s vyšší intenzitou a vzorky jsou vystaveny poměrně malým změnám teploty a vlhkosti. Jejich účelem je urychlit degradaci polymerů a poruchy výrobku. Jen těžce lze porovnávat výsledky dosažené umělým urychleným ozářením s výsledky dosaženými v reálných podmínkách, protože oba typy expozice jsou proměnlivé a nelze určit jednotnou laboratorní zkoušku, která by byla úplnou simulací podmínek skutečného použití (17).

Při těchto testech je důležité dbát na správné upevnění a následné přemísťování vzorků, správnou teplotu černého standardu i vzduchu, intenzitu ozářením, pásmo vlnových délek,

ve kterých bylo měřeno, správně kalibrovaný zdroj ozáření a také je nutné použít správné metody z příslušné normy a vhodné filtry (17).

2.4.3 ISO 16474

Tato norma řeší metody vystavení nátěrových hmot laboratorním zdrojům světla. Tyto testovací postupy se dělí podle použitého typu osvětlení. Konkrétně jsou zde uvedeny postupy pro xenonové lampy, fluorescenční UV lampy a uhlíkové obloukové lampy s otevřeným plamenem.

V tomto standardu jsou také popsány faktory snižující stupeň korelace mezi expozicemi umělým urychlených ozáření a expozicemi skutečnému slunečnímu záření. Je to zejména odlišné spektrální složení zdroje světla (především kratší vlnové délky), jeho abnormálně vysoká intenzita záření, kontinuální expozice bez fází tmy a mimořádně vysoké teploty při testování (17).

Laboratorní zařízení vhodné pro urychlené stárnutí vzorků musí mít minimálně jednu xenonovou lampu s křemenným opláštěním a s filtry odstraňujícími krátkovlnné UV záření. Musí také splňovat rozdělení spektrální intenzity záření podle *Tabulky 4*, dále je nutné, aby obsahoval snímací zařízení na místě s rovnoměrným ozářením ze zdroje, regulaci teploty a kalibrovaný snímač teploty s černým povrchem (teploměr černého standardu nebo teploměr černého panelu). Tato černá destička nesmí až do 2 500 nm odrážet více než 10 % dopadajícího světelného toku. Kromě toho by měl každý takový přístroj umožňovat naprogramování fází s osvětlením a bez osvětlení (fáze osvětlení a fáze tmy). Pro kalibraci takového zařízení je nutné použít pouze radiometr vyhovující ISO 9370, jenž musí být ozařován stejně jako povrch vzorku. Ke všem těmto parametrům jsou v tomto předpisu udány maximální přípustné odchylky, do kterých by se přístroj měl vejít. Všechny tyto podmínky a nařízení splňuje Sluneční komora Q-Sun Xenon Test Chamber Model Xe-1-B/S použitá při experimentu níže (17).

Tabulka 4: Rozdělení spektrální intenzity záření xenonových lamp s filtry okenního skla (17)

Pásmo vlnových délek (nm)	Přípustné složení (%)
$\lambda < 300$	0 – 0,29
$300 \leq \lambda \leq 320$	0,1 – 2,8
$320 \leq \lambda \leq 360$	23,8 – 35,5
$360 \leq \lambda \leq 400$	62,4 – 76,2

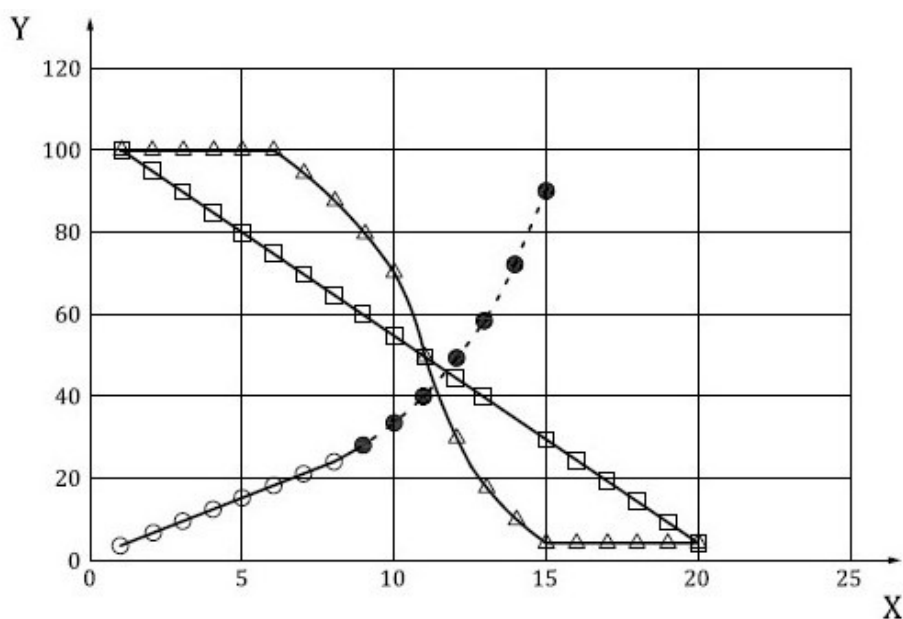
Příprava vzorků pro testování by měla probíhat stejně jako při skutečných aplikacích (stejný způsob nanesení a sušení nátěru, stejný podklad). V průběhu zkoušky je důležité zabránit dotyku exponovaného povrchu a jakýmkoli jeho změnám a periodicky měnit polohu vzorků.

Pro ukončení testování lze zvolit určenou dobu, dávku ozáření nebo předem definovanou změnu vlastností materiálu. V posledním případě je nutné vzorky v průběhu zkoušky pravidelně vyjímat a kontrolovat a koncový bod stanovit vynesáním křivky stárnutí jako například na *Obrázku 10* (17).

Všechny tyto úkony, nastavení a parametry musí být uvedeny v závěrečném protokolu o experimentu.

2.4.4 Sledování změn

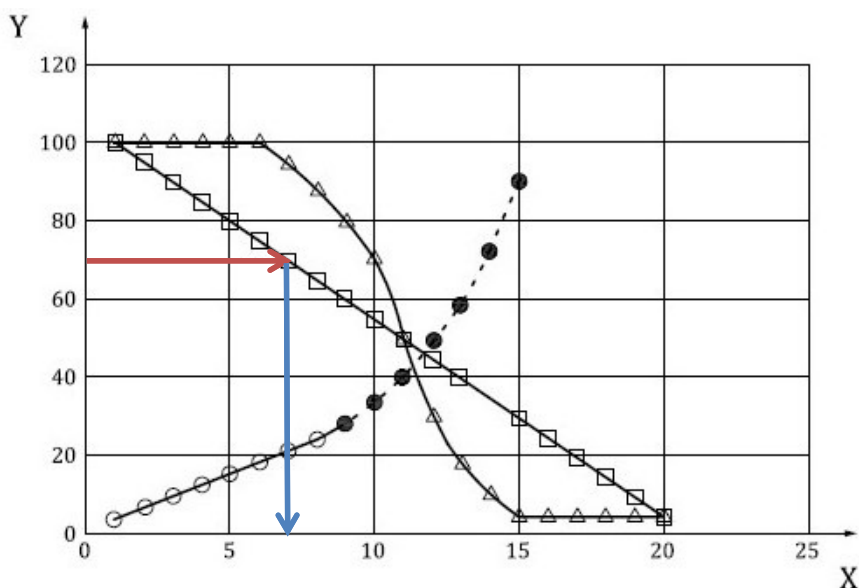
Světlostálost lze sledovat a vyhodnotit více způsoby, a to buď určením barvových souřadnic $L^*a^*b^*$ (kolorimetrie), ze změny optické hustoty (denzitometrie), nebo ze změny objemu barvého gamutu vzorku (CMS Color Management System). Všechny analýzy jsou neinvazivní metody. Měření probíhá průběžně po každém cyklu expozice po dostatečně dlouhou dobu (Obrázek 10) (14) (18).



