

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



**Fotometrické zkoušky rozptylových
termoplastů vhodných pro LED zdroje**

Diplomová práce

Bc. Lukáš Škuta

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Studijní program: Inteligentní budovy

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Lukáš Škuta**

Program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Fotometrické zkoušky rozptylových termoplastů vhodných pro LED zdroje**

Název tématu anglicky: **Photometric Analysis of Thermoplastics for LED Luminaires**

Pokyny pro vypracování:

S využitím platných technických norem a předpisů navrhnete metodiku hodnocení změn světelného světla po průchodu světla termoplasty. Změřte spektrum světla vybraných svítidel s difuzory z termoplastů a spektrum v nich instalovaných světelných zdrojů a zhodnoťte změny světelného spektra po průchodu termoplasty na teplotu chromatičnosti, barvu světla a další kvalitativní parametry svítidel. Na základě navržené metodiky vytvořte nástroj pro výrobce svítidel, který umožní vyhodnotit teplotu chromatičnosti, barvu světla a další kvalitativní parametry svítidel na základě změřených spekter zdrojů světla a absorpčních spekter termoplastů.

Seznam odborné literatury:

- [1] Publikace CIE 15:2004: Colorimetry
- [2] ČSN EN ISO 11664: Kolorimetrie
- [3] HABEL, Jíří, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 438 s. ISBN 978-80-86534-21-3.

Vedoucí diplomové práce:
Datum zadání diplomové práce:
Platnost zadání do¹:

Ing. Marek Bálský Ph.D.
1. července 2016
L.S

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 7. 2016

Prohlášení

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

V Praze 5. 1. 2017

.....

Podpis

Pod'akovanie

Týmto by som rád poďakoval vedúcemu práce Ing. Marekovi Bálskému, Ph.D. za ochotu, čas, a rady pri vypracovávaní diplomovej práce.

Abstrakt

Cieľom práce bolo navrhnutie metodiky a následné vytvorenie nástroja na hodnotenie zmien svetelných vlastností a fotometrických veličín pri prechode. Výsledkom práce je aplikácia, ktorá z nameraných hodnôt zo spektrometru a z goniofotometra samotného zdroja svetla a svetla prechádzajúceho jednotlivými termoplastami vyhodnotí zmenu svetelných vlastností a fotometrických veličín tohto svetla pri prechode daným termoplastom. Aplikácia vytvorí pdf dokument, v ktorom sú zaznamenané a porovnané tieto vlastnosti, ktoré sú spektrálny priebeh činiteľa prestupu, farba (XYZ CIE 1931, sRGB), teplota chromatickosti, priepustnosť, čiary svietivosti, uhol polovičnej svietivosti a rozptyl. Všetky merania prebiehali v laboratóriu svetelnej techniky na katedre elektroenergetiky. Aplikácia bude slúžiť výrobcem svietidiel pri výrobe difúzorov.

Kľúčové slová:

Teplota chromatickosti,, termoplast, difúzor, CIE XYZ, sRGB, uhol polovičnej svietivosti, rozptyl svetla

Abstract

The main goal of this Diploma thesis was to create methodology and tool for evaluating luminous properties changes and photometric properties of light during his transmission through thermoplastic. The result of thesis is application, that from values from spectrometer and goniophotometer of light source and light passing through thermoplastic evaluate change of luminous properties and photometric properties. Application also creates the pdf document, where these properties are recorded and compared. These properties are spectral behavior of transmission coefficient, color (CIE XYZ, sRGB), correlated color temperature, transmission coefficient, luminous intensity, half power angle and dispersion of light. All measurements was situated in Laboratory for Light Measurement in Department of Power Engineering in CTU Prague. The purpose of application will be support for lamp producers during creating diffusers for these lamps.

Key words:

Correlated color temperature, thermoplastic, diffusers, CIE XYZ, sRGB, half power angle, dispersion of light

Obsah

1. Úvod	8
2. Fotometrické pojmy a veličiny	10
2.1 Svetelný tok	10
2.2 Integrálne činitele	11
2.3 Priestorový uhol	12
2.4 Osvetlenosť	13
2.5 Svietivosť	14
2.6 Farebný podnet	16
2.7 Zrakový vnem	17
2.7.1 Vplyv zdroja svetla	17
2.7.2 Vplyv prostredia	17
2.7.3 Zrakový orgán	17
2.8 Kolorimetria	19
2.8.1 CIE XYZ	20
2.8.2 sRGB	23
2.9 Teplota chromatickosti	25
3. Meranie spektrálneho zloženia svetla a svetelne technických veličín	26
3.1 Meracie prístroje	26
3.1.1 Spektrometer	26
3.1.2 Luxmeter	27
3.1.3 Goniofotometer	28
3.2 Priebeh merania spektrometrom	29
3.3 Spôsob merania a výpočtu jednotlivých veličín	30
4. Vzorky rozptylových termoplastov	32
5. Výsledky meraní a výpočtov	33
5.1 Zmena spektrálneho zloženia a farby	33
5.2 Zmena fotometrických vlastností svetla	54
6. Vyhodnotenie výsledkov	61
7. Záver	63
8. Použitá literatúra	65
9. Zoznam obrázkov	66
10. Prílohy	68

1. Úvod

Témou práce bolo zhodnotiť zmenu svetelne technických veličín pri prechode svetla termoplastom a vytvoriť nástroj pre výrobcov svietidiel, ktorý tieto zmeny automaticky vyhodnotí. Predmetom meraní boli termoplasty Makrolon od firmy Bayer, ktoré sa používajú na výrobu difúzorov svietidiel, ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou LED svietidiel. LED svietidlá v súčasnosti prežívajú veľký rozmach, hlavne vďaka oveľa nižšej spotrebe elektrickej energie a niekoľkonásobne dlhšej životnosti ako je to u klasických žiaroviek. Ďalšími výhodami LED svietidiel je vysoká odolnosť voči mrazu, otrasom a nárazom, nevadí im časté zapínanie a vypínanie. K ich výhodám patrí aj okamžité spustenie, stabilná teplota chromatickosti, jednoduchá možnosť redukcie a iné. Tieto vlastnosti LED svietidiel sú dôvodom, prečo si našli uplatnenie v inteligentných budovách.

Z hľadiska zaistenia základnej funkcie svietidla, tj. osvetľovanie určitého priestoru alebo predmetu, sú najpodstatnejšie jeho svetelne činné časti. Sú to časti upravujúce rozloženie svetelného toku vyžarovaného svetelnými zdrojmi a určujúce fotometrické vlastnosti svietidiel. Svetelne činné časti môžu svetelný tok rovnomerne rozptýliť do priestoru alebo usmerniť do presne určeného svetelného zväzku. Iné svetelne činné časti sú určené ku clonení svetelných zdrojov, zábrane oslnenia alebo úprave spektrálneho zloženia optického zariadenia svetelných zdrojov. K dosiahnutiu požadovaných svetelne technických vlastností svietidiel sa používajú tieto svetelne činné časti:

- reflektory
- difúzory
- šošovky a refraktory
- holografické svetelné prvky
- svetlovody
- tienidlá a kryty
- filtre

V práci sa budeme zaoberať difúzormi, konkrétne materiálom, z ktorého sa difúzory vyrábajú.

Difúzory sú priesvitné materiály, ktoré menia priestorové rozloženie svetelného toku zdroja rozptylom prechádzajúceho svetla. Na výrobu difúzorov sa používa opálové sklo (žiarivkové svietidlá) alebo priesvitné plasty, napr. polystyren alebo akrylát (žiarivkové svietidlá). Sklo aj plasty majú veľký stupeň rozptylu svetla pri minimálnom pohltení. Difúzory a difúzne kryty nielenže upravujú tvar fotometrickej plochy svietivosti svietidla, ale taktiež znižujú jas svietidiel, čo je zvlášť dôležité u svietidiel s bodovými svetelnými zdrojmi s vysokým povrchovým jasom. U žiarivkových svietidiel, ktoré majú v porovnaní s bodovými zdrojmi výrazne nižšie jasy, je použitie difúzorov menej vhodné. Rozloženie jasu žiariviek na väčšiu plochu je síce veľmi dobré, ale účinnosť väčšiny svietidiel s difúzormi je relatívne malá [1].

V práci sa budem venovať zmene farebných vlastností svetla prechádzajúceho termoplastom na výrobu difúzorov, ich priepustnosťou, rozptylom a inými vlastnosťami termoplastov.

Táto práca sa skladá z dvoch častí. Prvou časťou je samotná diplomová práca, ktorá je rozdelená do troch častí. Prvá časť obsahuje teoretický základ k daným svetelne technickým veličinám a výpočtom týchto veličín. Druhá časť obsahuje namerané hodnoty a vypočítané výsledky jednotlivých veličín. Tretia časť obsahuje zhodnotenie výsledkov meraní a výpočtov.

Druhou časťou práce je windowsová aplikácia, ktorá všetky tieto svetelne technické vlastnosti vyhodnocuje na základe vstupných dát zo spektrometra (závislosť hustoty žiarivého toku na vlnovej dĺžke) a z goniofotometru (čiary svietivosti). Aplikácia môže slúžiť pre výrobcov difúzorov svietidiel pri výbere vhodného termoplastu na výrobu difúzora.

2. Fotometrické pojmy a veličiny

2.1 Svetelný tok

Svetelne technická veličina, ktorá odpovedá žiarivému toku a vyjadruje schopnosť žiarivého toku spôsobiť zrakový vnem. Jednotkou svetelného toku je *lumen* (lm). Svetelný tok Φ monochromatického žiarenia vlnovej dĺžky λ , ktorého žiarivý tok je Φ_e sa určí zo vzťahu:

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad [\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, -, \text{W}] \quad (1)$$

kde: $\Phi(\lambda)$ - svetelný tok danej vlnovej dĺžky λ

$K(\lambda)$ – svetelná účinnosť monochromatického žiarenia vlnovej dĺžky λ

$\Phi_e(\lambda)$ - žiarivý tok dané vlnové dĺžky λ

Z rovnice (1) je možné získať vzťah pre pomernú svetelnú účinnosť $V(\lambda)$:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad [-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2)$$

kde: $V(\lambda)$ - pomerná svetelná účinnosť

$K(\lambda)$ – svetelná účinnosť monochromatického žiarenia vlnovej dĺžky λ

K_m – maximálna svetelná účinnosť

V sústave SI sa jednotky svetelne technických veličín odvodzujú od základnej jednotky svietivosti (1 kandela), tj. od svietivosti zdroja žiarenia s jedinou frekvenciou $\nu = 540 \cdot 10^{12}$ Hz, pri žiarivosti zdroja v danom smere $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$.

Zmienená frekvencia zodpovedá v štandardnom ovzduší tzv. základnej vlnovej dĺžke λ_m

$$\lambda_m = \frac{c}{\nu} = \frac{2,99708640 \cdot 10^8}{540 \cdot 10^{12}} = 555,0155 \text{ nm} \doteq 555 \text{ nm}$$

kde c je rýchlosť svetla v štandardnom prostredí.

Medzinárodné orgány CIE a ISO v súlade s definíciou kandely schválili hodnotu konštanty $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ako najlepší odhad maxima svetelnej účinnosti žiarenia $K(\lambda)$ odpovedajúce monofrekvenčnému žiareniu základnej vlnovej dĺžky $\lambda = \lambda_m = 555 \text{ nm}$ pre fotopické videnie.

Dôležitým dôsledkom definície kandely je, že pre žiarenie základnej vlnovej dĺžky $555,0155 \text{ nm}$ je svetelný účinok žiarenia tj. Taktiež spektrálna citlivosť zraku normálneho fotometrického pozorovateľa pri fotopickom videní $K(555,0155)$ i pri skotopickom videní $K'(555,0155)$ zhodná a rovná $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, a teda platí rovnica:

$$K(555,0155) = K'(555,0155) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$$

Svetelný tok Φ žiarenia zloženého z rôznych monochromatických žiarení, ktorého žiarivý tok Φ_e je daný priebehom $\Phi_e \lambda$ sa zistí z rovnice:

$$\Phi = 683 \int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad [\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}] \quad (3)$$

kde $\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda$ je spektrálna hustota žiarivého toku Φ_e pre vlnovú dĺžku λ .

V prípade, že je žiarenie zložené z viacerých monochromatických žiarení, je možné svetelný tok Φ spočítať tak, že sa žiarenie rozdelí na dostatočný počet n malých úsekov $\Delta \lambda$. Pre každý z týchto úsekov určíme strednú hodnotu žiarivého toku $\Phi_e(\lambda_i)$ a hodnotu pomernej svetelnej účinnosti $V(\lambda_i)$. Svetelný tok je teda určený súčtom všetkých úsekov. Rovnica má potom tvar:

$$\Phi = K_m \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) V(\lambda_i) \Delta\lambda_i \quad [\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}] \quad (4)$$

Z uvedeného vyplýva, že svetelný tok je vlastne žiarivý tok zhodnotený zrakovým orgánom normálneho fotometrického pozorovateľa, a to obvykle pri fotoskopickom videní. Podobne ako sú pre monochromatické žiarenie určené veličiny $K(\lambda)$ $V(\lambda)$, definujú sa pre zložené žiarenie pojmy *svetelný účinok žiarenia*

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e} \quad [\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}; \text{lm}, \text{W}]$$

a *pomerná svetelná účinnosť zloženého žiarenia* [1]

$$V = \frac{K}{K_m} \quad [-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}]$$

2.2 Integrálne činitele

Optické vlastnosti materiálov sú dôležité hlavne pre návrh a konštrukciu svetelne činných častí rôznych zariadení s ohľadom na možnosti usmernenia svetelného toku, jeho rozptylu, prípadne obmedzenia jasú v určitých smeroch.

Svetelný tok Φ dopadajúci na uvažovaný materiál sa v obecnom prípade delí na tri časti, a to na časť Φ_ρ , ktorá sa odrazí, na časť Φ_τ , ktorá látkou prejde, a na časť Φ_α , ktorú látka pohltí.[1] Platí teda:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha \quad [\text{lm}; \text{lm}, \text{lm}, \text{lm}]$$

Svetelne technické vlastnosti látok charakterizujú tri integrálne činitele odpovedajúce zmienenému rozdeleniu svetelného toku, a to:

$$\begin{aligned} - \text{integrálny činiteľ odrazu:} & \quad \rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi} \\ - \text{integrálny činiteľ prestupu:} & \quad \tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} \end{aligned} \quad (5)$$

- integrálny činiteľ pohltania:

$$\alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi}$$

Pre tieto činitele platí:

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

pre nepriesvitné materiály platí:

$$\rho + \alpha = 1$$

a pre čierne teleso platí:

$$\alpha = 1$$

2.3 Priestorový uhol

Priestorový uhol je dôležitá geometrická veličina používaná vo svetelne technických výpočtoch. Jeho veľkosť je určená veľkosťou plochy vyťatej obecnou kužeľovou plochou na povrchu jednotkovej kružnice, ktorej stred (vrchol priestorového uhlu) je totožný s vrcholom uvažovanej kužeľovej plochy. Jednotkou priestorového uhlu je steradián (sr), určený jednotkovou plochou (1m^2) na povrchu jednotkovej gule (s polomerom 1m).

Priestorový uhol Ω , pod ktorým je zo stredu gule s polomerom r viditeľná plocha A vyťatá na povrchu tejto gule, sa stanoví zo vzťahu

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad [\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}] \quad (6)$$

kde: Ω – priestorový uhol

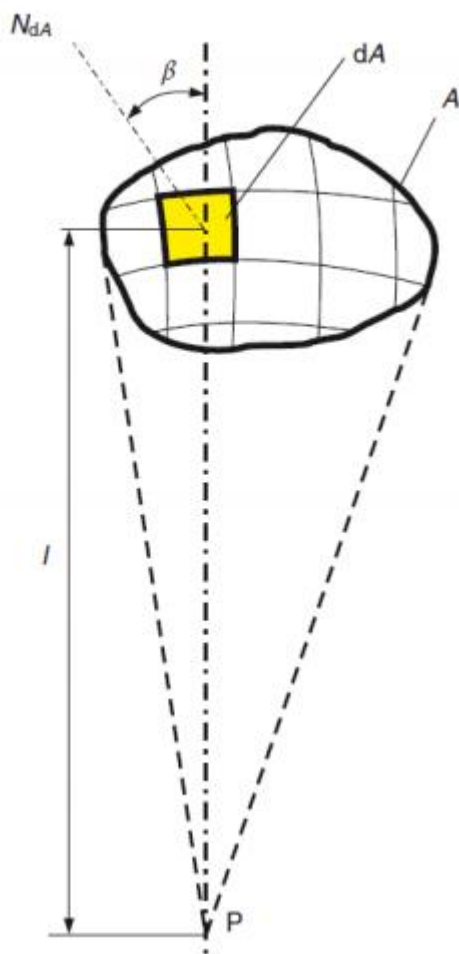
A - vyťatá plocha na povrchu gule

r - polomer gule

Priestorový uhol elementárnej plochy dA obcej plochy pozorovanej z bodu P (na Obr. xX) vo vzdialenosti l , sa určí zo vzťahu

$$d\Omega = \frac{dA \cos \beta}{l^2} \quad [\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}, -] \quad (7)$$

kde: β - uhol, ktorý zvierá os priestorového uhlu $d\Omega$, tj. paprsok l s normálou N_{dA} plochy dA [1].



Obr. 1 - K výpočtu priestorového uhlu, pod ktorým je z bodu P vidieť plocha A [1]

2.4 Osvetlenosť

Osvetlenosť E rovinatej plochy dA , je definovaná ako plošná hustota svetelného toku $d\Phi_d$ dopadajúceho na plochu dA a je určená vzťahom

$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad [\text{lx}; \text{lm}, \text{m}^2] \quad (8)$$

kde: E - osvetlenie

$d\Phi$ - množstvo svetelného toku dopadajúceho na plochu dA

dA - plocha, na ktorú dopadá svetelný tok $d\Phi$

Ak osvetľujeme bodovým zdrojom Z zo vzdialenosti l plochu dA tvoriacu okolie bodu P v rovine ρ (Obr. XX) a ak zvierá normála N_ρ roviny ρ uhol β s paprskom l , je možné pre osvetlenie $E_{P\rho}$ v bode P roviny ρ bodovým zdrojom použiť výraz

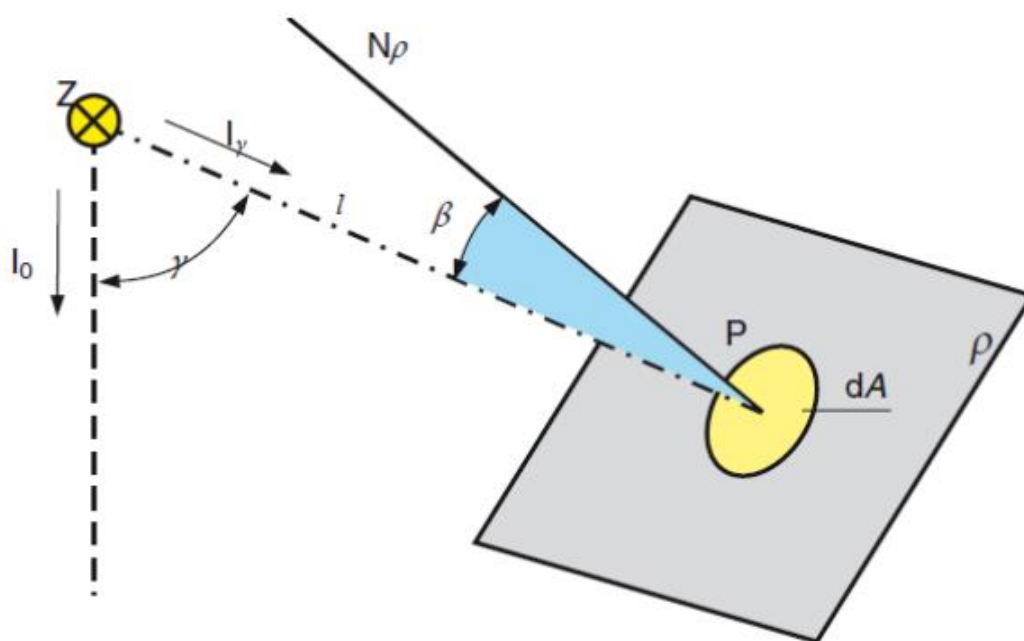
$$E_{p\rho} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cos \beta \quad [\text{lx}; \text{cd}, \text{m}, -] \quad (9)$$

kde: $E_{p\rho}$ - osvetlenosť roviny v okolí bodu P

I_γ - svietivosť bodového zdroja v smere paprsku l

l - vzdialenosť bodového zdroja od bodu P

β - uhol medzi normálou roviny ρ a paprskom



Obr. 2 - K výpočtu osvetlenosti bodovým zdrojom Z v bode P umiestnený v rovine ρ [1]

Z rovnice (9) vyplýva, že osvetlenosť bodovým zdrojom je nepriamo úmerná druhej mocnine vzdialenosti osvetľovanej plochy od zdroja (tzv. zákon štvorca vzdialenosti) a priamo úmerná kosínusu uhla β dopadu svetelných paprskov (Lambertov kosínusový zákon). Najväčšia je teda osvetlenosť plochy dA v smere normály N_ρ ($\beta=0$) [1].

2.5 Svietivosť

Svietivosť $I_{\gamma\zeta}$ svietidla v smere určenom uhlami γ, ζ je ako priestorová hustota vyžarovaného svetelného toku rovná svetelnému toku obsiahnutému v jednotkovom priestorovom uhle a je daná vzťahom

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad [\text{cd}; \text{lm}, \text{sr}] \quad (10)$$

kde: $d\Omega_{\gamma\zeta}$ - priestorový uhol, ktorého os leží v smere určenom uhlami γ, ζ a v ktorého medziach uvažovaný zdroj či svietidlo vyžaruje tok $d\Phi$

$I_{\gamma\zeta}$ - svietivosť svietidla v smere určenom uhlami γ, ζ

$d\Phi$ - vyžarovaný svetelný tok

Svietivosť sa stanovuje podľa vzťahu (10) pre zdroj či svietidlo, ktoré leží vo vrchole priestorového uhlu $d\Omega_{\gamma\zeta}$, teda teoreticky v jednom bode. Preto je svietivosť definovaná iba pre bodový zdroj, prípadne pre svietidlo bodového typu, tj. Pre taký zdroj či svietidlo, ktorého vyžarovacia plocha má rozmery zanedbateľné v porovnaní so vzdialenosťou kontrolného bodu od vrcholu priestorového uhlu $d\Omega_{\gamma\zeta}$.

Jednotkou svietivosti je *kandela* (cd), ktorá patrí k základným jednotkám sústavy SI.

V prípade, že sa zistia hodnoty svietivosti svietidla vo všetkých smeroch priestoru a nanesú sa priestorovo od svetelného stredu zdroja ako *radiusvektory*, dostane sa spojením všetkých koncových bodov týchto *radiusvektorov* *fotometrická plocha svietivosti*. Pri výpočtoch obvykle postačuje poznať len niektoré rezy touto plochou, a to rovinami prechádzajúcimi bodovým zdrojom. V rovinách rezov tak vzniknú čiary (krivky) svietivosti v polárnych súradniciach (Obr.3). Počiatok diagramu svietivosti sa umiestňuje do svetelného stredu zdroja či svietidla. Základný či vzťahový smer diagramu svietivosti, od ktorého sa merajú uhly, sa obvykle umiestňuje do smeru normály k hlavnej vyžarovacej ploche zdroja či svietidla [1]. Jednotlivé krivky svietivosti sa získavajú meraním na goniofotometri a matematicky je ich možné popísať nasledovným vzťahom

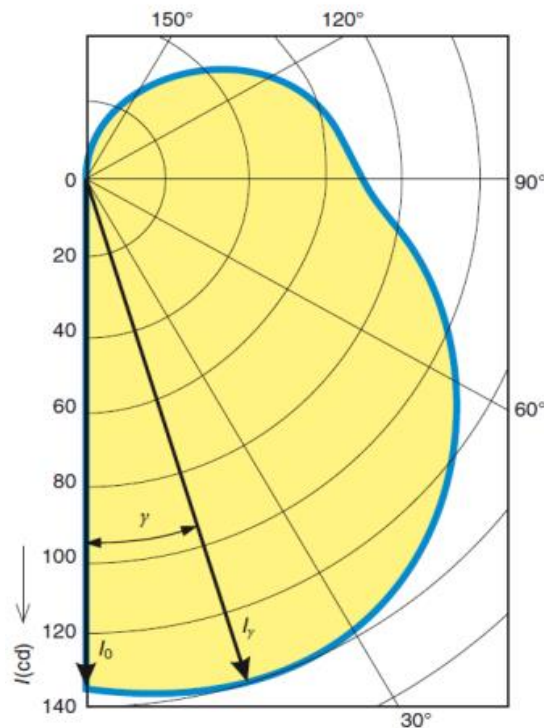
$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad [\text{cd}; \text{cd}, -] \quad (11)$$

kde

I_{γ} – svietivosť prečítaná z uvažovaného diagram svietivosti (Obr.3), pod uhlom γ od vzťahového smeru

I_0 – svietivosť uvažovaného zdroja vo vzťahovom smere

$f_I(\gamma)$ – charakteristika funkcie (indicatrix) svietivosti, matematická funkcia popisujúca (aproximujúca) uvažovanú krivku svietivosti



Obr.3 - Čiary svetivosti v polárnych súradniciach [1]

2.6 Farebný podnet

Žiarenie, charakterizované určitým spektrálnym zložením a svetelným tokom či jasom, ktorý vniká do oka pozorovateľa a budí farebný vnem, sa označuje názvom *farebný podnet*.

Spektrálne zloženie farebného podnetu sa popisuje krivkou pomerného spektrálneho zloženia farebného podnetu, tj. priebehom závislosti pomernej spektrálnej hustoty žiarivého toku $\varphi_{e\lambda}$ na vlnovej dĺžke λ . Hodnoty funkcie $\varphi_{e\lambda}(\lambda)$ sú vzťahované napr. k maximálnej hodnote

$$\Phi_{e\lambda max} = \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{max} \quad [W \cdot m^{-1}; W, m] \quad (12)$$

závislosti spektrálnej hustoty žiarivého toku na vlnovej dĺžke, tj. pre vlnovú dĺžku λ bude:

$$\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \frac{\Phi_{e\lambda}}{\Phi_{e\lambda max}} = \frac{\left(\frac{d\Phi_{e\lambda}(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda}}{\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{max}} \quad (13)$$

Pri hodnotení farebných vlastností predmetov sa pracuje s pomerným spektrálnym zložením odrazeného žiarenia, tj. s veličinou $\varphi_{e\lambda\rho}(\lambda) = \varphi_{e\lambda}(\lambda) \rho(\lambda)$ alebo prepusteného žiarenia, tj. s veličinou $\varphi_{e\lambda\tau}(\lambda) = \varphi_{e\lambda}(\lambda) \tau(\lambda)$.

Z uvedeného vyplýva, že vnem farby je fyzikálne určený spektrálnym zložením farebného podnetu, čo je objektívne merateľná fyzikálna realita nezávislá na zrakovom orgáne [1].

2.7 Zrakový vnem

Zrakový vnem človeka je z pohľadu spektrálnych vlastností svetla ovplyvňovaný troma základnými komponentami, ktorými sú zdroj svetla (spektrálne zloženie žiarivého toku), prostredie (svetelne technické vlastnosti povrchov pozorovaných predmetov) a zrakový orgán (spektrálna citlivosť oka). Výsledný vizuálny vnem je ovplyvnený vzájomnou interakciou týchto troch komponent [3].

2.7.1 Vplyv zdroja svetla

Svetlo je médium, ktoré človeku sprostredkúva informácie o okolitom prostredí. Podľa zdroja svetla, rozlišujeme svetlo prirodzené a svetlo umelé. Prirodzeným zdrojom svetla je Slnko. Umelé zdroje svetla sú rôzne typy žiaroviek. Prirodzené svetlo sa od svetla umelého líši hlavne intenzitou a spektrálnym zložením. Z fyzikálneho hľadiska je svetlo v podstate elektromagnetické žiarenie, ktoré prenáša energiu vo forme elektromagnetických vln alebo fotónov. Základnou časťou elektromagnetického žiarenia je jedna vlna, ktorá prenáša určité kvantum energie a je charakterizovaná vlnovou dĺžkou λ (nm). Elektromagnetické žiarenie je zložené z veľkého množstva vln. Toto žiarenie sa podľa vlnových dĺžok delí na svetlo monochromatické a svetlo zložené. Monochromatické svetlo je zložené z vln rovnakej vlnovej dĺžky, kdežto svetlo zložené obsahuje vlny rôznych vlnových dĺžok. V prípade, že svetlo obsahuje všetky vlnové dĺžky, nazýva sa biele svetlo. Vďaka vlnovej povahe elektromagnetického žiarenia, ho môžeme graficky znázorniť podľa vlnovej dĺžky. Ak žiarenie usporiadame podľa vlnovej dĺžky, získame spektrum elektromagnetického žiarenia. Spektrum elektromagnetického žiarenia v rozsahu vlnových dĺžok 380-760nm je schopné vyvolať zrakový vnem a je nazývané viditeľné žiarenie [3].

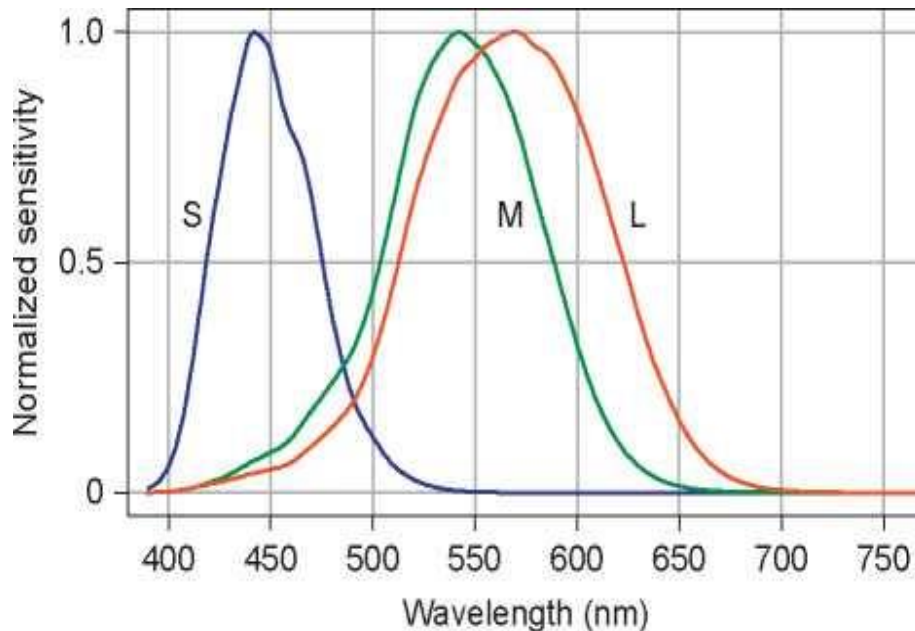
2.7.2 Vplyv prostredia

V reálnom svete žiarivý tok vychádza zo zdroja do okolitého priestoru, prechádza prostredím a dopadá na povrchy predmetov. Pri priechode a dopade dochádza k rôznym interakciám medzi žiarením, prostredím a povrchmi. Medzi tieto interakcie patrí odraz, lom, prestup, polarizácia, ohyb, interferencia, rozptyl, pohltenie a rozklad. Pravdepodobne najdôležitejšou interakciou z pohľadu množstva sprostredkovaných vizuálnych informácií o okolitom prostredí je odraz. Je to dej, pri ktorom sa svetelné paprsky dopadajúce na určitý povrch odrážajú a správajú sa podľa týchto zákonov: -dopadajúci paprsok, odrazený paprsok a normála k odrazenému povrchu ležia v rovnakej rovine -uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu. Podľa charakteru materiálu, môže materiál vykazovať zrkadlový, zmiešaný alebo difúzny odraz. Zrkadlový odraz je spravidla spektrálne nezávislý a spektrálne zloženie odrazeného žiarenia je zhodné so žiarením dopadajúcim. Pri difúznych povrchoch je odraz zvyčajne spektrálne závislý a výsledné množstvo a spektrálne zloženie odrazeného žiarivého toku závisí na spektrálnom zložení dopadajúceho žiarivého toku a na spektrálnom priebehu činiteľa odrazu povrchu [3].

2.7.3 Zrakový orgán

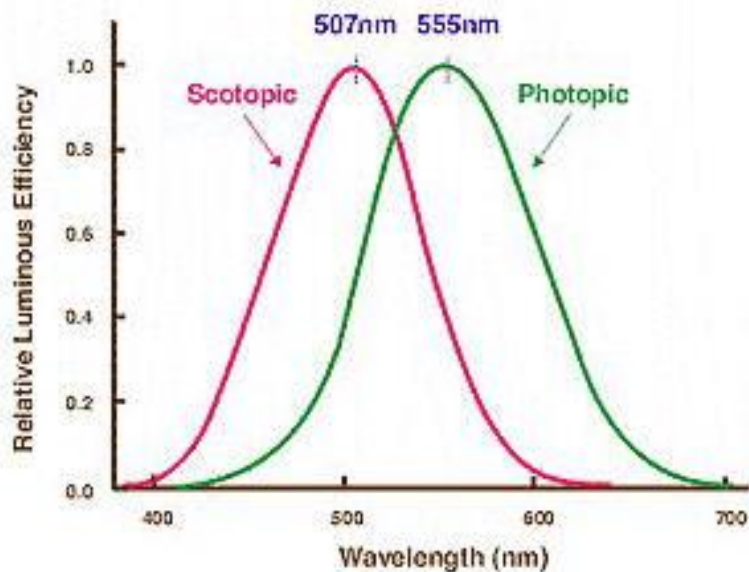
Za zrakový vnem sú zodpovedné dva typy sietnicových fotoreceptorov: čapíky- umožňujú zrakový vnem pri podmienkach s vysokým jasom a tyčinky- umožňujú zrakový vnem pri podmienkach so slabým jasom. Čapíky sú koncentrované uprostred sietnice (časť nazývaná

fovea) a sú veľmi malé (priemer $2\ \mu\text{m}$). Tyčinky sú asi 4-krát väčšie a sú umiestnené na okraji sietnice. V závislosti na spektrálnej citlivosti, sa čapíky delia do týchto skupín: L – long-wavelengths sensitive M - mid- wavelengths sensitive S – short- wavelengths sensitive Kombináciou týchto skupín, mozog vytvára farebný vnem.



Obr.4 - Spektrálna citlivosť S,L,M čapíkov

Spektrálna citlivosť oka je priamo závislá a ovplyvnená úrovňou osvetlenia, keďže úroveň osvetlenia ovplyvňuje aktivitu čapíkov a tyčínok. V závislosti na úrovni osvetlenia rozlišujeme tri druhy videnia: -fotokopické- denné videnie, uplatňujúce sa pri jasoch väčších ako $10\ \text{cd}/\text{m}^2$. Pri týchto podmienkach, je citlivosť ľudského zraku popisovaná spektrálna citlivosť $V(\lambda)$ oka normálneho fotometrického pozorovateľa -skotopické- nočné videnie, uplatňujúce sa pri adaptačných jasoch menších než $0,001\ \text{cd}/\text{m}^2$. Pri týchto podmienkach nie je možné rozlišovať farby a jemné detaily. Pri týchto podmienkach, je citlivosť ľudského zraku popisovaná spektrálna citlivosť $V'(\lambda)$ oka normálneho fotometrického pozorovateľa -mezopické-videnie medzi fotokopickým a skotopickým videním. Uplatňuje sa pri jasoch medzi $0,001$ do $10\ \text{cd}/\text{m}^2$. Aktivita čapíkov a tyčínok teda závisí na úrovni osvetlenia, ktoré je ovplyvnené úrovňou jasov pozorovaného objektu a pozadia objektu. Jednotkou osvetlenia sietnice je Troland, definovaný ako osvetlenie sietnice na 1mm^2 plochy zreničky jasom $1\text{cd}/\text{m}^2$ [3].



Obr.5 - Spektrálna citlivosť oka pri fotoskopickom a skotopickom videní [11]

2.8 Kolorimetria

Kolorimetria je náuka i meraní farieb. Pri bežnom vyjadrovaní, vlastnosť svetla a predmetu nazývame farbou. Vo vnemovej oblasti, farbu sveta charakterizujeme farebným tónom, sýtosťou, jasnosťou a svetlosťou.

Farebný tón je vlastnosť zrkového pocitu, ktorá definuje danú farbu napr. červená, pomarančová a pod.

Sýtosť je vlastnosť zrkového pocitu, ktorá umožňuje posúdiť podiel čistej pestrej farby pri celkovom pocite.

Jasnosť je vlastnosť zrkového pocitu, ktorá vyvára dojem, že časť zorného poľa vydáva viac alebo menej svetla.

Svetlosť je vlastnosť zrkového pocitu, podľa ktorej usudzujeme, že teleso rozptýlene odráža alebo prepúšťa väčšiu alebo menšiu časť dopadajúceho svetla.