Obrázek 10: Typický průběh závislosti hodnocené vlastnosti materiálu při expozici (osa y) na dávce ozáření nebo době expozice (osa x) pro různé typy materiálů. Některé vykazují lineární změnu (čtverečky), jiné mají počáteční období před začátkem změn vlastností (trojúhelníčky), a další mají období lineární změny (prázdné kružky) následované obdobím nelineární změny (plné kružky). (17)

2.4.5 Přípustná změna

Podle ISO normy 18 909 se experiment provádí, dokud se sledovaná vlastnost nezmění o 30 %, jak je uvedeno na Obrázku 11. Na tomto obrázku je znázorněno, jak postupovat v experimentu s materiálem, který vykazoval lineární změnu svých vlastností v závislosti na ose x. Červenou šipkou je vyznačené místo, kde sledovaná vlastnost zhoršila svoji kvalitu na 70 % a modrou šipkou je zakresleno za jakou dobu nebo dávku ozáření tato změna nastala (v tomto případě asi na hodnotě 7). Poté je možné testování ukončit. Tato mez přípustnosti změny určité vlastnosti se někdy označuje také jako konečné kritérium. Následně je možné z dávky, které byl materiál vystaven vypočítat jeho předpokládanou životnost (14) (18) (19).



Obrázek 11: Znárodnění postupu v experimentu s materiálem, který vykazoval lineární změnu svých vlastností v závislosti na ose x. Pokles kvality o 30 % (červená šipka), nastal v tomto testování po 7 časových jednotkách nebo při ekvivalentní dávce (modrá šipka) (17)

2.4.6 Přepoččet na reálnou životnost

Nutností pro další postup je získat dávku ozáření. Je to důležitý údaj pro přepoččet z naměřených dat na reálnou životnost. Je nutné, aby zde platil zákon reciprocit, který říká, že u osvětlení s vysokou intenzitou za krátký čas bude degradace vzorků stejná jako v případě normálního osvětlení za delší dobu.

Dávka ozáření se značí H a její základní jednotky jsou $J \cdot m^{-2}$. Je to plošná hustota zářivé energie, která dopadla na danou plochu v časovém intervalu od $t_0 = 0$ do t . Vypočítá se (podle rovnice 20) jako součin intenzity ozáření při zvolené vlnové délce a doby ozáření.

$$H = \int_0^t E dt \quad (20)$$

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité materiály a přístrojové vybavení

3.1.1 Vzorky

Pro testování byly použity pouze malé výřezy dodaných nábytkových a kuchyňských dvířek (*Obrázek 12*). Měly tvar čtverce se šířkou a délkou asi 10 cm a výškou asi 2 cm. Vzorků bylo testováno celkem 16. Tyto dřevěné destičky byly už od dodavatele povrchově upraveny rozmanitými laky, nátěry a fóliemi. Všechny měly bílou nebo velmi světlou barvu, lišily se od sebe odstínem, průsvitností, vzorem i leskem. Nejvíce vzorků bylo lesklých bez vzoru a s bílou barvou.

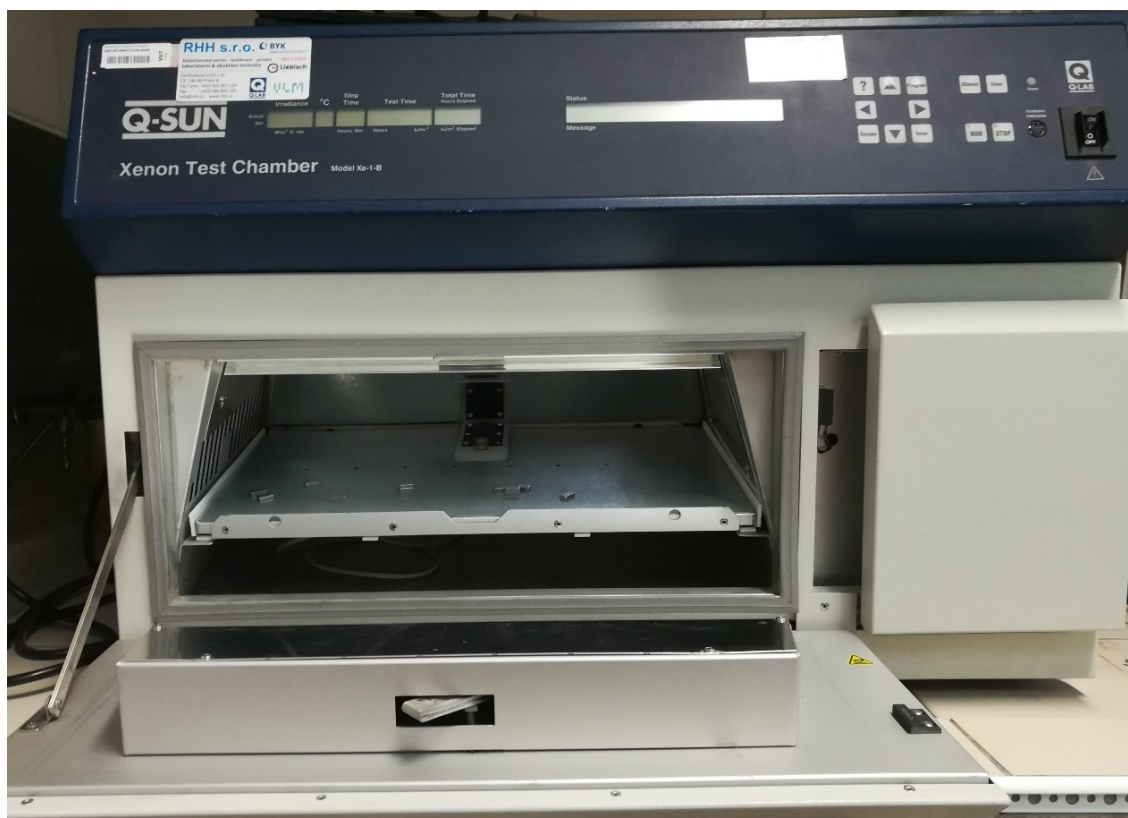


Obrázek 12: Vybrané testovací vzorky

3.1.2 Zařízení

Sluneční komora Q-Sun Xenon Test Chamber Model Xe-1-B/S

Jedná se o přístroj od firmy Q-Lab (viz *Obrázek 13*), který je schopný věrně reprodukovat poškození způsobené plným spektrem slunečního záření, deštěm a vlhkostí a lze s ním tedy provádět experimenty urychleného stárnutí. Má jednu xenonovou lampu chlazenou vzduchem o výkonu 1800 W, volitelný rozprašovač vody a nastavitelnou teplotu pomocí černého teplotního čidla. K dispozici má také několik optických UV filtrů k simulaci různých prostředí například světlo za oknem, přímé denní světlo nebo speciální filtry pouze s ultrafialovými vlnovými délkami, které se používají pro urychlení destruktivních účinků na materiál. Další funkcí je nastavení testovacích cyklů, které lze rozlišit na fázi ozáření a fázi tmy. Ozařování je monitorováno a kontrolováno buď při 340 nm nebo při 420 nm.



Obrázek 13: Q-SUN Xenon Test Chamber, Model Xe-1-B/S

Spektrofotometr Eye-One Pro

Tento spektrofotometr měří odrazová spektra testovaného materiálu ve viditelném spektru záření. Z odrazových spekter se získaná data převedou na digitální signál a následně je možné vypočítat optickou hustotu, barvové souřadnice, denzitu a další parametry. Pro správné fungování je nutné používat speciální software GretagMacbeth KeyWizard TM. Na přístroji je možno nastavit např. typ osvětlení (D50, D65), typ pozorovatele (2°, 10°), barvové prostory CIE (L*a*b*, L*C*h*, L*u*v*, Yxy, XYZ), referenci a další.

Kalibrační radiometr Q-Panel CR20

Je určen pouze pro měření intenzity záření v přístroji Q-Sun. V tomto případě byl použit kalibrační radiometr měřící intenzitu záření při 420 nm. Obsahuje UV senzor, který měří intenzitu záření vycházející z xenonové lampy a odrazu světla od stěn pracovního prostoru, napájecí a datový kabel sloužící k napájení a výměně informací mezi radiometrem a přístrojem a tělo s tlačítky pro kalibraci a displejem, který ukazuje aktuální naměřenou hodnotu intenzity záření (viz Obrázek 14).



Obrázek 14: Zavěšený kalibrační radiometr (vpravo) na sluneční komoře

3.1.3 Software

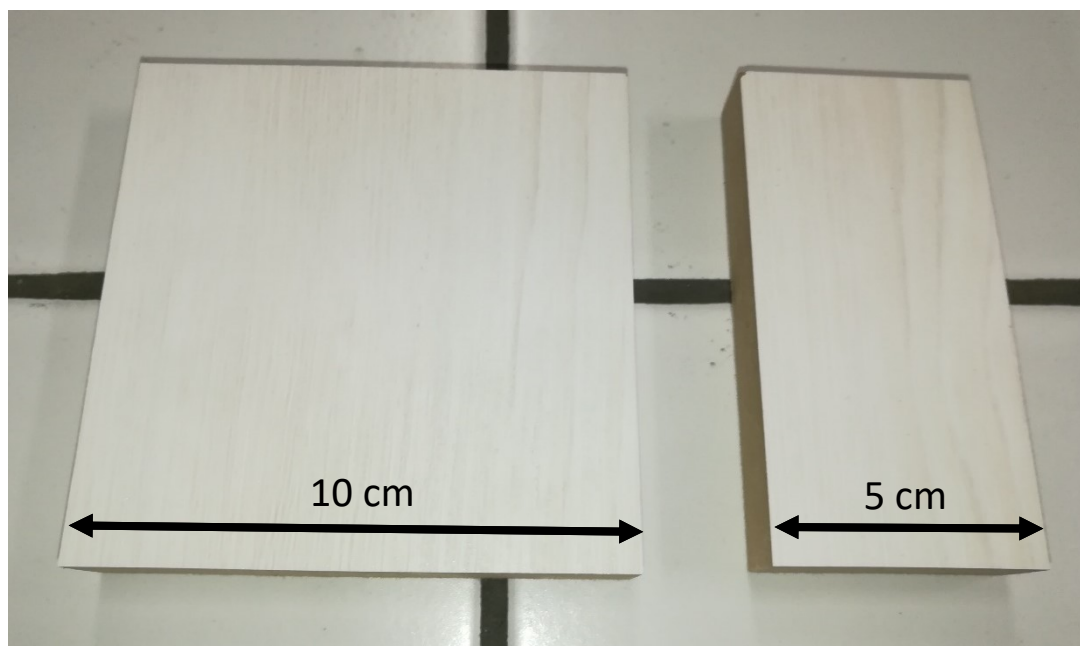
Microsoft® Office Word
Microsoft® Office Excel
GretagMacbeth™ KeyWizard
OriginLab®

3.2 Experiment

3.2.1 Příprava vzorků

Obdržené vzorky měly původně tvar čtverce, kde jedna strana měřila 10 cm. Aby bylo možné provádět testování všech vzorků zároveň, byly všechny vzorky rozpůleny a z každého kusu tak vznikly dva obdélníky o stranách 5 a 10 cm (porovnání velikosti původního a nynějšího vzorku je na *Obrázku 15*). Jeden obdélníkový vzorek byl uložen do tmy pro pozdější srovnání a na druhém vzorku bylo prováděno testování.

Před každým ozářením nebo měřením byl ze vzorků očištěn prach a usazené nečistoty. Jinak nebyly během celé práce při manipulaci se vzorky použity žádné chemikálie.



Obrázek 15: Rozpůlení dodaných vzorků

3.2.2 Ozáření vzorků

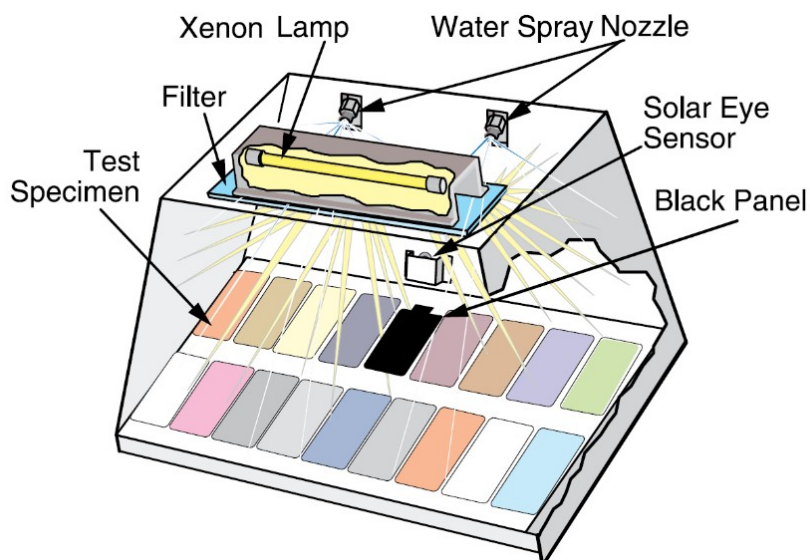
Před vložením vzorků do sluneční komory, musel být vyměněn UV filtr. Místo původního filtru pro simulaci denního světla byl vložen filtr pro simulaci světla procházejícího oknem, který v kombinaci s xenonovou lampou dává polední sluneční záření procházející skrze okenní sklo.

Společně s vyměněním UV filtru bylo nutné vyměnit i UV senzory (původně 340 nm). K dispozici jsou senzory 340 nm a 420 nm. Rozdíl mezi těmito senzory je vlnová délka, při které se měří vlnové záření. Potřebný senzor 420 nm měří v pásmu vlnové délky 420 nm v rozsahu vlnových délek 10 nm.

Po vyměnění UV filtru i UV senzoru bylo potřeba sluneční komoru zkalibrovat radiometrem Q-Panel CR20, který je zkalibrován na vlnovou délku 420 nm. Po několikanásobné kalibraci a vyrovnání hodnot na displeji radiometru a displeji sluneční komory, byl přístroj připraven na nové testování.

Ještě před prvním ozáření vzorků bylo provedeno jejich první měření spektrofotometrem, které bude podrobněji rozepsáno v oddíle 3.2.3. Poté bylo všech 16 vzorků naskládáno a upevněno na podložku, která byla vložena do sluneční komory (viz *Obrázek 16*). Celý přístroj byl umístěn v digestoři a před spuštěním tohoto přístroje bylo vždy zapnuto odsávání, aby bylo odváděno případné nadměrné teplo. Pro nastavení příslušných parametrů na přístroji bylo postupováno podle hodnot uvedených v tabulkách ISO normy 16474-2, které jsou vypsány níže v *Tabulce 5*.

Po ozáření byly vzorky proměřeny spektrofotometrem a byl spuštěn další cyklus, kdy byly vzorky na podložce rotovány ve směru hodinových ručiček, aby se zabránilo nesejnoměrnosti ozáření. Dohromady bylo nasvíceno 22 cyklů, což je celkem 396 hodin ozáření.



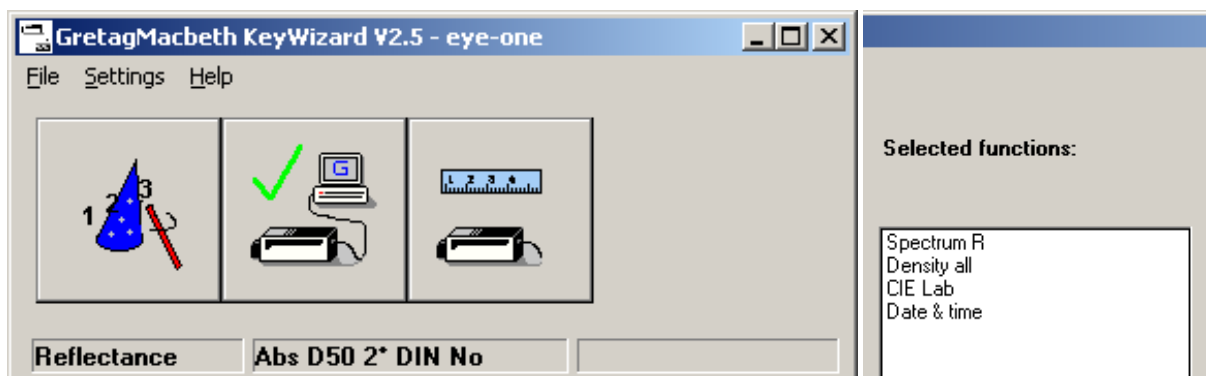
Obrázek 16: Rozmístění vzorků na podložce po vložení do sluneční komory a umístění černého panelu.

Tabulka 5: Parametry pro urychlené stárnutí s regulací teploty pomocí teploměru černého panelu

Nastavované parametry	Hodnoty	Jednotky
Vlnová délka úzkého pásma	420	nm
Intenzita ozáření	1,1	W/(m ² · nm)
Teplota černého panelu	63	°C
Fáze ozáření	18	h
Fáze tmy	6	h

3.2.3 Měření spektrofotometrem

Po skončení ozáření byly vzorky vyjmuty ze sluneční komory a bylo potřeba zjistit, jak se změnili barvové souřadnice od posledního měření. K počítači byl připojen spektrofotometr Eye-One Pro a byl spuštěn program GretagMacbeth™ KeyWizard, kde byla nejprve provedena kontrola připojení přístroje, poté byly vybrány všechny potřebné parametry a spektrofotometr byl zkalibrován na absolutní bílou barvu (vše popsáno na Obrázku 17).