Farbu, ktorá sa vyznačuje farebným tónom, nazývame pestrou. Pestré farby tvoria spektrálne svetlá, čisté purpury a ich zmesi s bielym svetlom.

Farbu, ktorá sa nevyznačuje farebným tónom, nazývame nepestrou. Nepestré farby predstavuje oblasť bielych svetiel.

V oblasti merania farieb, farbu svetla označujeme názvom chromatickosť a farbu názvom kolorita.

Chromatickosť sa udáva trichromatickými alebo prirodzenými farebnými súradnicami.

Kolorita sa udáva chromatickosťou a relatívnou intenzitou svetla, povrchom predmetu odrazeného alebo z predmetu vystupujúceho (činiteľom jasu), pri osvetlení definovaným bielym svetlom [2].

2.8.1 CIE XYZ

Na opis farebných podnetov najčastejšie používame trichromatické sústavy. Vieme, že každý farebný podnet môžeme nahradiť zmesou troch merných svetiel X, Y, Z kolorimetrickej sústavy. Kolorimetrické množstvá merných svetiel X, Y, Z nazývame trichromatickými zložkami.

Trichromatické zložky X, Y, Z sú určené vzťahmi

$$X = \int \Phi_{e\lambda} \bar{x}_\lambda d\lambda \quad (14)$$

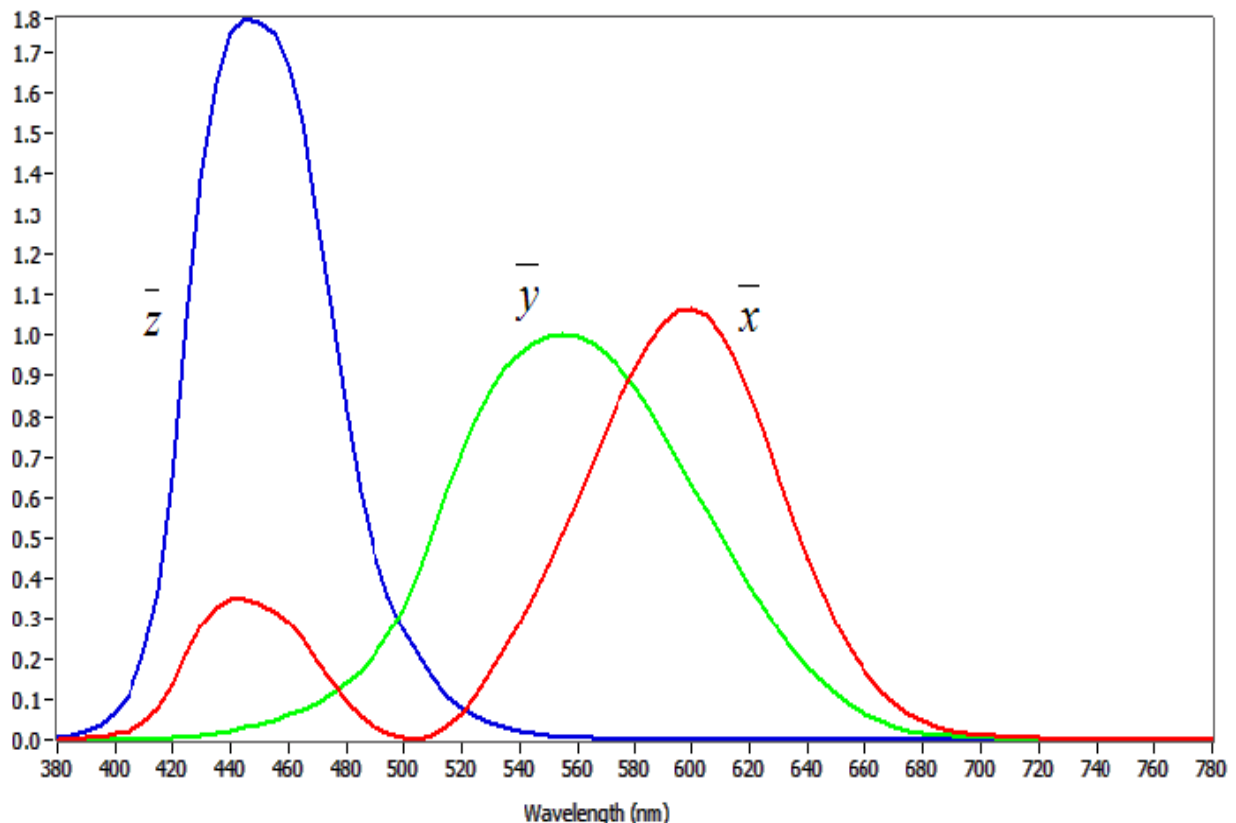
$$Y = \int \Phi_{e\lambda} \bar{y}_\lambda d\lambda \quad (15)$$

$$Z = \int \Phi_{e\lambda} \bar{z}_\lambda d\lambda$$

kde $\Phi_{e\lambda}$ je žiarenie určitej intenzity a spektrálneho žiarenia a

$\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ sú trichromatické činitele.

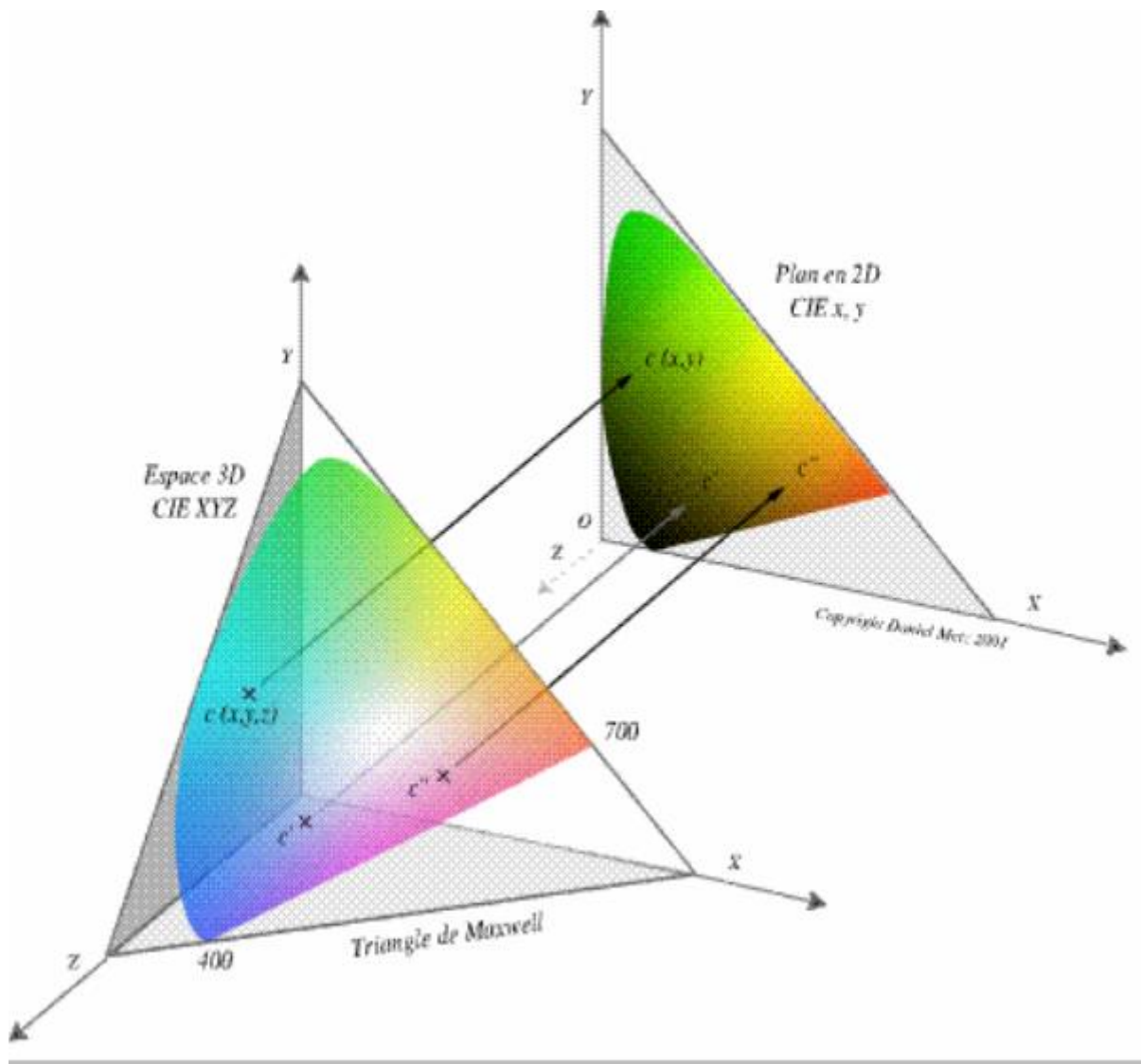
Trichromatické činitele $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ predstavujú pomerné kolorimetrické množstvá merných svetiel X, Y, Z , ktoré opisujú jednotlivé spektrálne svetlá izoenergetického spektra.



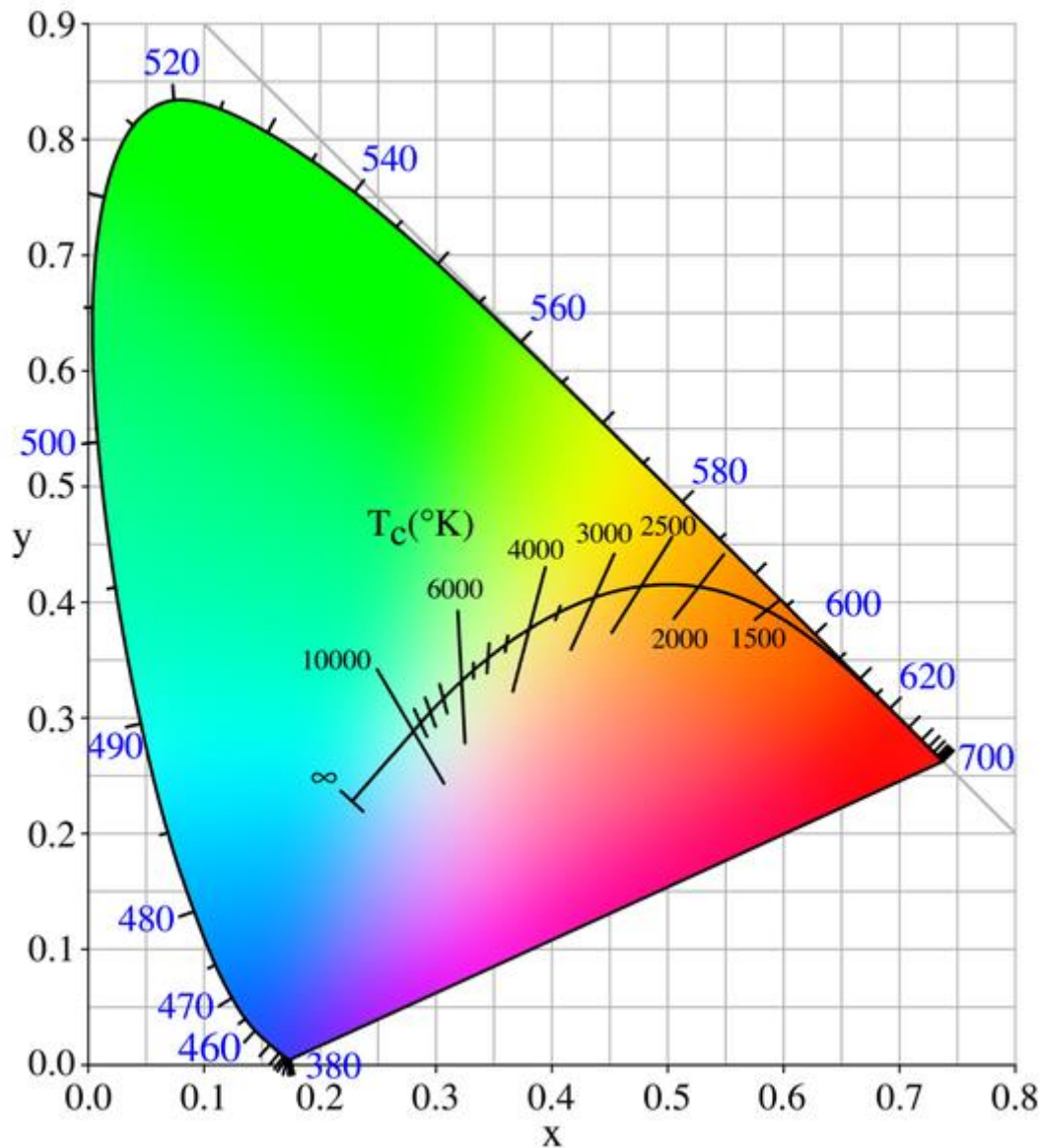
Obr.6 - Funkcie trichromatických činiteľov [12]

Hodnoty \bar{y}_λ sa zhodujú s hodnotami pomernej svetelnej účinnosti monochromatického žiarenia pri dennom videní. To znamená, že hodnota trichromatickej zložky Y je úmerná intenzite farebného podnetu.

Hodnoty trichromatických zložiek X, Y, Z môžeme znázorniť v trojrozmernom priestore (Obr.13). Pretože priestorové zobrazenie je veľmi nepraktické, používa sa pre geometrické znázornenie farebného podnetu kolorimetrický trojuholník x, y (obr.), ktorý je rovinným rezom kolorimetrického priestoru XYZ . [2]



Obr.7 - Rovinný rez kolorimetrického priestoru CIE XYZ [13]



Obr.8 Kolorimetrický priestor CIE XYZ [13]

V kolorimetrickom trojuholníku x, y je chromatickosť vyjadrená dvoma súradnicami.

Trichromatické súradnice x, y, z sú definované vzťahmi

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \tag{16}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Súradnicu z nie je nutné uvádzať, pretože automaticky vyplýva zo vzťahu

$$x + y + z = 1$$

V medzinárodnej kolorimetrickej sústave XYZ sa volia fyzikálne nerealizovateľné merné svetlá. Je to kvôli tomu, že v takomto prípade sú trichromatické zložky a teda aj súradnice všetkých reálnych farieb kladné.

V kolorimetrickom priestore XYZ a v jeho rovinnom reze (tj. v kolorimetrickom trojuholníku x,y) neodpovedajú v rôznych miestach rovnaké lineárne vzdialenosti rovnakým subjektívne vnímaným rozdielom vnemu farby. Tam, kde je potrebné rozdiely chromatickosti svetiel či kolority predmetu popísať charakteristikami odpovedajúcimi subjektívnemu vnemu, sa používajú *rovnomerné kolorimetrické priestory*. Od roku 1976 sú medzinárodne normalizované dve takéto sústavy [2].

2.8.2 sRGB

Je to farebný priestor vytvorený spoločnosťami HP a Microsoft, ktorého úlohou je dopĺňanie súčasných potrieb pri správe farieb. V súčasnosti vznikla potreba operácie s farbami v digitálnom svete, hlavne pri operáciách s farbami v operačných systémoch, rôznych zariadeniach a na internete. sRGB teda ponúka jednoduchý spôsob definovania farieb v digitálnom svete.

Daná farba, môže byť vo farebnom priestore sRGB definovaná, pomocou jednoduchšej matematickej transformácie zo štandardných hodnôt CIE XYZ. Keďže farba definovaná v RGB je vlastne definovaná množstvom červenej, zelenej a modrej v celkovom farebnom podnete, je nutné definovať tieto jednotlivé farby v CIE XYZ farebnom priestore [4].

Hodnoty červenej, zelenej, modrej farby a CIE štandardného iluminantu vo farebnom priestore CIE XYZ			
	X	Y	Z
Červená	0,64	0,33	0,03
Zelená	0,3	0,6	0,1
Modrá	0,15	0,06	0,79
D65	0,3127	0,329	0,3583

Trichromatické zložky sRGB priestoru sú lineárnou kombináciou súradníc v priestore CIE XYZ a získame ich z nasledovných vzťahov

$$\begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} = \begin{matrix} R \\ [M]G \\ B \end{matrix} \quad (17)$$

teda

$$\begin{matrix} R & X \\ G & = [M]^{-1}Y \\ B & Z \end{matrix} \quad (18)$$

kde M^{-1} je inverzná matica k matici M a pre farebný priestor sRGB a pre referenčnú bielu farbu rovnú CIE štandardnému iluminantu D65 je definovaná nasledovne

$$[M]^{-1} = \begin{matrix} 3,2404542 & -1,5371385 & -0,4985315 \\ -0,9692660 & 1,8760108 & 0,0415560 \\ 0,0556434 & -0,2040259 & 1,0572252 \end{matrix} \quad (19)$$

trichromatické zložky sRGB sú následne transformované na nelineárne sR'G'B' zložky podľa nasledovných vzťahov

$$\begin{aligned} R' &= 12,92R \\ G' &= 12,92G \\ B' &= 12,92B \end{aligned}$$

pre $R, G, B \leq 0,00304$

$$R' = 1,055R^{\frac{1}{2,4}} - 0,055 \quad (20)$$

$$G' = 1,055G^{\frac{1}{2,4}} - 0,055$$

$$B' = 1,055B^{\frac{1}{2,4}} - 0,055$$

pre $R, G, B > 0,00304$

Nakoniec sú nelineárne hodnoty sR'G'B' prevedené na 8 bitové hodnoty, ktoré sa používajú v digitálnom svete nasledovne

$$R_{8bit} = 255R' \quad (21)$$

$$G_{8bit} = 255G'$$

$$B_{8bit} = 255B'$$

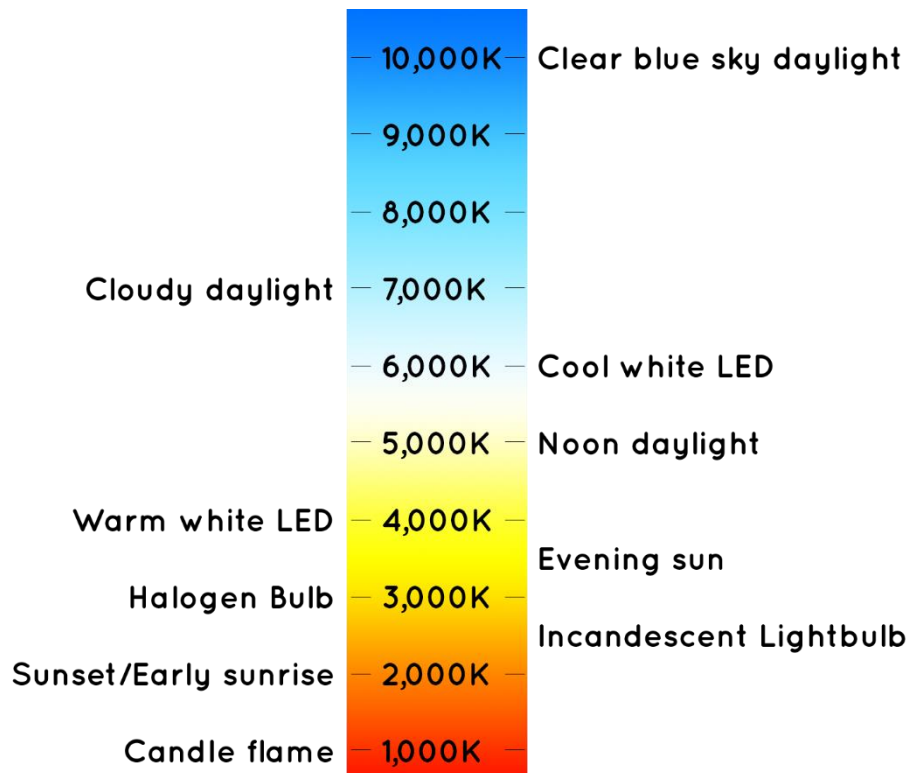
2.9 Teplota chromatickosti

Teplota chromatickosti (correlated color temperature) je vlastnosť zdroja svetla, pomocou ktorej je možné opísať farebné vlastnosti daného zdroja svetla. Teplota chromatickosti je rovná teplote čierneho telesa, ktorého žiarenie ma rovnakú chromatickosť ako uvažované žiarenie [5]. Udáva sa v Kelvinoch (K). Podľa teploty chromatickosti, sa svetelné zdroje delia na “teplé” a “studené”.

Teplé zdroje svetla: CCT < 3200 K

Studené zdroje svetla: CCT > 4000 K

Teplota chromatickosti nám dáva informácie o farebných vlastnostiach svetelného zdroja, ale nedáva informáciu o spektrálnom zložení tohto zdroja. Preto sa dva žiariče môžu zdať rovnaké, čo sa týka farby, ale ich efekt na osvetľovaný objekt môže byť iný.



Obr.9 - Príklady jednotlivých teplôt chromatickosti

3. Meranie spektrálneho zloženia svetla a svetelne technických veličín

3.1 Meracie prístroje

3.1.1 Spektrometer

Základná funkcionálnosť spektrometra je v tom, že dopadajúce svetlo rozdelí na spektrálne časti, zdigitalizuje ako funkciu vlnovej dĺžky a pomocou počítača zobrazí výsledok.

Prvým krokom v tomto procese je poslať svetlo cez otvorovú štrbinu do spektrometra. Vo väčšine spektrometrov sú rozptýlené svetelné paprsky sústredené pomocou konkávneho zrkadla a nasmerované na mriežku. Mriežka následne spektrálne zložky svetla rozptýli a tie sú potom zamerané druhým konkávnym zrkadlom a zobrazené na detektore. Fotóny svetla sú následne konvertované na elektróny, ktoré sú digitalizované a prenesené pomocou dátového kábla do počítača. Softvér signál interpoluje na základe počtu elektrónov na detektore a dáta sú vynesené ako funkcia vlnovej dĺžky na určitom spektrálnom rozsahu[6].

Na účely merania bol v laboratóriu svetelnej techniky dostupný spektrometer HR8 od firmy Narran. Spektrometer sa pripojil pomocou USB k počítaču a zapol softvérovo.



Obr.10 - Spektrometer Narran HR 8 [14]

3.1.2 Luxmeter

Luxmeter je prístroj, ktorý sa v svetelnej technike používa na meranie osvetlenia. Skladá sa z prijímača s korigovaným, najčastejšie kremíkovým fotoelektrickým článkom, ktorý obsahuje kosínusový nástavec a z meracieho a vyhodnocovacieho systému s digitálnym alebo analógovým indikátorom.

Luxmetry sa bežne delia do štyroch tried presnosti označovaných číslicami 1,2,3,4 resp. písmenami L,A,B,C. Uvedeným triedam zodpovedajú najväčšie dovolené súhrnné chyby f_c luxmetrov 2,5,10 a 20%. Pri posudzovaní presnosti luxmetrov sa sleduje 11 druhov chýb (f_1 až f_{11}). Chyby f_6 až f_{11} sa zisťujú iba pri typovej skúške prístroja.

Luxmetre, ktoré vyhovujú triede presnosti 1 a 2, sa využívajú ako sekundárne etalóny a na presné laboratórne merania. Pre bežné meranie osvetlenia väčšinou postačujú prístroje s triedou presnosti 3 [1].

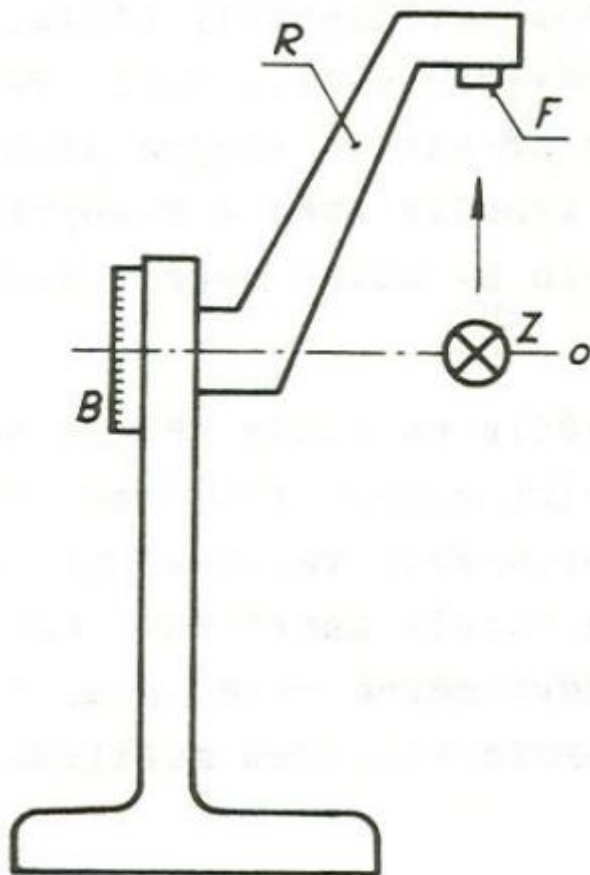
3.1.3 Goniofotometer

Zariadenie, ktoré umožňuje merať svietivosť svetelného zdroja či svietidla v rôznych rovinách a pod rôznymi uhlami. Túto požiadavku je možné splniť v zásade tromi konštrukčnými usporiadaniami

- otočný zdroj a pevný fotometer
- pevný zdroj a otočný fotometer
- pevný zdroj i fotometer a otočný zrkadlový systém

Na meranie čiar svietivosti pre túto prácu bol použitý goniofotometer druhého typu, ktorý používa fotočlánok pripnutú na rameno, ktoré sa otáča okolo zdroja či svietidla. Výhodou tohto riešenia je skutočnosť, že svietidlo či zdroj je zavesený v normálnej prevádzkovej polohe.

Goniofotometer druhého typu sa skladá z ramena R (Obr.11), na ktorom je upevnená fotočlánok F. Rameno R sa otáča okolo meraného zdroja Z umiestneného v ose otáčania o. Uhol natočenia sa odčíta na bubienku B. Zmena roviny, v ktorej sa meria krivka svietivosti sa prevádza natočením zdroja či svietidla [7].

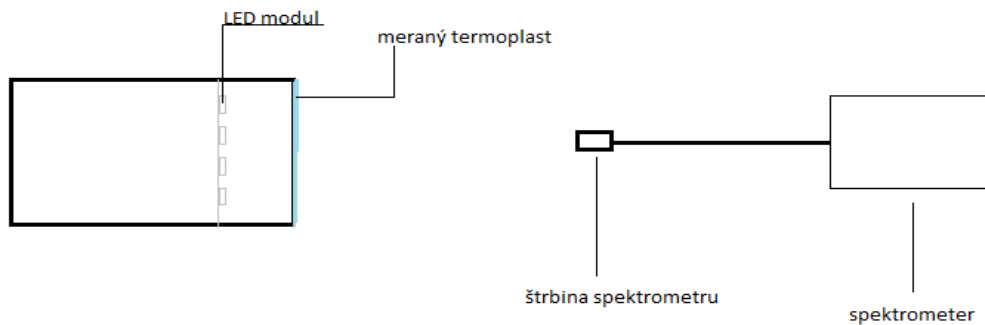


Obr.11 - Goniofotometer

Konštrukcia všetkých typov goniofotometrov musí byť dostatočne tuhá, aby nedochádzalo počas rotácie k deformácii či kývaní nosných častí, čím by sa zavádzali prídavné chyby merania.

3.2 Priebeh merania spektrometrom

Pred samotným meraním bolo potrebné pripraviť aparáturu k samotnému meraniu. Optický kábel spektrometra, ukončený štrbinou sme pripevnili na stojan. Na ďalší stojan sme pripevnili zdroj svetla, ktorým bol LED modul. Vzďialenosť medzi štrbinou spektrometra a LED modulom bola 200mm. Vzďialenosť medzi testovaným termoplastom a LED modulom bola 30mm (teda 170mm medzi spektrometrom a termoplastom).



Obr.12 - Priebeh merania spektrometrom

Meranie najskôr prebehlo pre samotný LED modul a následne pre jednotlivé vzorky termoplastov.

3.3 Spôsob merania a výpočtu jednotlivých veličín

V práci som sa venoval meraniu a výpočtom týchto svetelne technických veličín jednotlivých termoplastov

Činiteľ prestupu

Priepustnosť daného termoplastu vo viditeľnom rozsahu svetelného spektra vypočítame ako podiel svetelného toku dopadajúceho na termoplast a svetelného toku z termoplastu vychádzajúceho.

$$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi}$$

kde vstupný a výstupný svetelný tok získame zo vzťahu (3).

Určenie farby v priestore CIE XYZ

Jednotlivé trichromatické zložky X, Y, Z sa vypočítajú zo vzťahu (14). Z nich sa vypočítajú jednotlivé trichromatické súradnice x, y, z zo vzťahu (16).

Určenie farby v sRGB

Hodnoty jednotlivých zložiek R, G, B získame zo vzťahu (21).

Teplota chromatickosti

Teplotu chromatickosti svetla vchádzajúceho resp. vychádzajúceho z termoplastu získame pomocou súradníc vo farebnom priestore CIE XYZ z nasledovného vzťahu

$$CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823,3n + 5520,33 \quad (22)$$

kde

$$n = (x - 0,3320)/(0,1858) \quad (23)$$

Určenie čiar svietivosti

Čary svietivosti meriame na goniofotometri. V laboratóriu svetelnej techniky Elektrotechnickej fakulty ČVUT v Prahe, katedry elektroenergetiky je goniofotometer s otočným ramenom R , nesúci fotočlánok F v konštantnej vzdialenosti $l = 2 \text{ m}$ od meraného zdroja a fotočlánku. Čiary svietivosti v tomto prípade meriame v polrovinách fotometrickej sústavy $C - \gamma$. V danej polrovine C pre každý uhol γ zmeriame luxmetrom (ktorého čidlom je fotočlánok F umiestnený na konci ramena) osvetlenosť $E_{\gamma z}$, pre ktorú platí

$$E_{\gamma z} = \frac{I_{\gamma z}}{l^2} \quad [\text{lx}; \text{cd}, \text{m}^2] \quad (24)$$

Z rovnice (28), vyjadríme svietivosť $I_{\gamma z}$ pre hľadaný uhol, ktorá musí byť skorigovaná podľa hodnoty osvetlenosti [8]. Korigovaná svietivosť má tvar:

$$I_{\gamma} = E_{\gamma z} \cdot l^2 \cdot k_{2856} \quad [\text{cd}; \text{lx}, \text{m}^2, -] \quad (25)$$

kde: k_{2856} - priemerný. korekčný koeficient (uvedený v kalibračnom liste luxmetra)

k_{2856} - pre $E_{\gamma z} < 30 \text{ lx} = 0,993$

k_{2856} - pre $E_{\gamma z} > 30 \text{ lx} \wedge E_{\gamma z} < 300 \text{ lx} = 1,014$

V našom prípade, kde $l = 2 \text{ m}$, platí:

$$I_{\gamma} = 4 \cdot E_{\gamma z} \cdot k_{2856} \quad [\text{cd; m, lx, -}] \quad (26)$$

Činiteľ rozptylu

Činiteľ rozptylu σ je rovný podielu aritmetického priemeru hodnôt jasů meraných pod uhlami 20° a 70° a jasů v 5° od normály pri kolmom dopadu svetla [9].

$$\sigma = \frac{L(20^\circ) + L(70^\circ)}{2 \cdot L(5^\circ)} \quad [-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (27)$$

Keďže meranie prebiehalo v dvoch polrovinách, výsledný činiteľ rozptylu je rovný priemeru činiteľov rozptylu v týchto dvoch polrovinách

$$\sigma = \frac{\sigma_{C0} + \sigma_{C90}}{2} \quad [-] \quad (28)$$

Uhol polovičnej svietivosti

Uhol polovičnej svietivosti sa vypočíta z čiar svietivosti, podľa nasledovného vzťahu

$$\gamma_h = \gamma_1 + (I_h - I_{\gamma_1}) \cdot \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{I_{\gamma_2} - I_{\gamma_1}} \quad [^\circ; ^\circ, \text{cd}, \text{cd}, ^\circ, ^\circ, \text{cd}, \text{cd}] \quad (29)$$

kde: γ_H - uhol polovičnej svietivosti

γ_1 - menší uhol z intervalu 5° kde sa nachádza polovičná svietivosť

γ_2 - väčší uhol z intervalu 5° kde sa nachádza polovičná svietivosť

I_H - polovičná svietivosť

I_{γ_1} - svietivosť v uhle γ_1

I_{γ_2} - svietivosť v uhle γ_2

Keďže meranie prebiehalo v dvoch polrovinách, výsledný uhol polovičnej svietivosti je rovný priemeru uhlov polovičnej svietivosti v týchto dvoch polrovinách

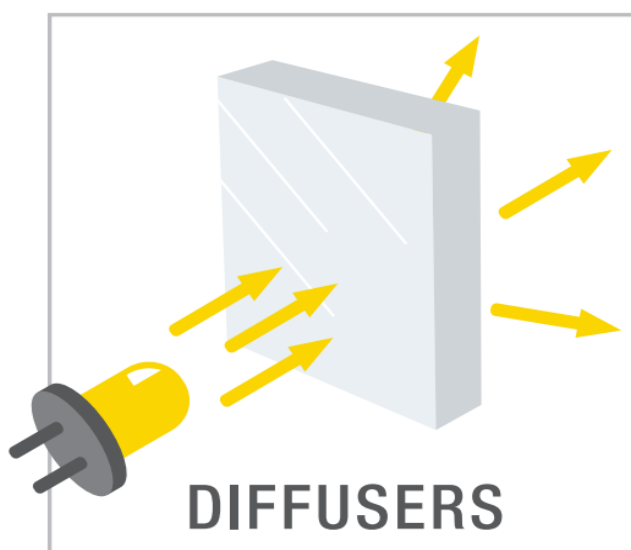
$$\gamma_h = \frac{\gamma_{HC0} + \gamma_{H90}}{2} \quad [^\circ] \quad (30)$$

4. Vzorky rozptylových termoplastov

Predmetom merania boli vzorky termoplastov od firmy Bayer. Konkrétne sa jednalo o translucenčný termoplast Makrolon, ktorý sa využíva na výrobu difúzorov svietidiel. Jednotlivé vzorky sa od seba líšili prídavkom tlansluentnej zložky a hrúbkou.

Termoplast Makrolon, ktorý sa využíva na výrobu difúzorov svietidiel je vyrábaný metódou vstrekovania plastov [10]. Podľa výrobcu termoplastu má Makrolon výborné vlastnosti pre využitie na výrobu difúzorov:

- vysoká priepustnosť svetla
- vysoký uhol polovičnej svietivosti
- vysoká krycia schopnosť svetelného zdroja



Obr.13 - Princíp difúzoru

Konkrétne sa jednalo o 5 typov translucenčných termoplastov, s hrúbkou 1 až 3 mm. Ich prehľad je zobrazený v nasledujúcej tabuľke.

Merané vzorky		
021172-1mm	021172-2mm	021172-3mm
021173-1mm	021173-2mm	021173-3mm
021180-1mm	021180-2mm	021180-3mm
021181-1mm	021181-2mm	021181-3mm
021182-1mm	021182-2mm	021182-3mm

5. Výsledky meraní a výpočtov

Keďže sa zaujímate o zmenu svetelne technických veličín pri prechode svetla termoplastom, merali sme najskôr parametre svetla, ktoré na danú vzorku termoplastu dopadá a následne parametre svetla ktoré z termoplastu vychádza. Tieto parametre (vstupné/výstupné) sú porovnané a tým zistíme aký vplyv mal daný termoplast na vlastnosti svetla.

5.1 Zmena spektrálneho zloženia a farby

V tejto časti sú zhrnuté vypočítané výsledky zmien spektrálneho zloženia a farby svetla pri prechode jednotlivými termoplastami (všetky vzorky termoplastov).