Obrázek 17: Vstupní okno programu GretagMacbeth™ KeyWizard. Pod prvním tlačítkem je volba měřených parametrů uvedená na obrázku vpravo, na druhém tlačítku je kontrola správného zapojení přístroje a na třetím je provedení kalibrace.

Na vzorek byl položen pomocný držák, který zajišťoval správný směr záření a spektrofotometr byl podložen jiným vzorkem, aby byl ve stejné rovině (viz *Obrázek 18*). Každý testovaný vzorek byl měřen pětkrát (pouze vzorek číslo 4 a jeden jemu podobný byly vždy měřeny desetkrát kvůli jejich nejednotnému vzorovanému vzhledu), a to vždy pouze v té polovině, která byla při ozáření blíže xenonové lampě. Získaná data byla rovnou zapisována do programu Microsoft® Office Excel, kde později probíhalo i vyhodnocování dat.



Obrázek 18: Měření odrazových spekter spektrofotometrem Eye-One

3.2.4 Vyhodnocování

Všechna data ze spektrofotometru byla vkládána do programu Microsoft® Office Excel. Na každém listu byla zaznamenána data jednoho vzorku, a to reflektanční spektra od 380 do 730 nm s krokem po 10 nm, barvové souřadnice CMYK založené na subtraktivním míchání, barvové souřadnice $L^*a^*b^*$ a údaje o datu a čase měření.

Z naměřených reflektančních hodnot byla vypočítána denzita a následně byly vytvořeny grafy reflektančních křivek jednotlivých vzorků. Zároveň byla vyhodnocována barvová odchylka jednotlivých měření (podle rovnice (15)), aby se zabránilo nepřesnému měření a barvová odchylka všech měření ke zjištění barevné změny vzorku po ozáření. Nakonec byla vypočítána dávka ozáření. Všechny grafy byly poté upraveny v programu OriginLab®.

Ze všech 16 zkoušených vzorků byly do této bakalářské práce vybrány 4 vzorky. Z nichž první 2 vzorky zastupují několik podobných vzorků, které se chovají analogicky a další 2, které jsou svým chováním naopak odlišné od ostatních. Všechny budou podrobněji popsány v následujících oddílech.

3.2.5 Tvorba grafů

Graf závislosti barvové odchylky na době osvitu a přepočítání na ekvivalentní dny

Barvová odchylka a doba osvitu byla známa už z měření a dat ze spektrofotometru. Pro výpočet ekvivalentních dnů bylo nutné vypočítat dávky ozáření H pro jednotlivé časy podle rovnice 20 (v příkladu níže rovnice (21)).

Po výpočtu dávky bylo potřeba stanovit vhodnou reálnou intenzitu ozáření a počet hodin osvitů denně. Byl zvolen konzervativní scénář s 12 hodinami osvitů denně ($t_{\text{denní osvit}}$) a intenzitou ozáření při 420 nm na $0,25 \frac{W}{m^2 \cdot nm}$ (E_1). Následně byl z dávky a nové intenzity ozáření vypočítán podle rovnice (22) počet hodin pro jednotlivé dávky ($t_{\text{ekvivalentní hodiny}}$) a vydělením počtem hodin osvitů denně (rovnice (23)) byly získány ekvivalentní dny pro konzervativní scénář ($t_{\text{ekvivalentní dny}}$).

Vše je vypočítáno v následující rovnici pro poslední bod v grafu ($t_{\text{koncový bod}}$).

$$H = E_0 \cdot t_{\text{koncový bod}} = \frac{1,1 \cdot 396 \cdot 3600}{1000} = 1568 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \quad (21)$$

$$t_{\text{ekvivalentní hodiny}} = \frac{H}{E_1} = \frac{1568 \cdot 1000}{\frac{0,25}{3600}} = 1742 \text{ h} \quad (22)$$

$$t_{\text{ekvivalentní dny}} = \frac{t_{\text{ekvivalentní hodiny}}}{t_{\text{denní osvit}}} = \frac{1742}{12} = 145,2 \text{ d} \quad (23)$$

Graf reflektančních spekter při různých dobách expozice

Z dat naměřených spektrofotometrem byla z odrazivosti vypočítána denzita. Byla vytvořena reflektanční spektra při různých dobách osvitů. Podle grafu *Závislost barvové odchyšky na době osvitů a přepočtení na ekvivalentní dny* byla vybrána pouze důležitá spektra, která ukazovala nějaký zajímavý jev.

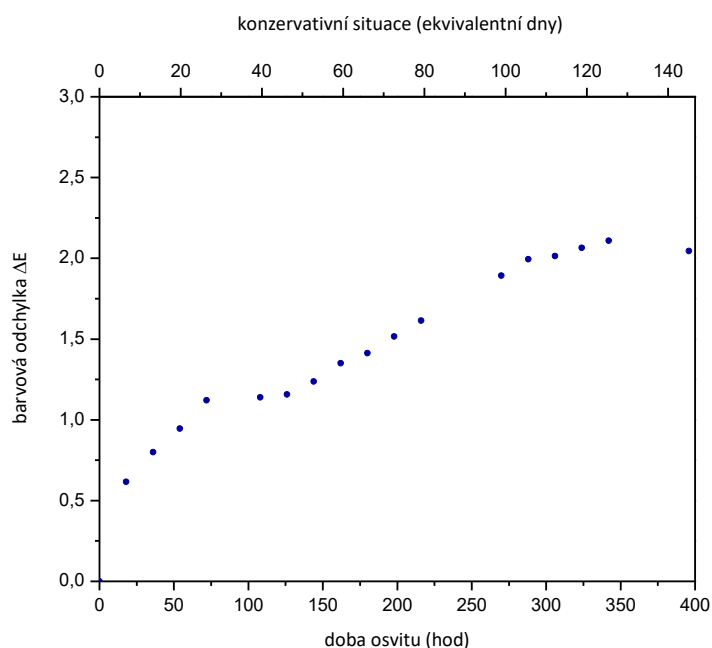
Graf znázornění naměřených hodnot $L^*a^*b^*$ v barvovém prostoru CIE 1976 $L^*a^*b^*$

Změřené souřadnice $L^*a^*b^*$ byly přeneseny do programu OriginLab® a byly znázorněny v trojrozměrném barvovém prostoru CIE 1976 $L^*a^*b^*$. U vzorku 1, 2 a 4 byly některé hodnoty pro přehlednost odebrány a u vzorku 3 byl ponechán pouze počáteční a koncový bod. Šipka v grafu znázorňuje průběh barvových změn a začíná vždy v době bez ozáření a končí v době s dobou ozáření 396 hodin.

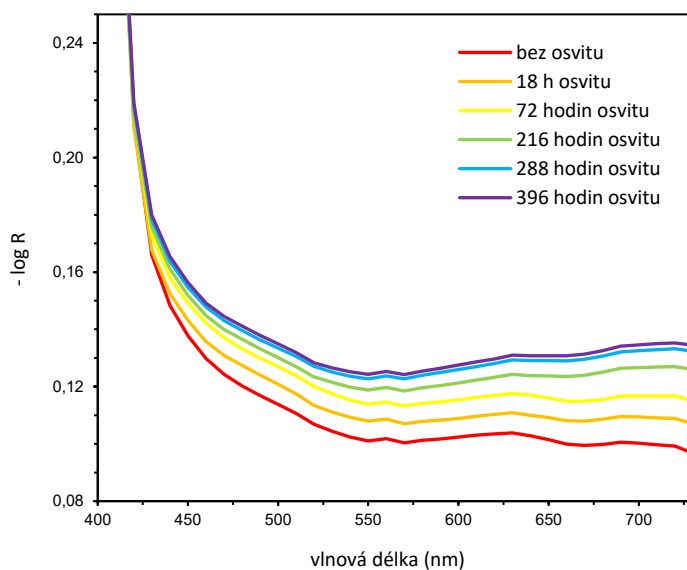
4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Vzorek 1