Samotný zdroj svetla (bez termoplastu)

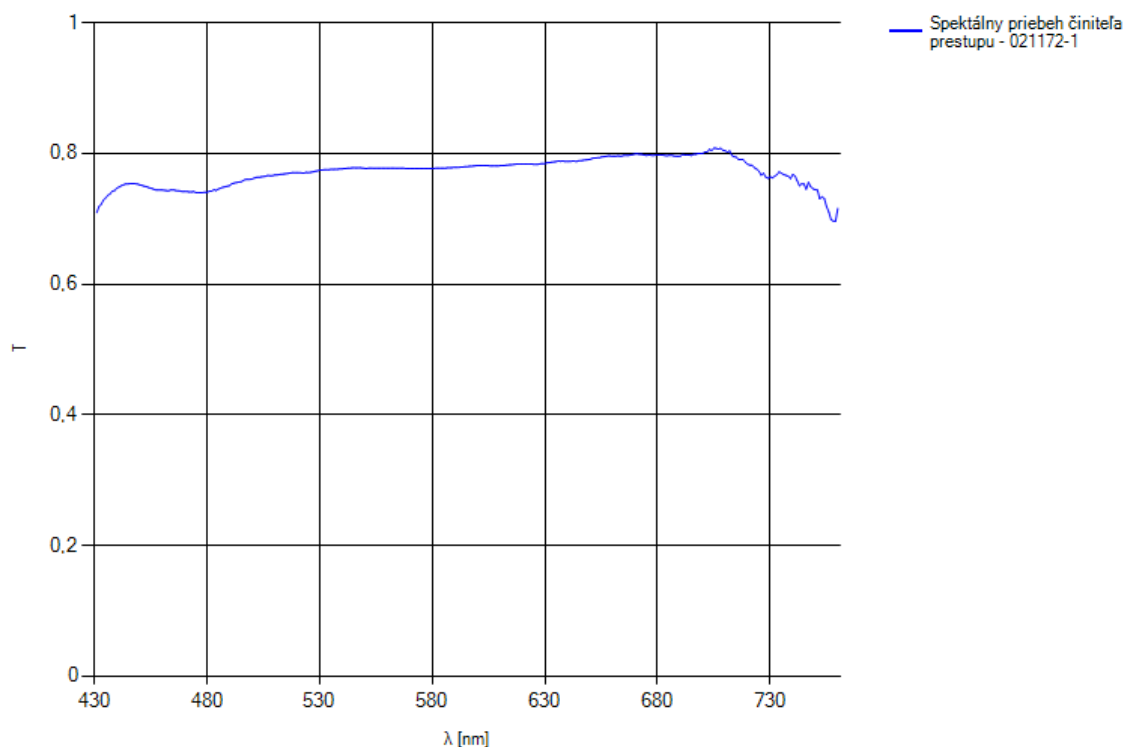
Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe XX. Z týchto dát sú vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3812 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti samotného zdroja svetla			
CCT		3812 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,3987	R	198
Y	0,4132	G	169
Z	0,1882	B	103

Vzorka termoplastu 021172-1mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.1. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,777$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3763 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021172-1mm			
τ		0,777	
CCT		3763 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4018	R	199
Y	0,4161	G	169
Z	0,1821	B	101

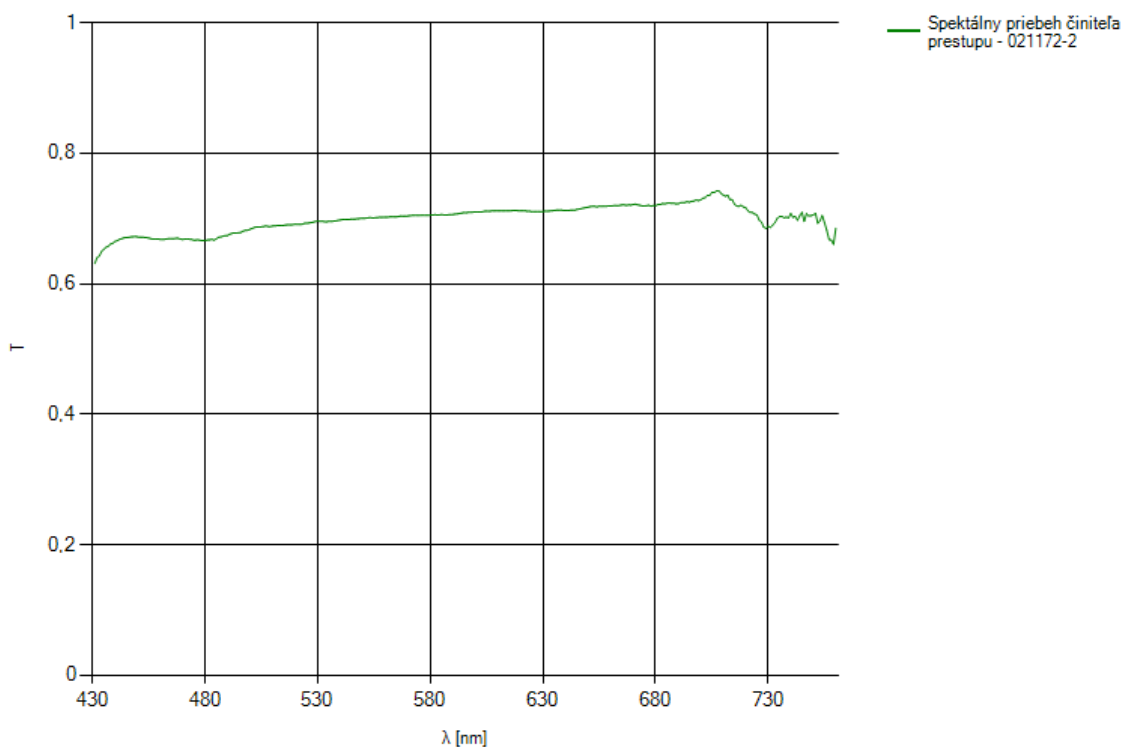


Obr.14 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021172-1mm

Vzorka termoplastu 021172-2mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.2. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,702$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3740 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021172-2mm			
τ		0,702	
CCT		3740 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4030	R	200
Y	0,4164	G	169
Z	0,1806	B	100

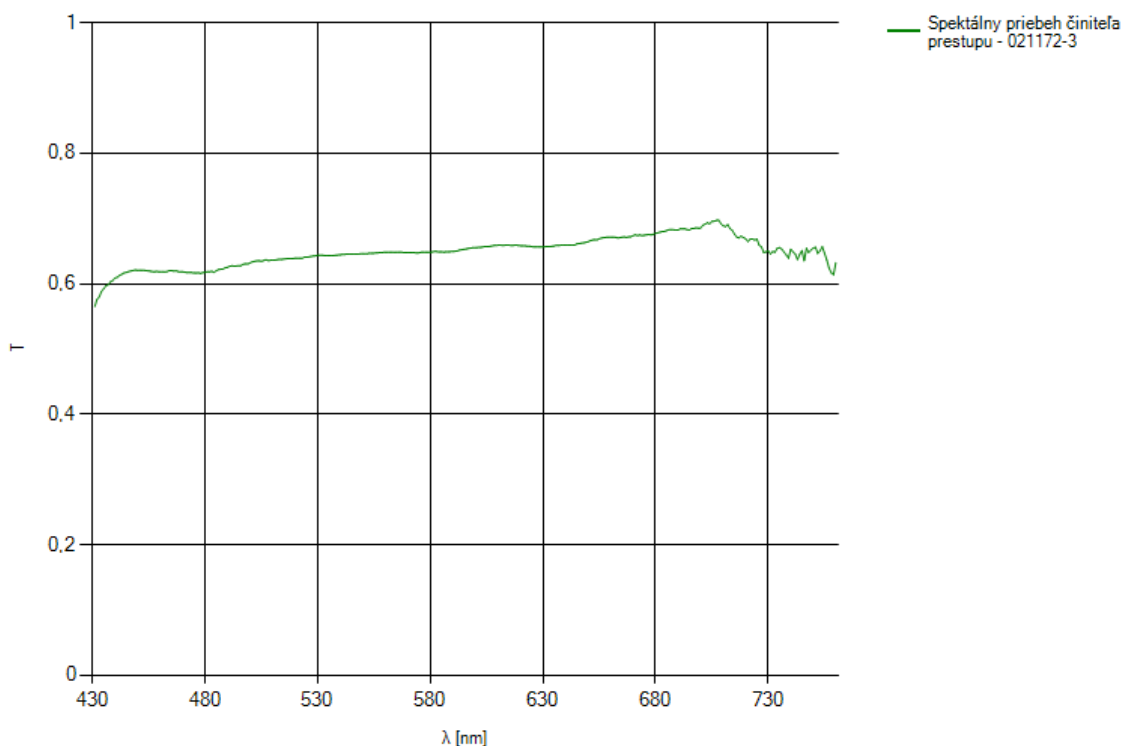


Obr.15 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021172-2mm

Vzorka termoplastu 021172-3mm

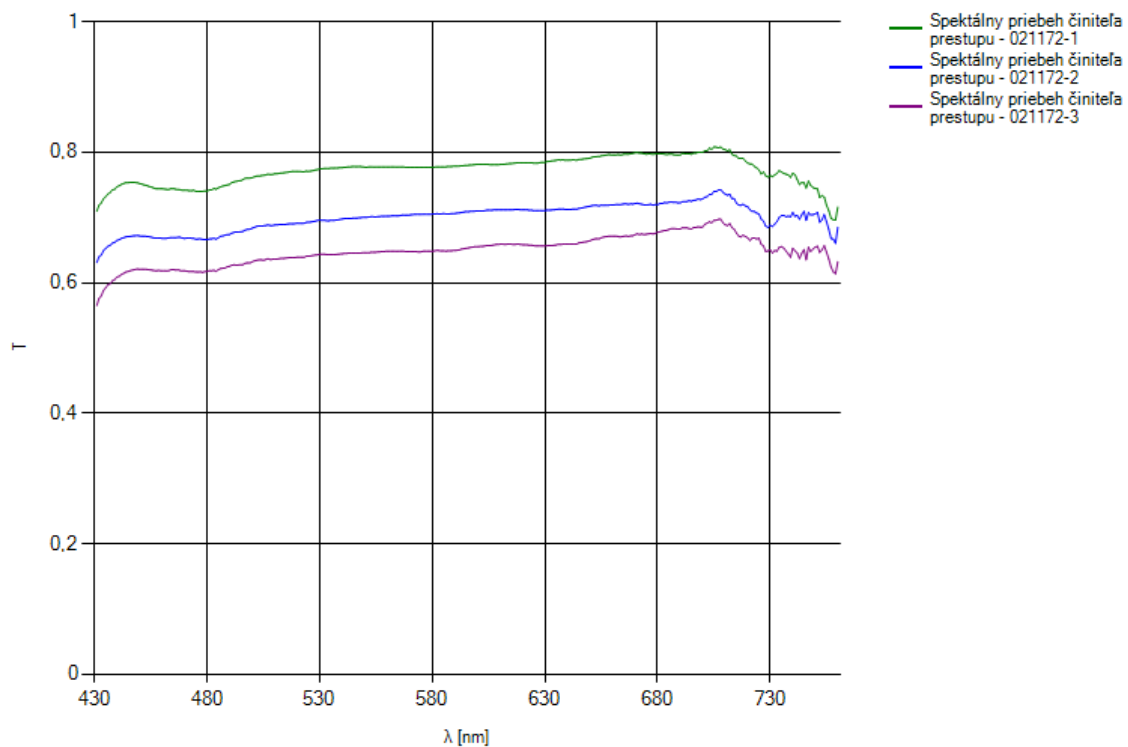
Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.3. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,648$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3739 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021172-3mm			
τ		0,648	
CCT		3739 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4031	R	200
Y	0,4165	G	169
Z	0,1804	B	100



Obr.16 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021172-3mm

Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021172

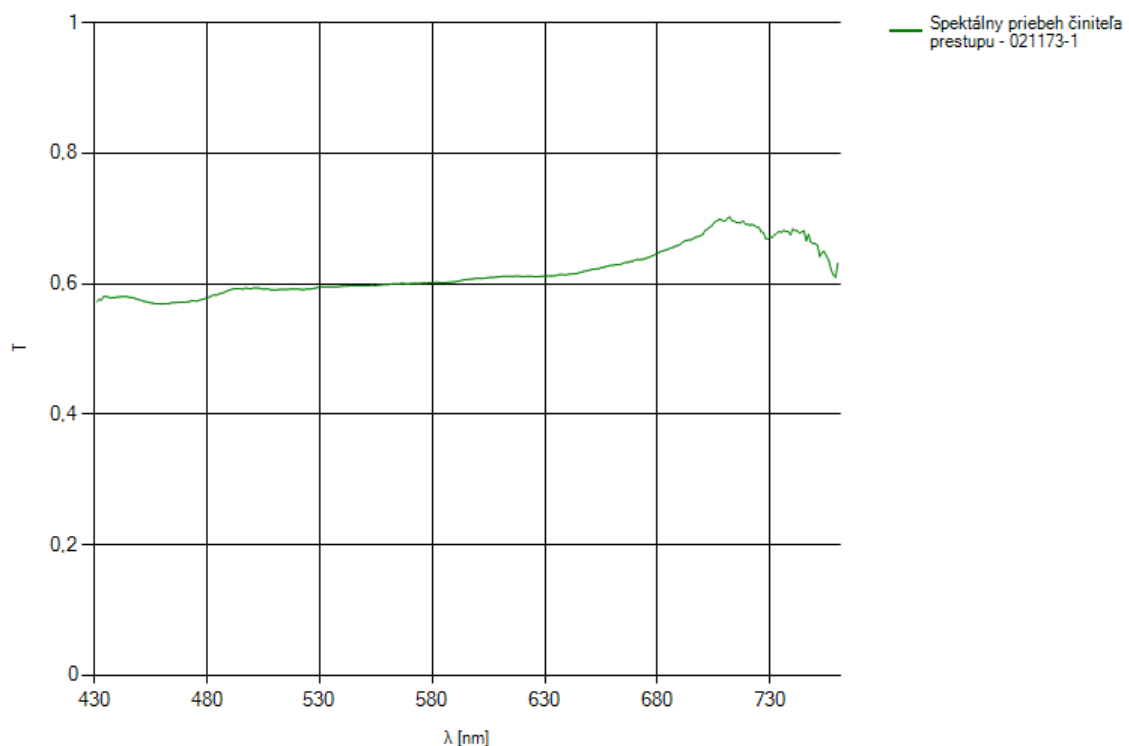


Obr.17 - Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021172

Vzorka termoplastu 021173-1mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.4. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,6$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3737 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021173-1mm			
τ		0,6	
CCT		3737 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4029	R	200
Y	0,4157	G	169
Z	0,1814	B	101

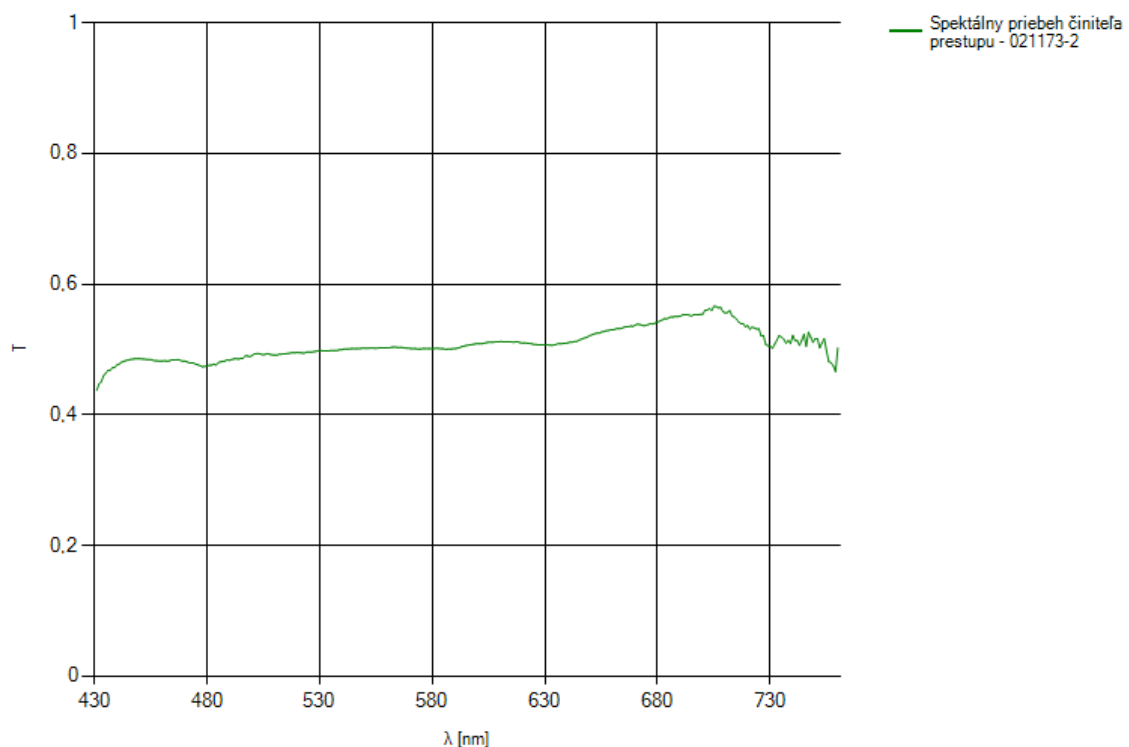


Obr.18 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021173-1mm

Vzorka termoplastu 021173-2mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.5. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,502$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3742 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021173-2mm			
τ		0,502	
CCT		3742 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4028	R	199
Y	0,4159	G	169
Z	0,1813	B	101

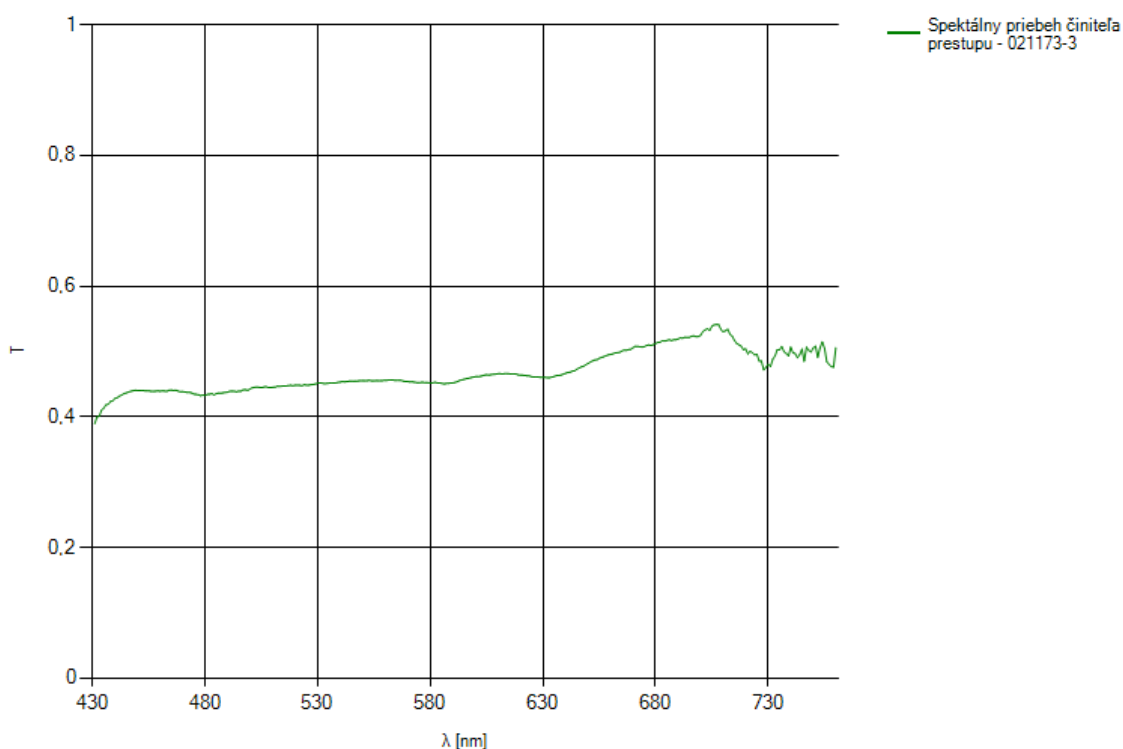


Obr.19 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021173-2mm

Vzorka termoplastu 021173-3mm

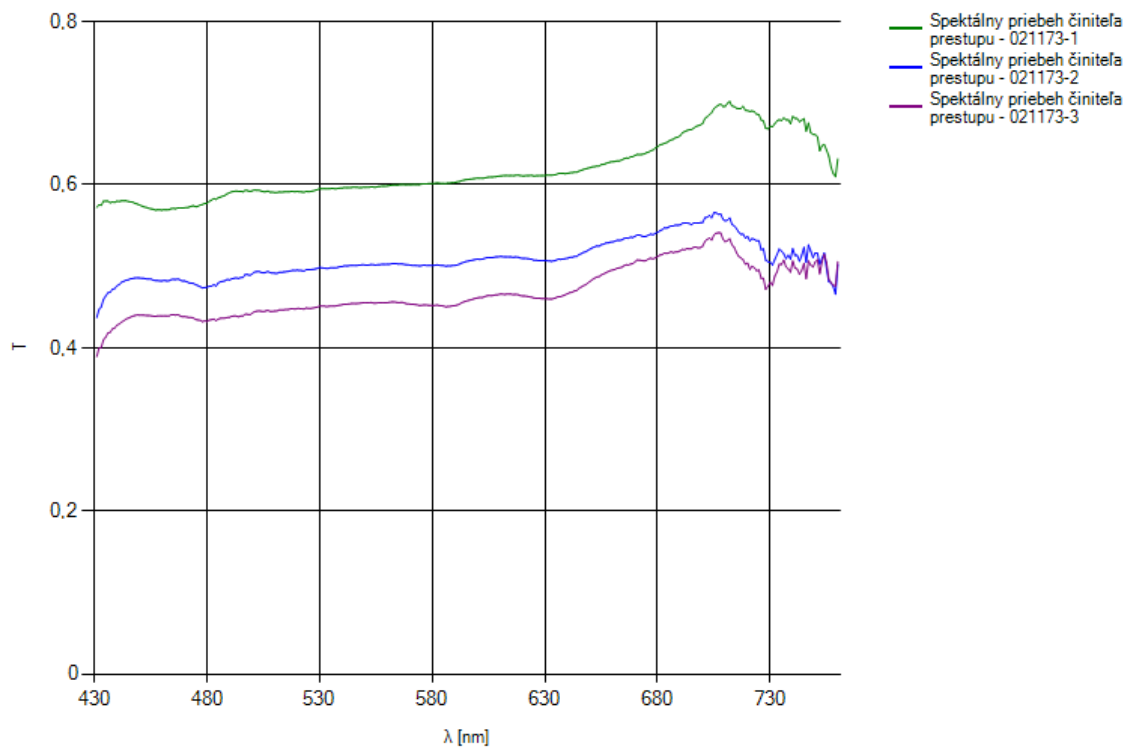
Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.6. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,455$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3735 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021173-3mm			
τ		0,455	
CCT		3735 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4031	R	200
Y	0,4158	G	169
Z	0,1812	B	101



Obr.20 Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021173-3mm

Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021173

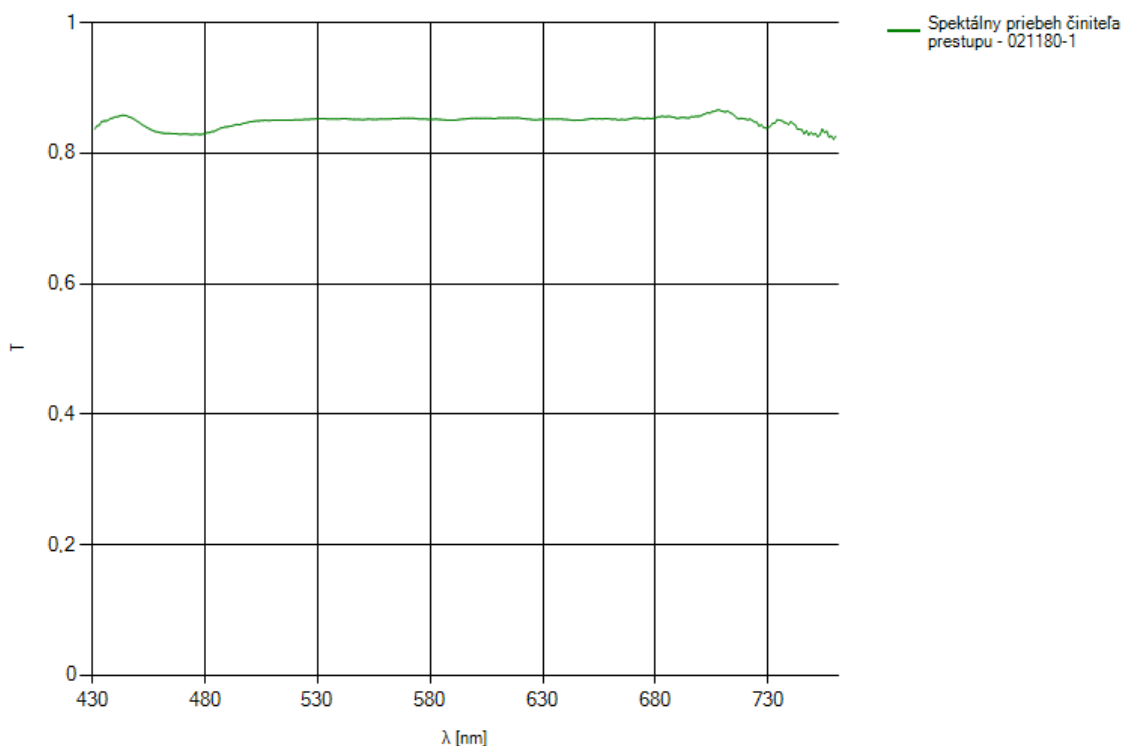


Obr.21 - Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021173

Vzorka termoplastu 021180-1mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.7. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,852$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3800 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021180-1mm			
τ		0,852	
CCT		3800 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,3995	R	198
Y	0,4141	G	169
Z	0,1864	B	103

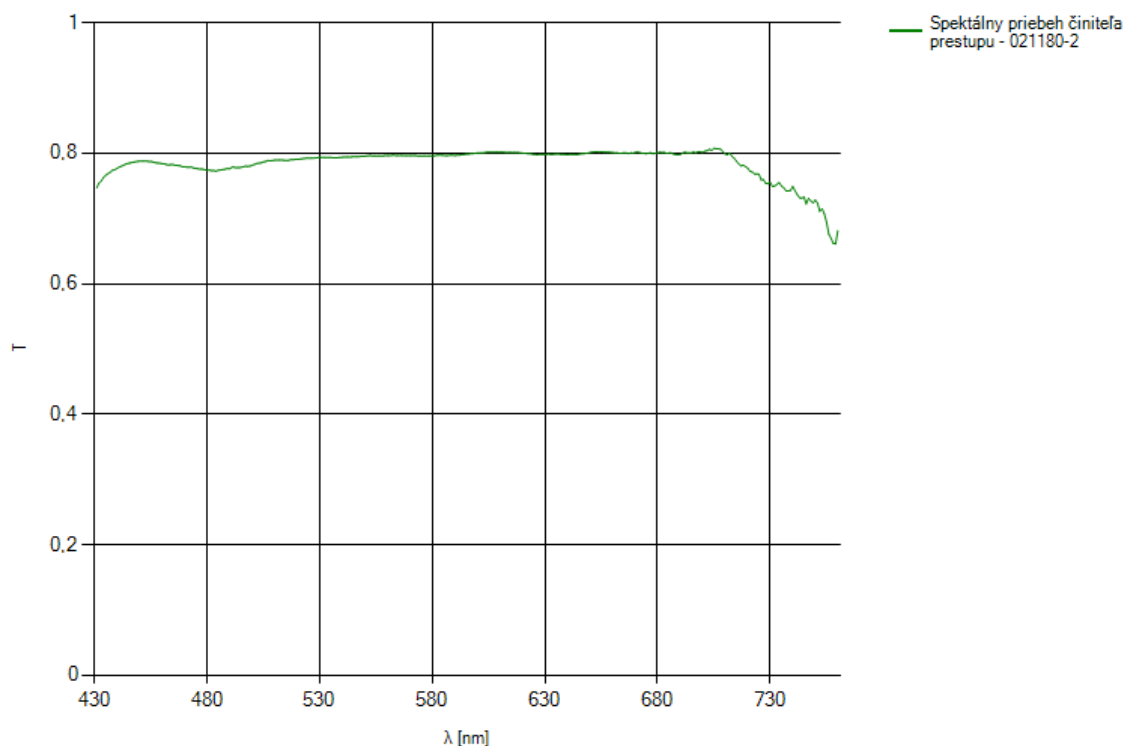


Obr.22 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021180-1mm

Vzorka termoplastu 021180-2mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.8. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,796$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3784 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021180-2mm			
τ		0,796	
CCT		3784 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4003	R	199
Y	0,4143	G	169
Z	0,1853	B	102

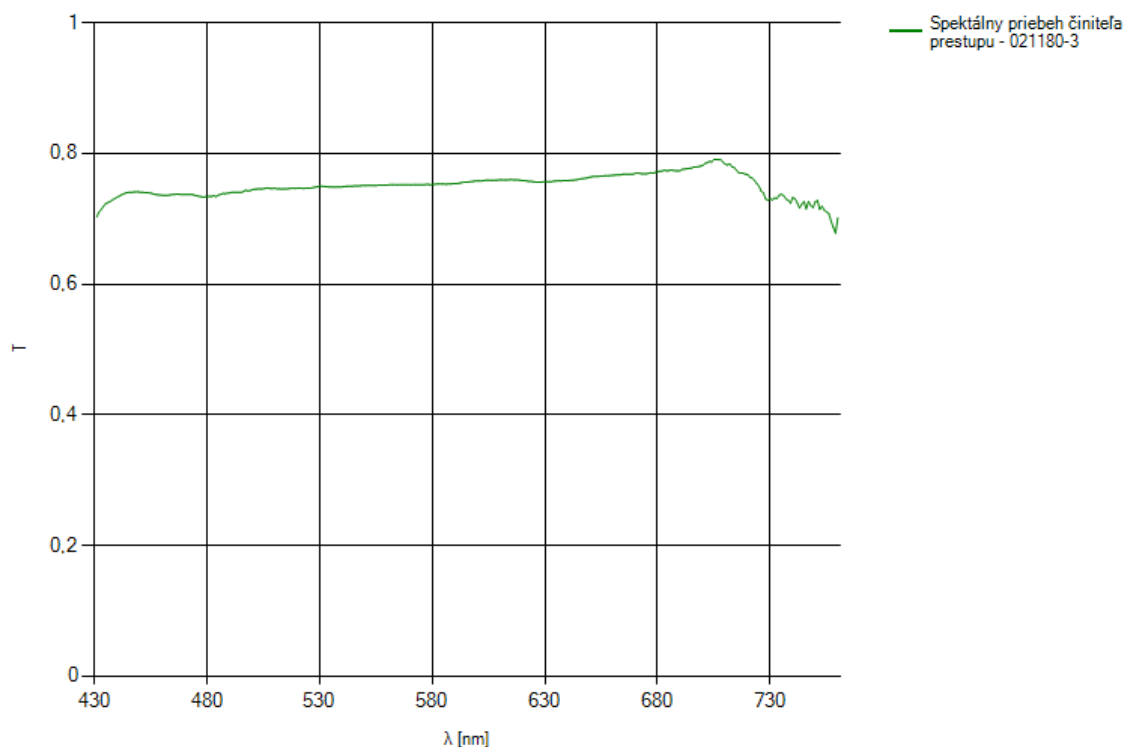


Obr.23 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021180-2mm

Vzorka termoplastu 021180-3mm

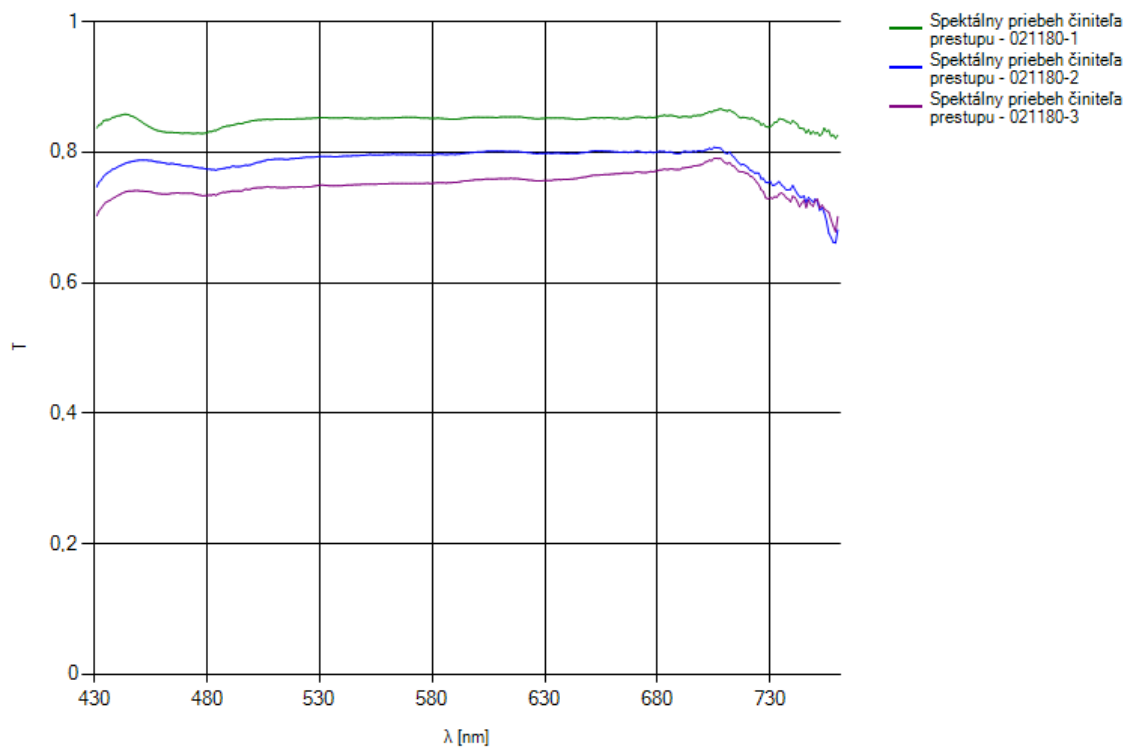
Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.9. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,752$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3775 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021180-3mm			
τ		0,752	
CCT		3775 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4008	R	199
Y	0,4145	G	169
Z	0,1848	B	102



Obr.24 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021180-3mm

Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021180

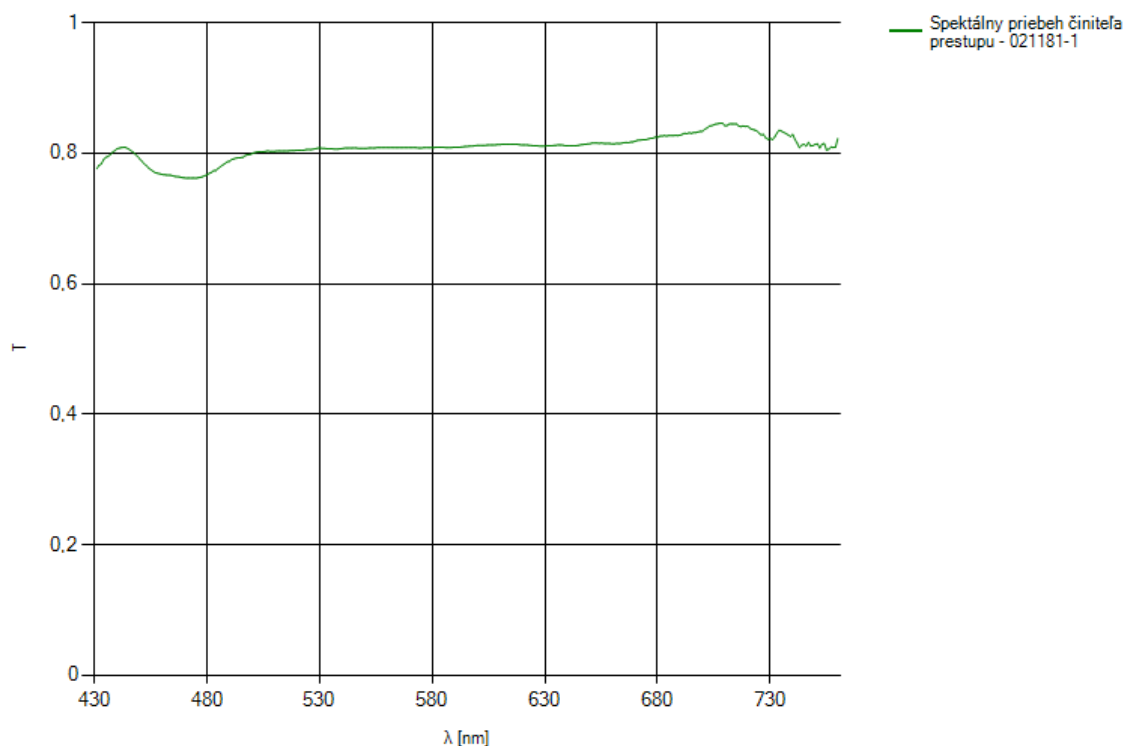


Obr.25 - Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021180

Vzorka termoplastu 021181-1mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.10. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,808$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3776 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021181-1mm			
τ		0,808	
CCT		3776 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4010	R	199
Y	0,4155	G	169
Z	0,1835	B	101