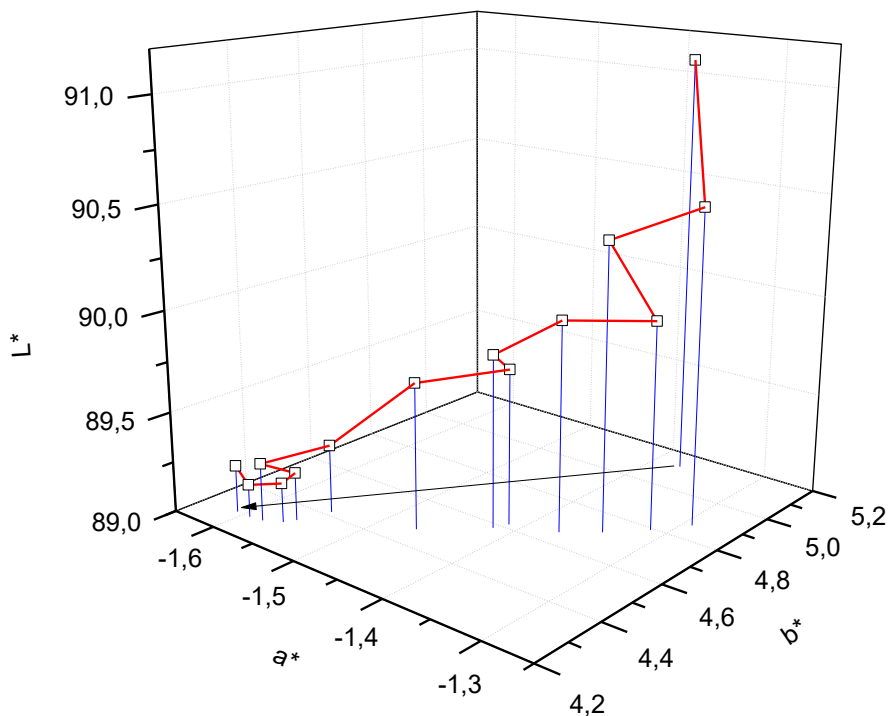
Tento vzorek zastupuje dalších 5 zkoušených vzorků, které se chovaly velmi podobně jako tento. S přibývajícím časem osvit u tohoto vzorku celkem lineárně rostla i barвовá odchyška, což je patrné z *Obrázku 20* a ze stejných rozestupů u reflektančních spekter na *Obrázku 19*. Na *Obrázku 21* je znázorněna barвовá odchyška tohoto vzorku v barвовém prostoru CIE 1976 $L^*a^*b^*$, který je znázorněn na *Obrázku 8*. Z něho lze vyčíst, že vzorek s přibývajícím osvitem tmavnul a přecházel ze žluté barvy více do zelené. Všechny změny ale probíhaly ve velmi malých intervalech a maximálně do barвовé odchyšky 2, což je pro cvičené lidské oko minimální odchyška, kterou může zpozorovat.



Obrázek 20: Závislost barвовé odchyšky na době osvit a přepočít na ekvivalentní dny



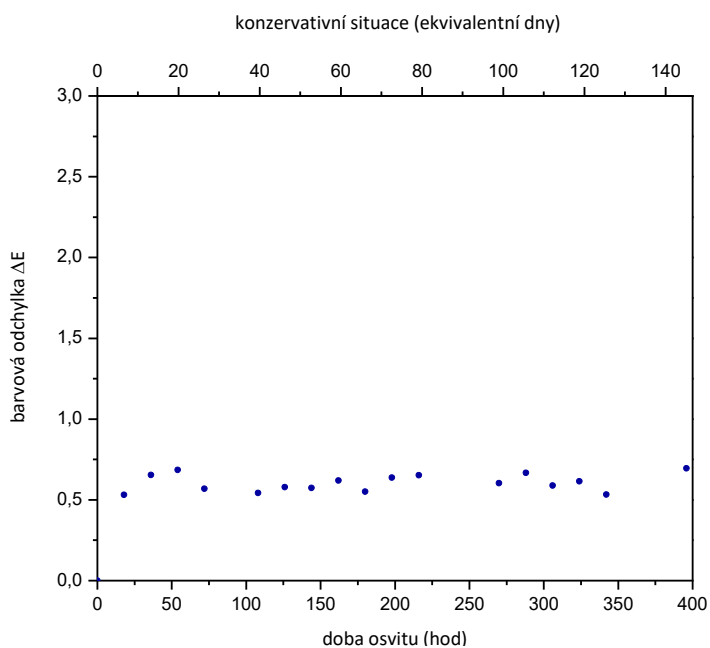
Obrázek 19: Reflektanční spektra vzorku při různých dobách expozice



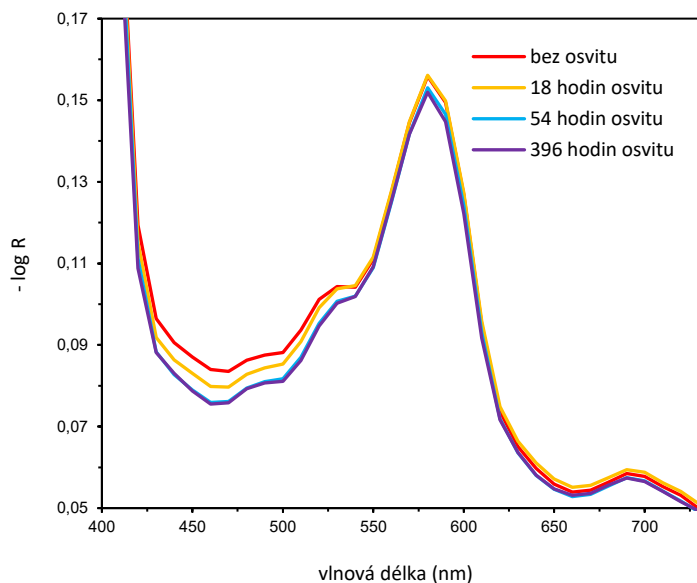
Obrázek 21: Znáznornění naměřených hodnot $L^*a^*b^*$ v barvovém prostoru CIE 1976 $L^*a^*b^*$

Vzorek 2

Tento vzorek zastupuje také velmi početnou skupinu podobně se chovajících vzorků. U této skupiny se s přibývajícím osvětlením opakuje jev, kdy po prvním ozáření barвовá odchylka výrazně vzrostla a s větším počtem hodin osvětlení už se téměř neměnila, což lze vidět na Obrázku 22 i na Obrázku 23, kde lze pozorovat, že reflektanční spektra po 54 hodinách osvětlení a po 396 hodinách osvětlení jsou téměř stejné.

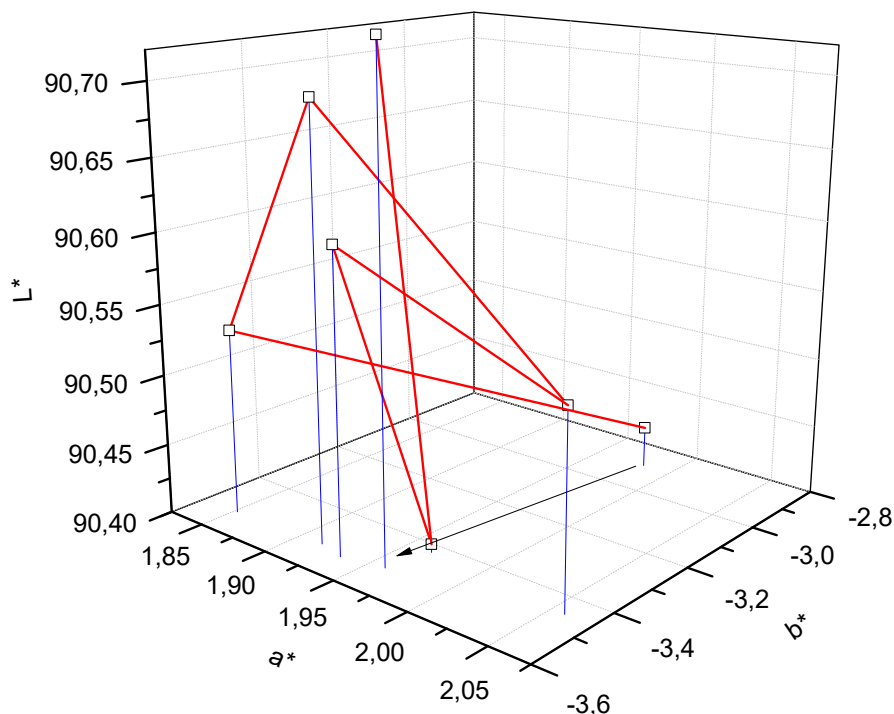


Obrázek 22: Závislost barвовé odchylky na době osvětlení a přepočítání na ekvivalentní dny