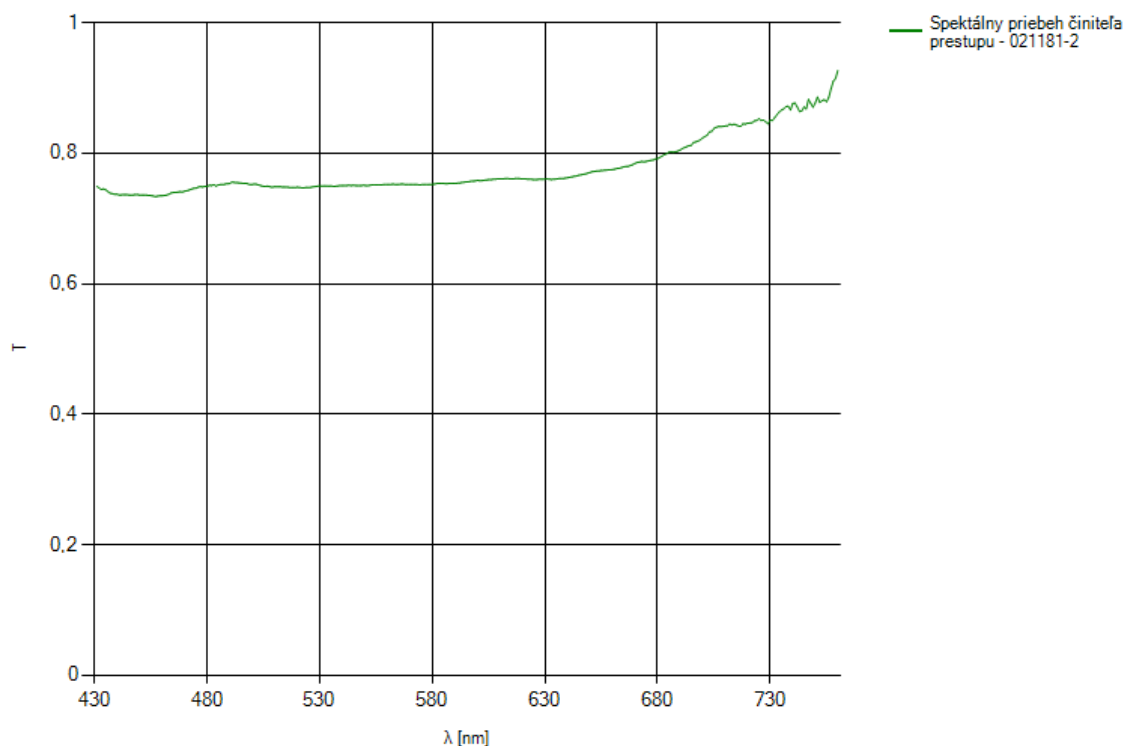


Obr.26 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021181-1mm

Vzorka termoplastu 021181-2mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.11. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,753$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3776 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021181-2mm			
τ		0,753	
CCT		3776 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4006	R	199
Y	0,4142	G	169
Z	0,1852	B	102

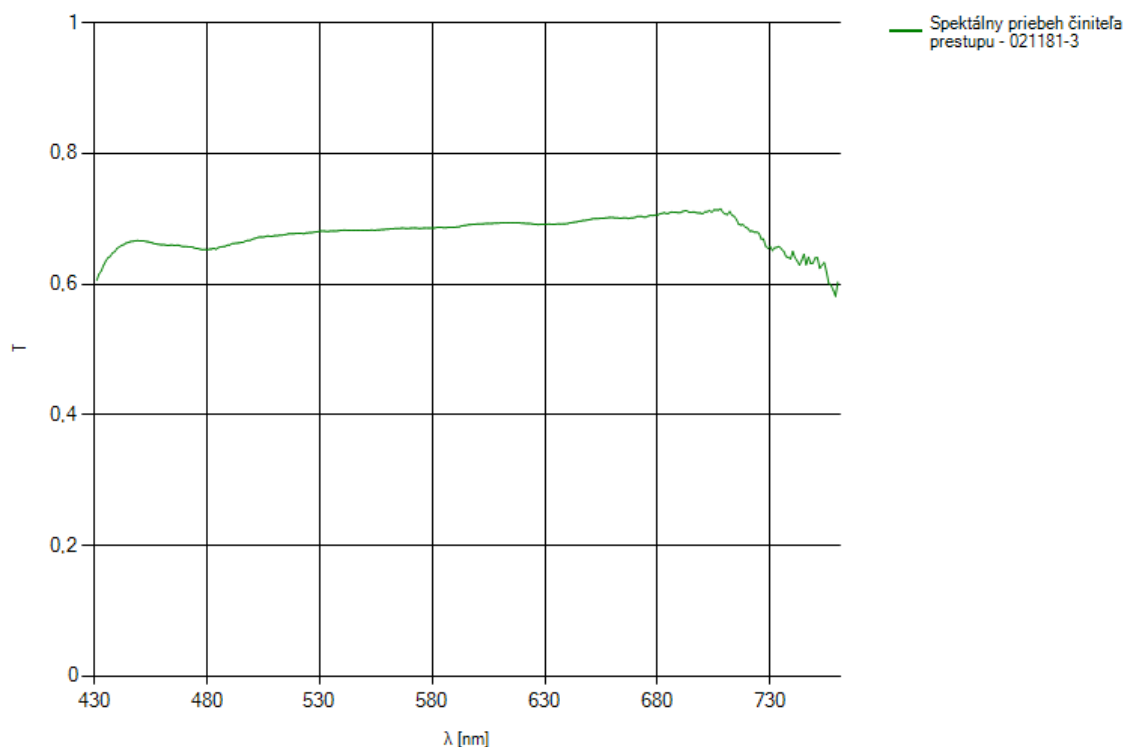


Obr.27 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021181-2mm

Vzorka termoplastu 021181-3mm

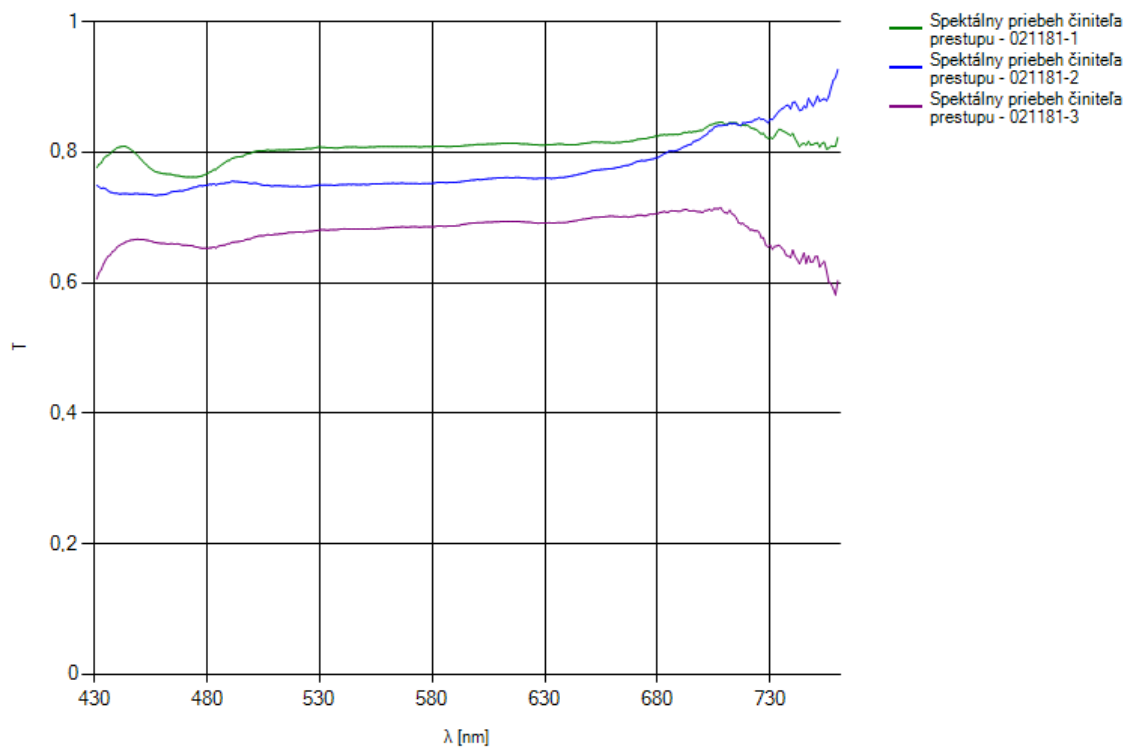
Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.12. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,684$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3753 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021181-1mm			
τ		0,684	
CCT		3753 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4022	R	199
Y	0,4157	G	169
Z	0,1822	B	101



Obr.28 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021181-3mm

Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021181

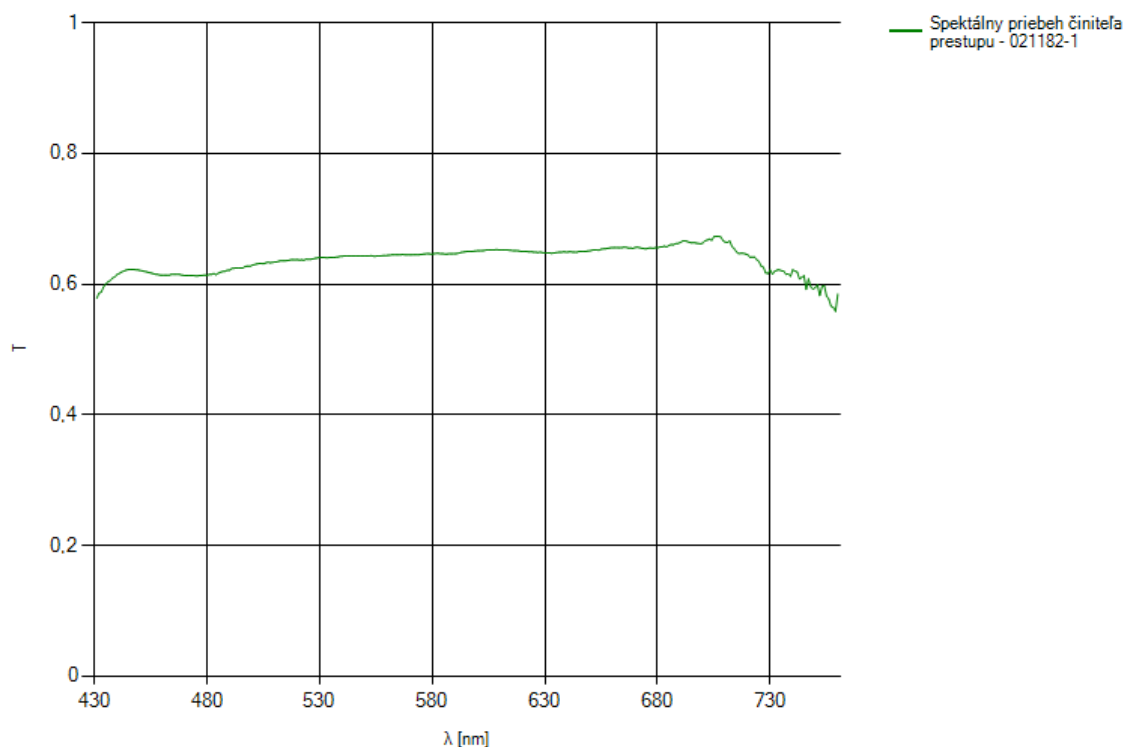


Obr.29 - Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021181

Vzorka termoplastu 021182-1mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.13. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,644$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3753 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021182-2mm			
τ		0,644	
CCT		3753 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4024	R	199
Y	0,4163	G	169
Z	0,1813	B	101

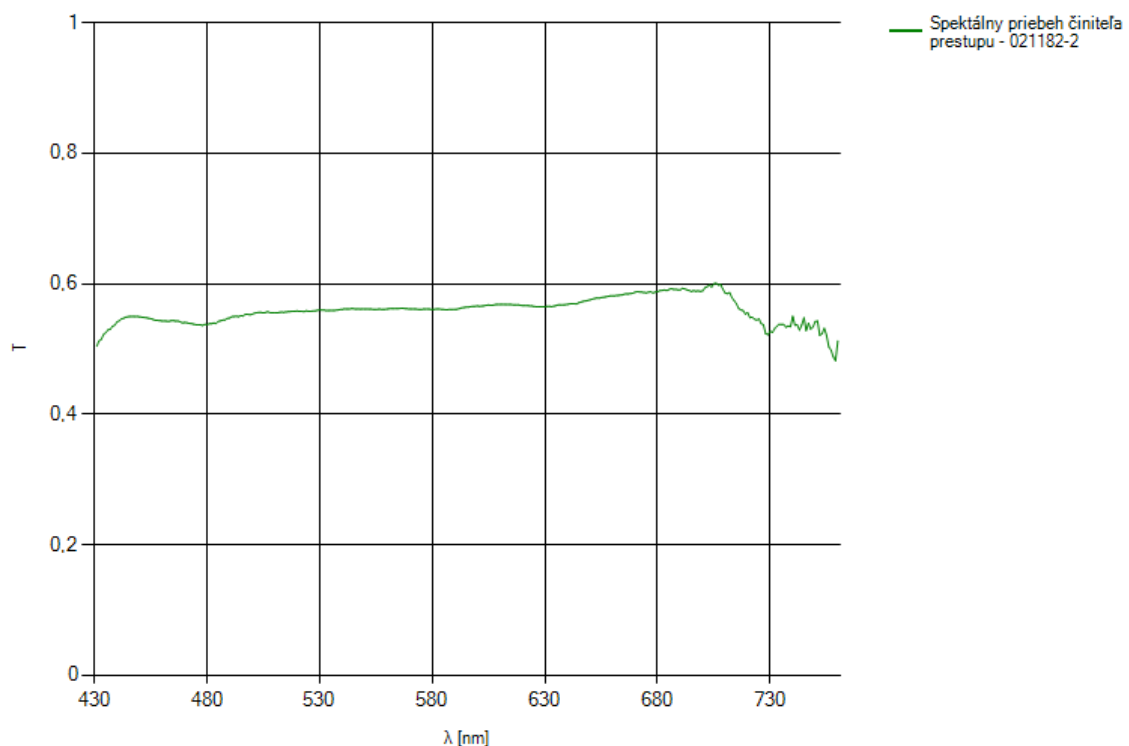


Obr.30 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021182-1mm

Vzorka termoplastu 021182-2mm

Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.14. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,561$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3765 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021182-2mm			
τ		0,561	
CCT		3765 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4016	R	199
Y	0,4155	G	169
Z	0,1830	B	101

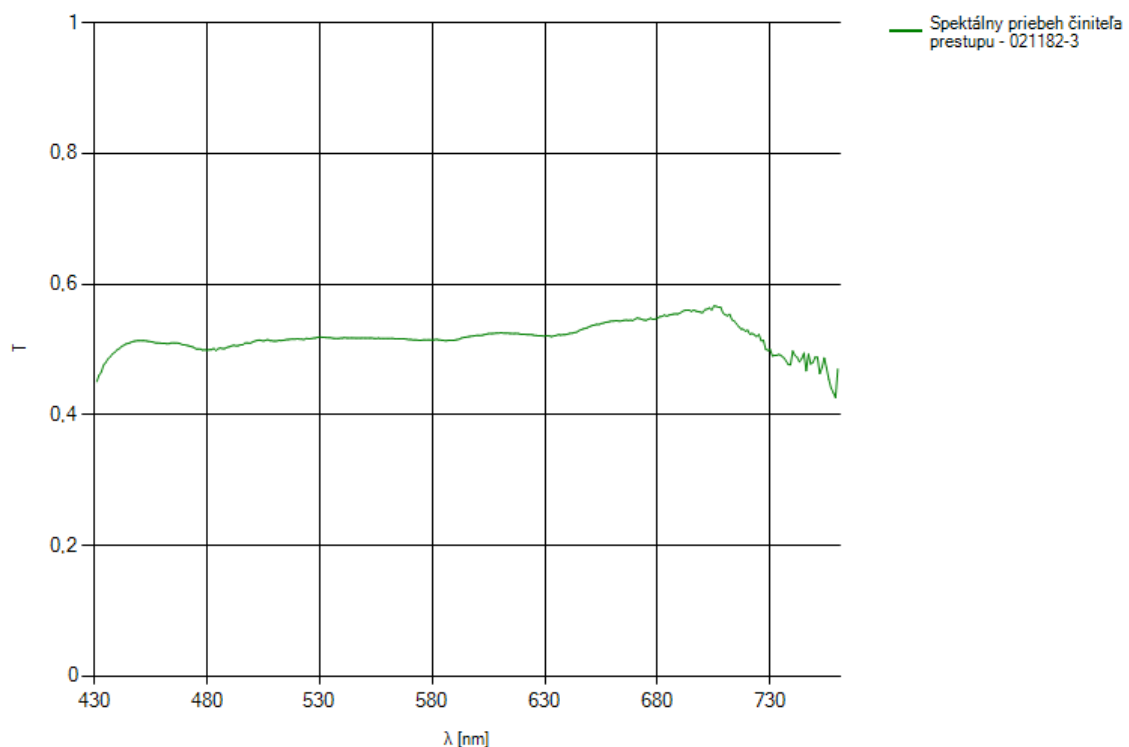


Obr.31 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021182-2mm

Vzorka termoplastu 021182-3mm

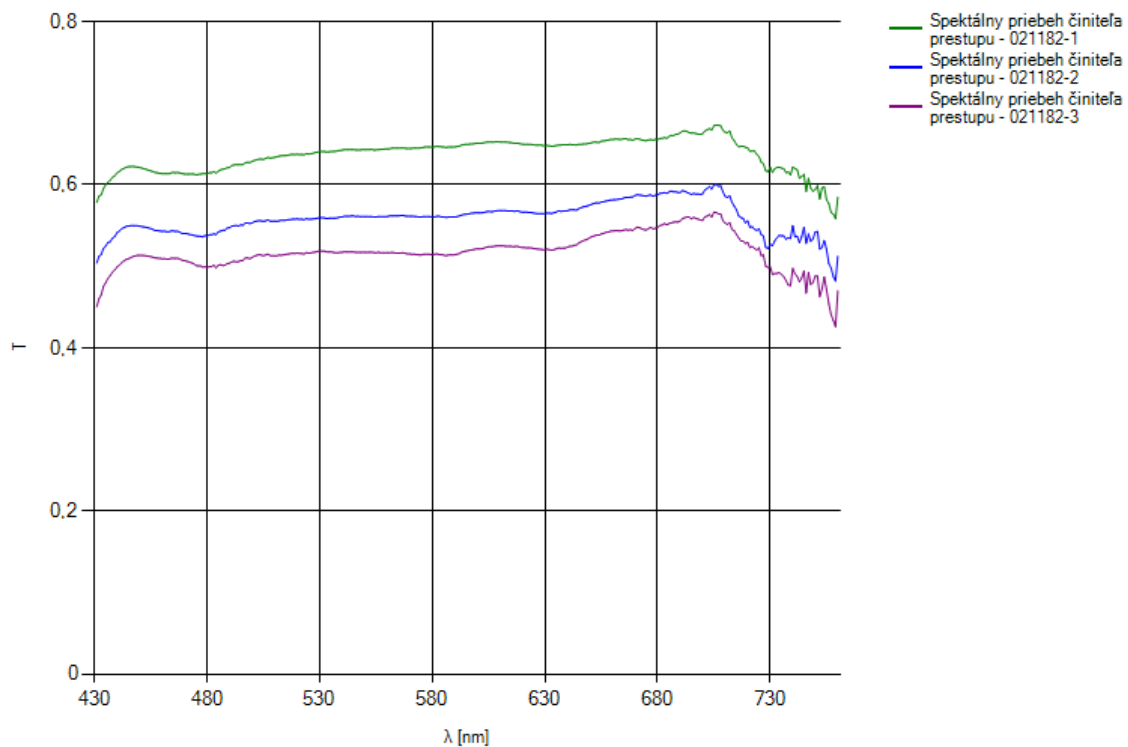
Namerané dáta zo spektrometru (spektrálna hustota žiarivého toku) sú v prílohe P2.15. Z týchto dát je vypočítaný integrálny činiteľ prestupu svetla $\tau = 0,517$. Integrálny činiteľ prestupu je vypočítaný podľa vzťahu (5). Z dát sú ďalej vypočítané súradnice vo farebnom priestore CIE XYZ. Súradnice v priestore CIE XYZ sú vypočítané podľa vzťahu (16), z ktorých je vypočítaná teplota chromatickosti. Teplota chromatickosti daného svetla je vypočítaná podľa vzťahu (22). Teplota chromatickosti pre túto vzorku termoplastu je **3774 K**. Hodnota priepustnosti termoplastu a farby svetla prechádzajúceho daným termoplastom sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Svetelne technické vlastnosti svetla prechádzajúceho termoplastom 021182-3mm			
τ		0,517	
CCT		3774 K	
Farba v CIE XYZ		Farba v sRGB	
X	0,4009	R	199
Y	0,4147	G	169
Z	0,1843	B	102



Obr.32 - Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021182-3mm

Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021182



Obr.33 - Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021182

5.2 Zmena fotometrických vlastností svetla

V tejto časti sú zhrnuté vypočítané výsledky zmien fotometrických vlastností svetla pri prechode jednotlivými termoplastami (iba termoplasty s hrúbkou 2mm).