Obrázek 23: Reflektanční spektra vzorku při různých dobách expozice

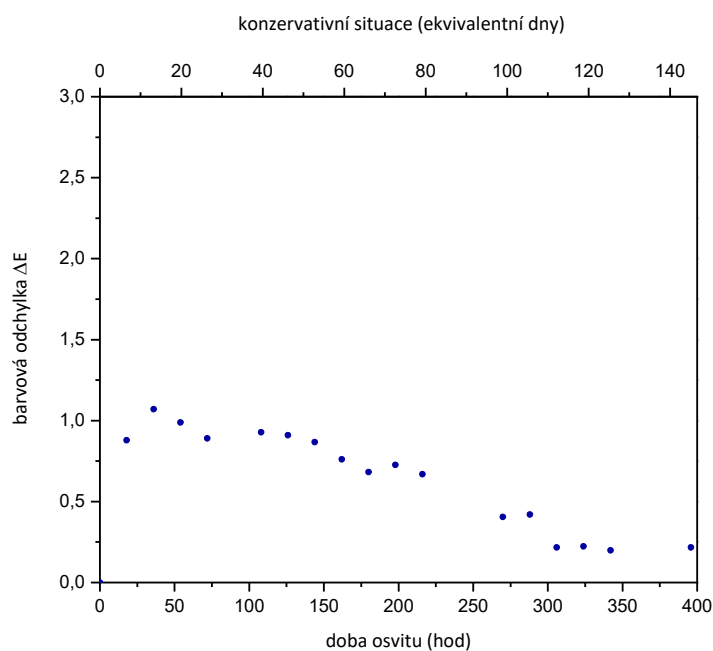
Z Obrázku 24 je zřejmé, že během testování se v malém rozmezí hodnot velmi často měnila červená barva vzorku a jeho měrná světlost. Nejvíce se hned po prvním osvitu změnila hodnota na záporné ose b^* , která značí modrou barvu. Celkově ale barвовá odchylka nepřekročila ani hodnotu 0,7, takže při přímém srovnání neozářeného vzorku a vzorku po ozáření nelze vidět rozdíl.



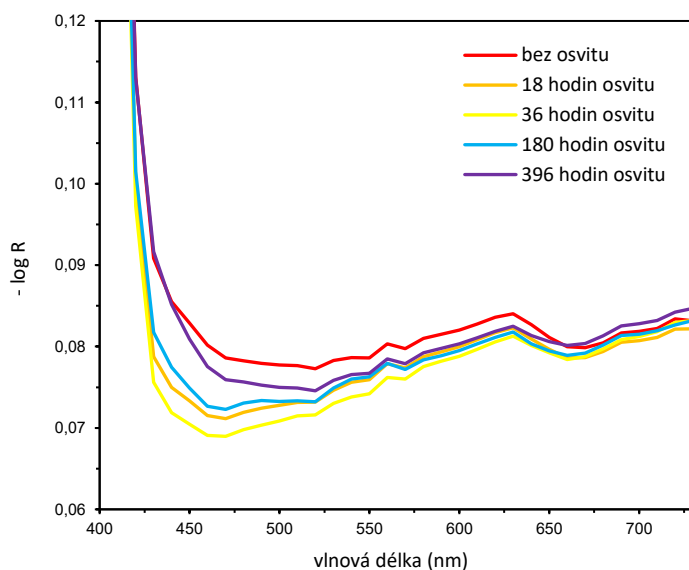
Obrázek 24: Znáznornění naměřených hodnot $L^*a^*b^*$ v barvovém prostoru CIE 1976 $L^*a^*b^*$

Vzorek 3

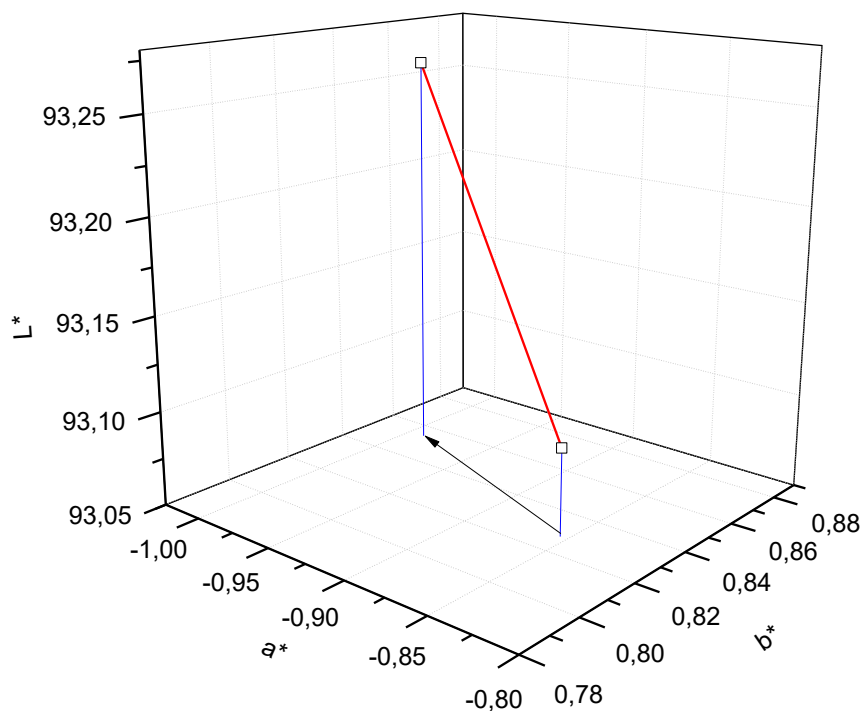
Tento vzorek byl svým chováním v této testované řadě unikátní. Jako jediný měl hned po prvním ozáření velkou barvou odchytku, která se po 36 hodinách osvitů dostala až na barvou odchytku 1,07, ale poté se začala postupně zmenšovat a po posledním ozáření skončila až na hodnotě 0,2. Tento jev lze sledovat na *Obrázku 25* a *Obrázku 26*, kde lze zároveň vidět, že v průběhu testování se mění hlavně zelená barva, která je na *Obrázku 27* na záporné ose a^* . Při úplném vynesení všech měření na *Obrázek 27*, byla patrná poměrně velká změna na všech osách.



Obrázek 25: Závislost barvové odchytky na době osvitů a přepočítání na ekvivalentní dny



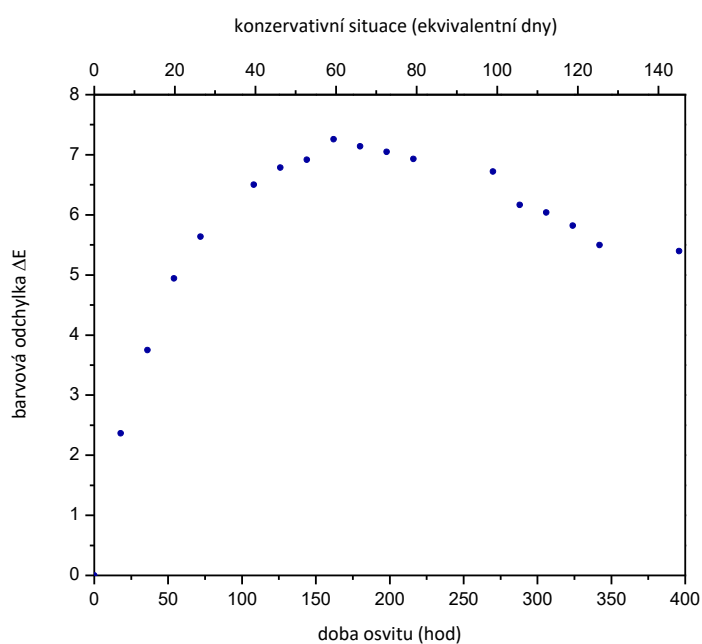
Obrázek 26: Reflektanční spektra vzorku při různých dobách expozice



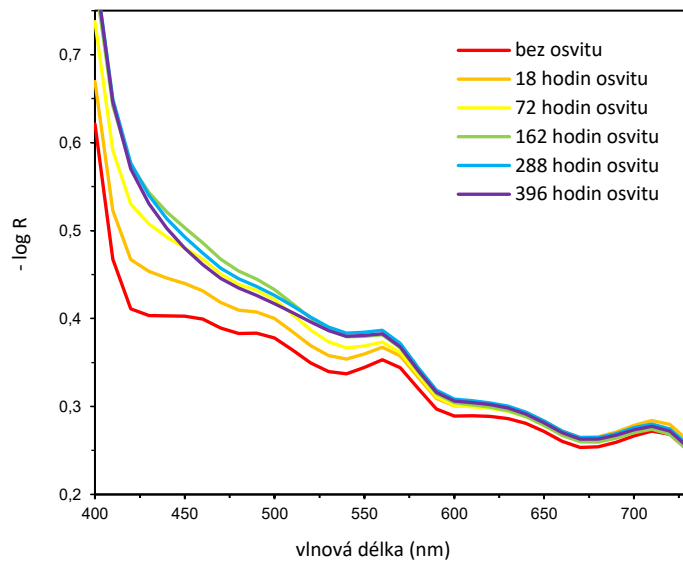
Obrázek 27: Znáznornění naměřených hodnot $L^*a^*b^*$ v barvovém prostoru CIE 1976 $L^*a^*b^*$

Vzorek 4

Vzorek číslo 4 se podobal ještě jednomu vzorku, a to hlavně svým vzhledem. Oba dva nebyly čistě bílé, byly spíše zbarvené do hněda a měly na povrchu rýhy a vzor dřeva. Proto se u nich také mnohem více (než u bílých vzorků) projevila barevná změna, kdy po jednom z měření byla zjištěna barevná odchylka až 7,3, což je rozdíl, který je při srovnání vzorků vidět na první pohled. Viditelná odlišnost byla navíc pozorována už po prvním ozáření, kdy barevná odchylka byla větší než 2,3 (Obrázek 28). Z Obrázku 29 lze pozorovat, že při 162 hodinách osvitů dosáhla barevná odchylka svého maxima a poté se opět snižovala.

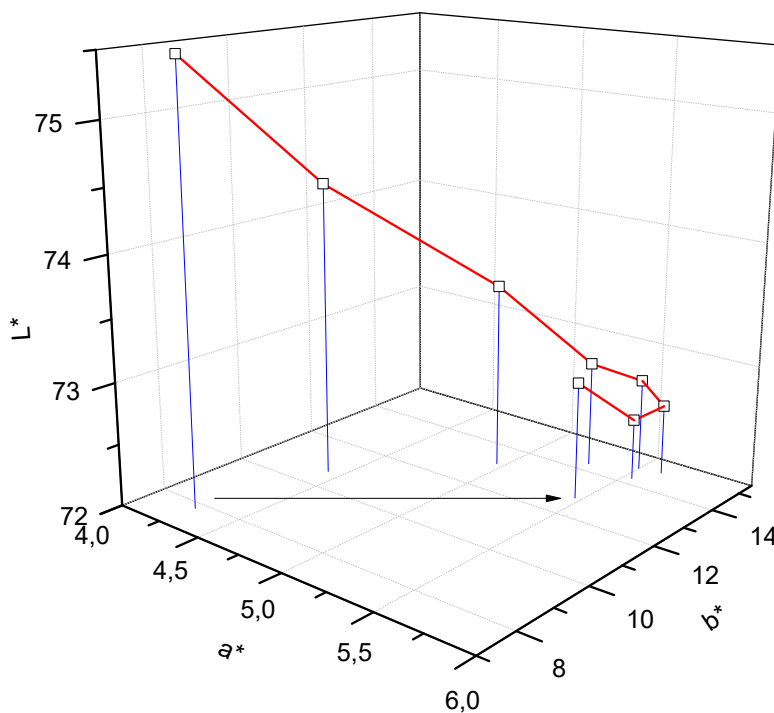


Obrázek 28: Závislost barvové odchylky na době osvitů a přepočítání na ekvivalentní dny

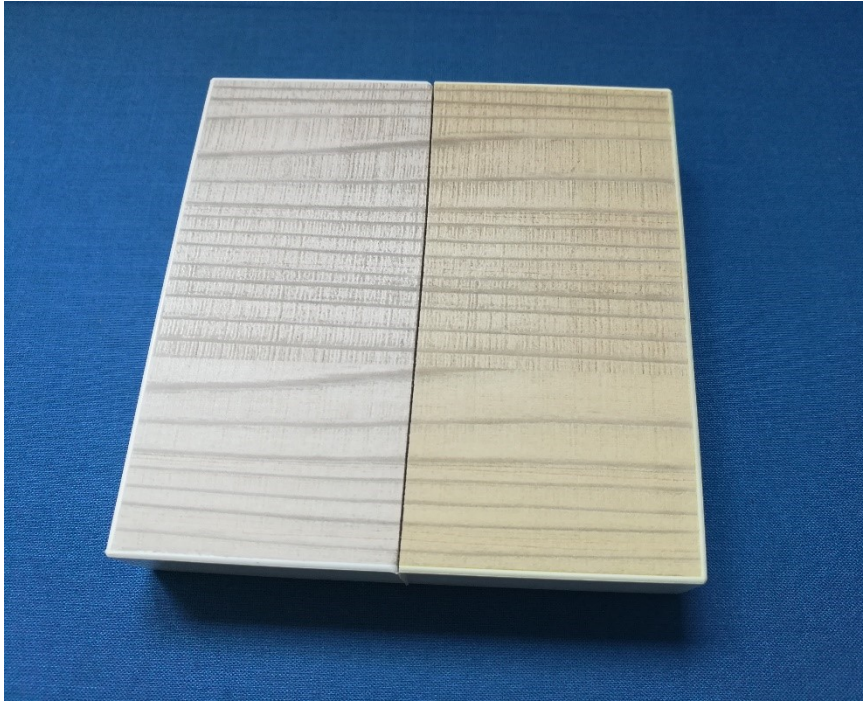


Obrázek 29: Reflektanční spektra vzorku při různých dobách expozice

Na Obrázku 30 je možné zjistit, že vzorek postupně tmavnul a zároveň se zvětšovala hodnota na žluté a červené ose. Výsledným vizuálním dojmem při srovnání původního vzorku a vzorku po ozáření bylo znatelné zežloutnutí vzorku po ozáření, které lze zpozorovat i když oba vzorky nejsou položeny vedle sebe (Obrázek 31).



Obrázek 30: Znáznornění naměřených hodnot $L^*a^*b^*$ v barvovém prostoru CIE 1976 $L^*a^*b^*$

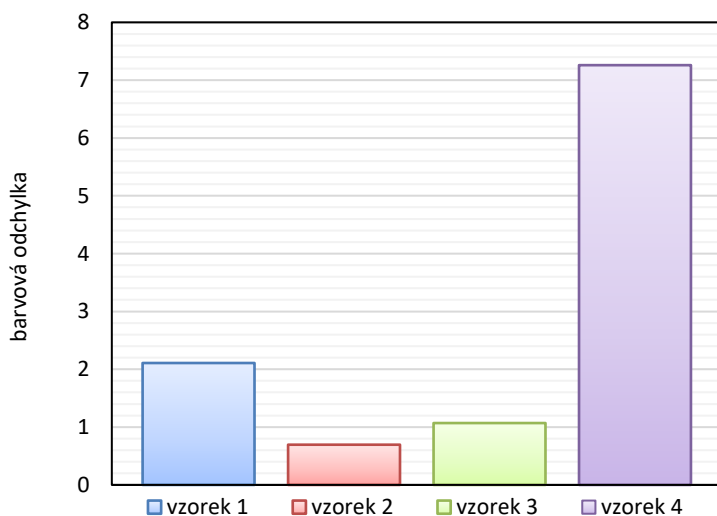


Obrázek 31: Srovnání vzorku číslo 4 bez ozáření (vlevo) a po době ozáření 396 hodin (vpravo). Barvová odchylka zde velmi výrazně překročila hranici, kterou je lidské oko schopné zpozorovat.

5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala studiem světlostálosti interiérových nábytkových nátěrů. Pro zjištění barvové odchylky byla využita metoda zrychleného testování ve sluneční komoře vystavením xenonové výbojce přes filtr okenního skla a následně změření odrazových spekter a kolorimetrických veličin vzorku. Ze získaných dat byla vypočítána dávka ozáření a přepočtena na ekvivalentní dny. K vyhodnocení bylo také využito znázornění závislosti barvové odchylky na čase, důležitá reflektanční spektra v různých dobách expozice a zobrazení kolorimetrických veličin $L^*a^*b^*$ v trojrozměrném prostoru.

Na následujícím Obrázku 32 je porovnání všech 4 vzorků a jejich největších barvových odchylek, které se vyskytly během celé expozice.



Obrázek 32: Porovnání maximálních barvových odchylek všech 4 vzorků naměřených během testování

Z obrázku lze vyčíst, že vzorek číslo 4 má mnohem větší barvovou odchylku než ostatní, což bylo způsobeno hlavně tím, že povrchová úprava tohoto vzorku neměla bílou barvu, a proto se na ní mnohem rychleji ukazovaly všechny změny. Na tomto vzorku jako jediném ze všech 16 testovaných byla při porovnávání změna viditelná na první pohled i když u sebe vzorky nebyly v těsné blízkosti.

Druhým nejhorším testovaným vzorkem byl vzorek číslo 1, který od počátku testování lineárně zvyšoval svoji barvovou odchylku a už po asi 140 dnech (konzervativní situace) měl tuto odchylku vyšší než 2, což je postřehnutelný rozdíl. U takového průběhu se dá očekávat, že s přibývajícím časem expozice by se barevná změna neustále zvyšovala s tím, jak by se ničila povrchová vrstva vzorku.

Nejlepším testovaným vzorkem byl vzorek číslo 2, který vykazoval stabilně nejmenší barvovou odchylku, která se nedostala ani nad hodnotu 0,7. Tento vzorek se svým chováním velmi podobal i dalším testovaným vzorkům. U všech se opakovalo to, že při vynesení hodnot $L^*a^*b^*$ do 3D prostoru všechny hodnoty mírně kolísaly (chyby měření) a nedržely nějaký pravidelný trend. Je pravděpodobné, že tyto typy vzorků mají na sobě nějakou speciální odolnou povrchovou úpravu (UV absorbéry, UV stabilizátory), která po dobu tohoto testování ještě

nebyla zničena. Dá se očekávat, že kdyby byly tyto vzorky vystaveny ozáření déle, po čase by tato speciální vrstva došla a barvová odchylka by začala strmě stoupat.

Posledním testovaným vzorkem byl vzorek číslo 3. Po ukončení testování měl sice nejnižší barvovou odchylku, ale během testování byla až pětkrát vyšší. Tento průběh je velmi atypický a dá se předpokládat, že tento vzorek je jen jedním z těch, které spadají do stejné kategorie jako vzorek číslo 2 jen s větším kolísáním hodnot $L^*a^*b^*$ v 3D prostoru. Jedním z důvodů jeho chování může být i jeho matný vzhled, díky kterému jsou světelné paprsky částečně rozptýleny a nedopadají přímo na povrch vzorku.

Z výsledků zrychleného testování lze konstatovat, že nejlepší světlostálost mají bílé, matné povrchy a nátěry s obsahem pigmentů, UV stabilizátorů a UV absorbérů.

Změny způsobené fotodegradací jsou nežádoucí a snižují kvalitu i výsledný dojem výrobku. Povrchové úpravy fotodegradaci nezabrání, ale mohou ji významně snížit a prodloužit tak životnost povrchu a díky tomu i jeho mechanické vlastnosti.

6 LITERATURA

- (1) *Závěrečná zpráva grantového úkolu: Vliv světla a ultrafialového záření na archivní dokumenty*. In: Praha, 2009. Dostupné také z: <http://web.nacr.cz/soubory/svetlo.pdf>
- (2) SHEVELL, S. *The science of color* [online]. 2nd ed. United States: Optical Society of America, 2003 [cit. 2018-01-25]. ISBN 04-445-1251-9.
- (3) RYER, A. *Light Measurement Handbook* [online]. Second Printing. Newburyport, MA: International Light, 1997 [cit. 2018-05-09]. ISBN 0-96583 56-9-3. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.24.2078&rep=rep1&type=pdf>
- (4) HABEL, J. *Světlo časopis pro světlo a osvětlování: Základy světelné techniky* [online]. Praha: FCC Public, b.r., (6) [cit. 2017-11-03]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/o-casopisu>
- (5) Technical bulletins. *Q-LAB* [online]. b.r. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <http://www.q-lab.com/en-gb/resources/technical-bulletins.aspx>
- (6) FRASER, B., Ch. MURPHY a F. BUNTING. *Real world color management: industrial-strength production techniques*. 2nd ed. Berkeley, CA: Peachpit Press, 2003, 521 s. ISBN 80-7226-943-7.
- (7) ZMEŠKAL, O., M. ČEPPAN a P. DZIK. *Barevné prostory a správa barev* [online]. Brno: Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně, 2002 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: http://www.fch.vut.cz/lectures/imagesci/download/stud06_rozn02.pdf
- (8) ŠALDA, J. a L. SVOBODA. *Přehled polygrafie: pro I. ročníky OU a UŠ polygrafických a SPŠG*. 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1978. ISBN 83-30-32/2.
- (9) HUNT, R. *The reproduction of colour*. 5th ed. Kingston-upon-Thames, England: Fountain Press, 1995. ISBN 08-634-3381-2.
- (10) VIK, M. *Měření Barevnosti a Vzhledu: Barevné Odchytky* [online]. Liberec, b.r. [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/42373733-Mereni-barevnosti-a-vzhledu-barevne-odchylky.html>
- (11) PRCHAL, V. a N. FASUROVÁ. *Návody pro praktikum z koloristiky a kolorimetrie*. 1. vyd. Brno: VUT FCH, 2007, 32 s. : il. ISBN 978-80-214-3454-7.
- (12) *Hunter lab* [online]. b.r. [cit. 2017-11-01]. Dostupné z: <https://www.hunterlab.com/application-notes.html>
- (13) KLEIN, G. a T. MEYRATH. *Industrial color physics* [online]. English ed. New York: Springer, 2010 [cit. 2017-12-18]. Springer series in optical sciences, v. 154. ISBN 978-1-4419-1196-4. Dostupné z: <http://www.springer.com/gp/book/9781441911964>
- (14) FELLER, R. *Accelerated aging: photochemical and thermal aspects*. Marina del Rey, CA: Getty Conservation Institute, 1994. ISBN 08-923-6125-5.
- (15) MOURA, J.C.V.P., A.M.F. OLIVEIRA-CAMPOS a J. GRIFFITHS. The effect of additives on the photostability of dyed polymers. *Dyes and Pigments* [online]. Elsevier Ltd, 1997, **33**(3), 173-196 [cit. 2017-10-30]. DOI: 10.1016/S0143-7208(96)00050-2. ISSN 0143-7208. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143720896000502>
- (16) KRÁNITZ, K., W. SONDEREGGER, C. BUES a P. NIEMZ. Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science and Technology* [online]. 2016, **50**(1), 7-22 [cit. 2018-05-

- 09]. DOI: 10.1007/s00226-015-0766-0. ISSN 14325225. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0>
- (17) ISO 16474. *Paints and varnishes - Methods of exposure to laboratory light sources*. 2013.
- (18) PINTUS, V., S. WEI a M. SCHREINER. UV ageing studies: evaluation of lightfastness declarations of commercial acrylic paints. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* [online]. 2012, **402**(4), 1567-1584 [cit. 2018-01-29]. DOI: 10.1007/s00216-011-5369-5. ISSN 1618-2642. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00216-011-5369-5>
- (19) ISO 18909. *Photography - Processed photographic colour films and paper prints*. Switzerland, 2006.
- (20) CIE 1931 xy chromaticity diagram [online]. In: . 2005 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:CIExy1931.png>
- (21) Rentgenové záření. In: *Nikola Tesla* [online]. 2016 [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <http://tesla.xf.cz/rentgen.html>
- (22) Global horizontal irradiation Czech republic. In: *Solargis* [online]. b.r. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/czech-republic>
- (23) *Spectrum of solar radiation (Earth)* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_en.svg#/media/File:Solar_spectrum_en.svg

7 SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a^*, b^*, L^*	barvové souřadnice
c	rychlost světla
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
CMS	systém správy barev
D	optická hustota
D65	denní světlo s teplotou chromatičnosti 6500 K
E	intenzita osvětlení
ΔE_{ab}^*	barvová odchylka
f	frekvence
h	Planckova konstanta
H	dávka ozáření
FCH	Fakulta chemická
I_0	intenzita dopadajícího světla
I_r	intenzita odraženého světla
I_t	intenzita prošlého světla
IR	infračervené
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
k	normalizační konstanta
Q	energie fotonu
R	odrazivost
$R(\lambda)$	spektrální reflektance objektu
$S(\lambda)$	spektrální distribuce osvětlení
t	čas
T	propustnost
UV	ultrafialové
VIS	viditelné
VUT	Vysoké učení technické v Brně
x, y, z	trichromatické souřadnice
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	trichromatické členitele pro 2° pozorovatele
$\bar{x}_{10}, \bar{y}_{10}, \bar{z}_{10}$	trichromatické členitele pro 10° pozorovatele
X, Y, Z	trichromatické složky
3D	trojrozměrný
λ	vlnová délka