Jednotlivé merania boli merané na goniofotometri, kde bol fotočlánok vzdialený od zdroja svetla 2m a termoplast bol od zdroja svetla vzdialený 45mm.

Merania prebehli 2 krát pre pozdĺžnu a kolmú rovinu. A boli prevedené s krokom 5° .

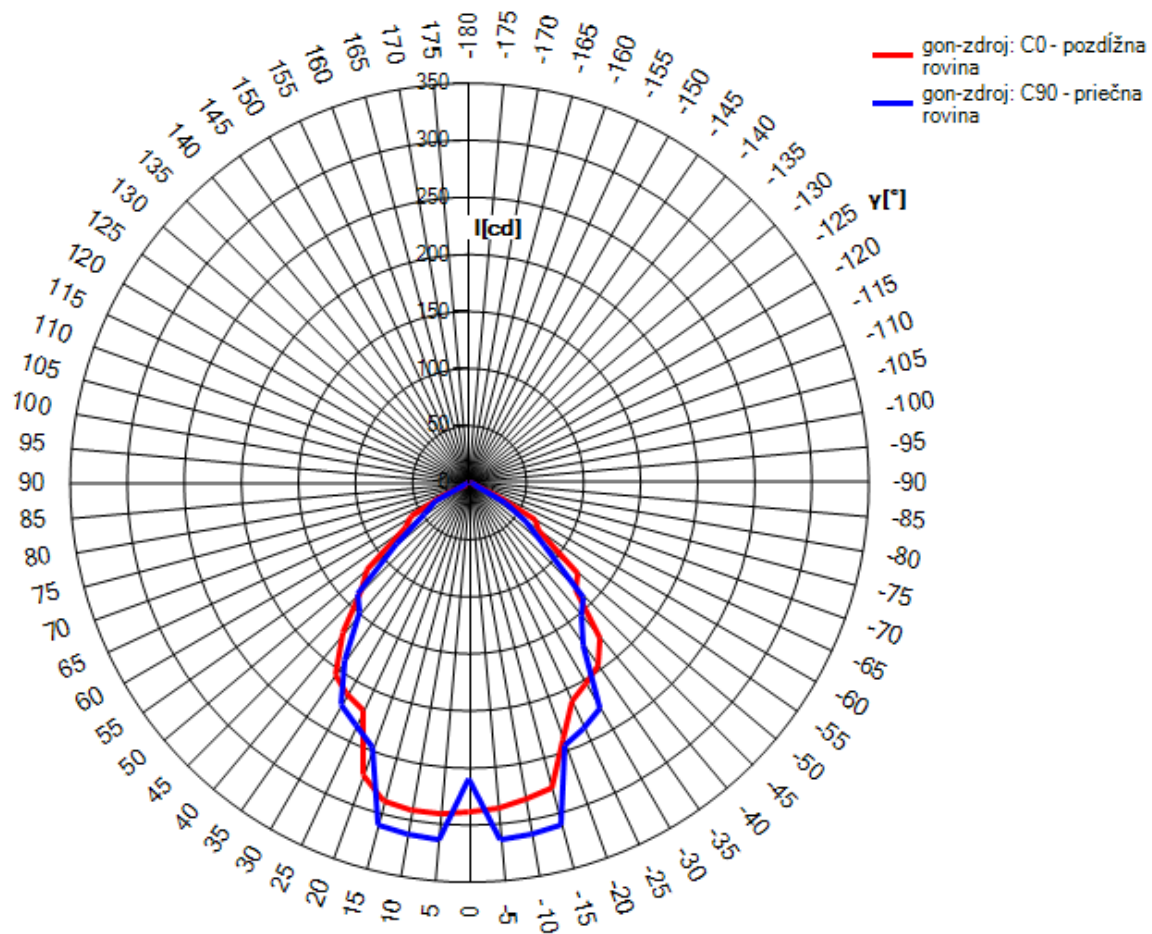
Pozn. dáta z goniofotometra pre jednotlivé vzorky termoplastov sú použité z bakalárskej práce [9].

Samotný zdroj svetla (bez termoplastu)

Namerané dáta z goniofotometru sú v prílohe *P1.1*. Z týchto dát je podľa vzťahu (25) vypočítaná svietivosť I a z nej sú zostrojené čiary svietivosti. (*Obr. 34*)

Uhol polovičnej svietivosti, je vypočítaný zo vzťahu (29). Pre samotný zdroj svetla je uhol polovičnej svietivosti $\gamma_H = 41^\circ$.

Činiteľ rozptylu je vypočítaný zo vzťahu (27). Pre samotný zdroj svetla je činiteľ rozptylu $\sigma=0,636$.



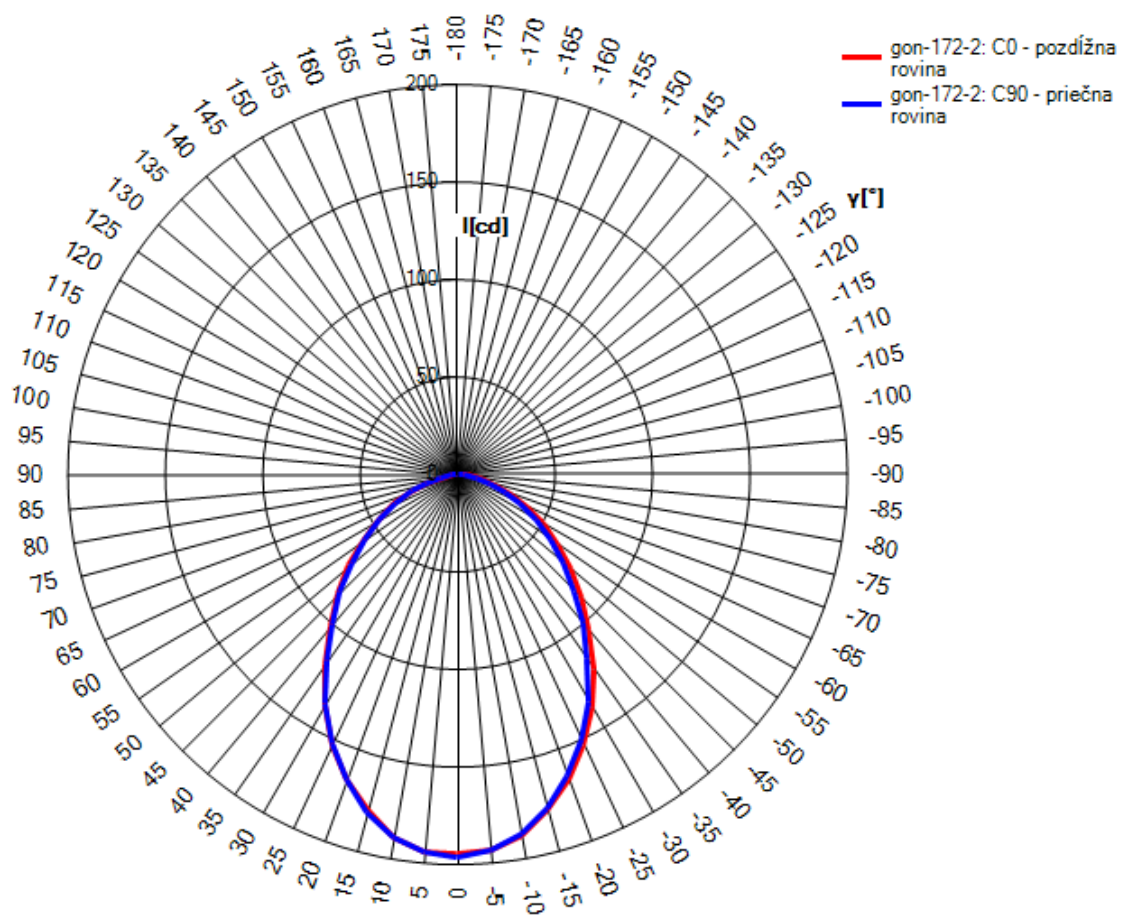
Obr. 34 - Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre samotný zdroj svetla (bez termoplastu)

Vzorka termoplastu 021172-2mm

Namerané dáta z goniofotometru sú v prílohe P1.2. Z týchto dát je podľa vzťahu (25) vypočítaná svietivosť I a z nej sú zostrojené čiary svietivosti. (Obr. 35)

Uhol polovičnej svietivosti, je vypočítaný zo vzťahu (29). Pre túto vzorku termoplastu je uhol polovičnej svietivosti $\gamma_H = 41^\circ$.

Činiteľ rozptylu je vypočítaný zo vzťahu (27). Pre túto vzorku termoplastu je činiteľ rozptylu $\sigma=0,648$.



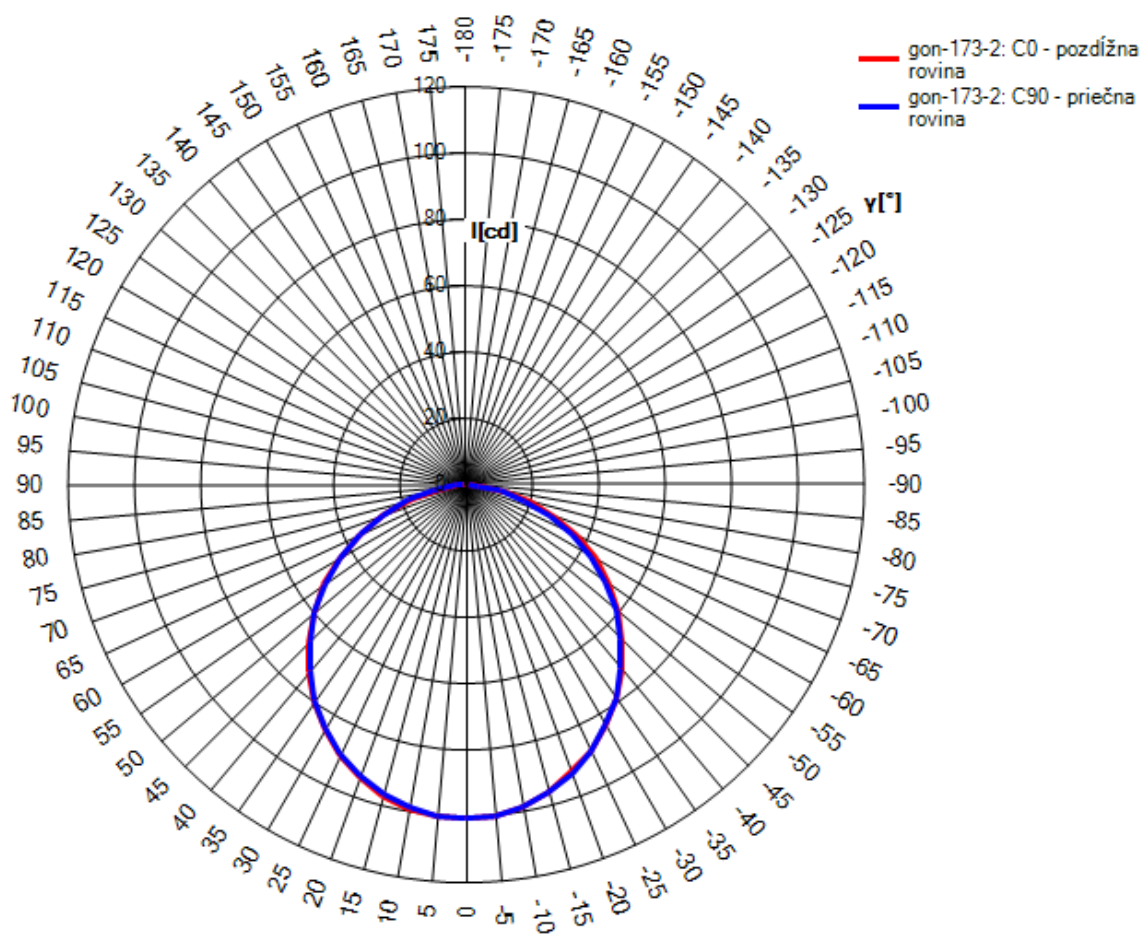
Obr. 35 - Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021172 - 2 mm

Vzorka termoplastu 021173-2mm

Namerané dáta z goniofotometru sú v prílohe P1.3. Z týchto dát je podľa vzťahu (25) vypočítaná svietivosť I a z nej sú zostrojené čiary svietivosti. (Obr. 36)

Uhol polovičnej svietivosti, je vypočítaný zo vzťahu (29). Pre túto vzorku termoplastu je uhol polovičnej svietivosti $\gamma_H = 56^\circ$.

Činiteľ rozptylu je vypočítaný zo vzťahu (27). Pre túto vzorku termoplastu je činiteľ rozptylu $\sigma=0,881$.



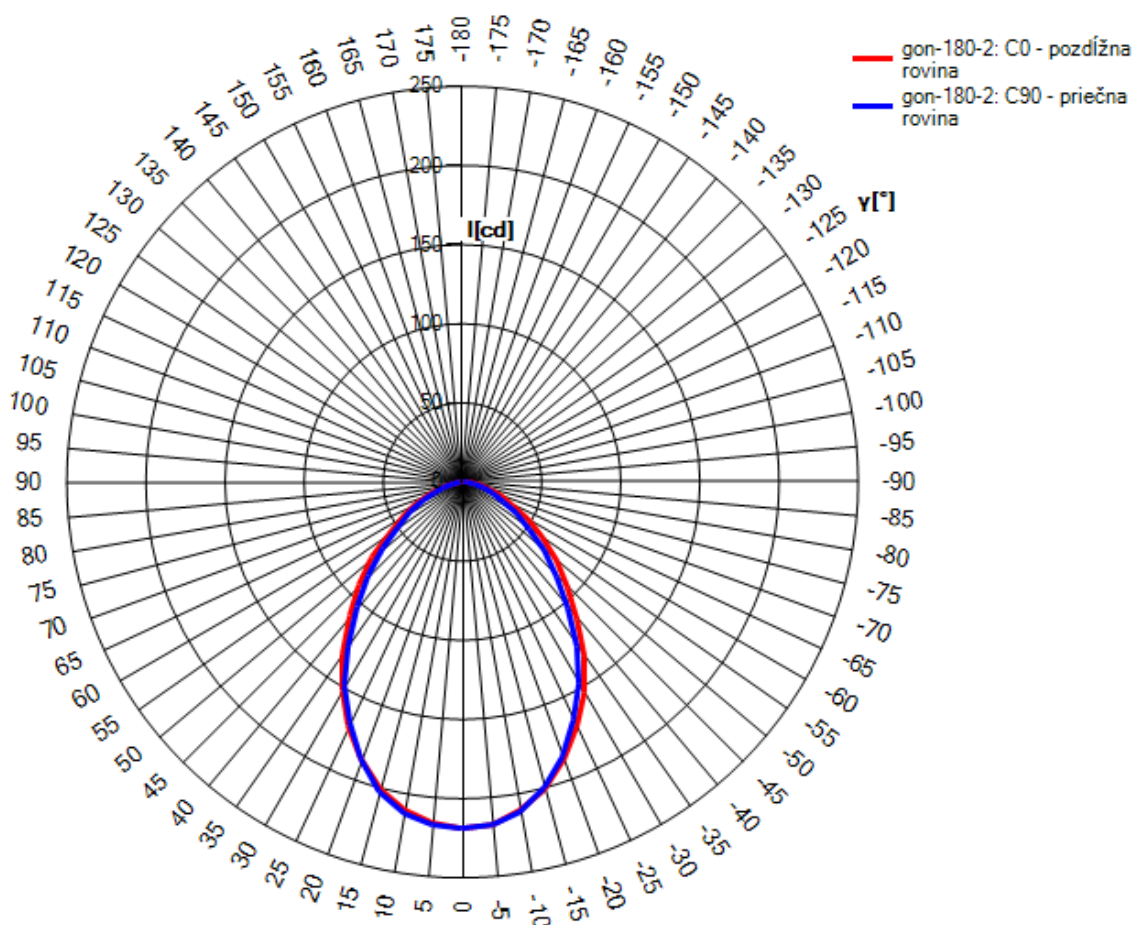
Obr. 36 - Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021172 - 2 mm

Vzorka termoplastu 021180-2mm

Namerané dáta z goniofotometru sú v prílohe P1.4. Z týchto dát je podľa vzťahu (25) vypočítaná svietivosť I a z nej sú zostrojené čiary svietivosti. (Obr. 37)

Uhol polovičnej svietivosti, je vypočítaný zo vzťahu (29). Pre túto vzorku termoplastu je uhol polovičnej svietivosti $\gamma_H = 37^\circ$.

Činiteľ rozptylu je vypočítaný zo vzťahu (27). Pre túto vzorku termoplastu je činiteľ rozptylu $\sigma=0,597$.



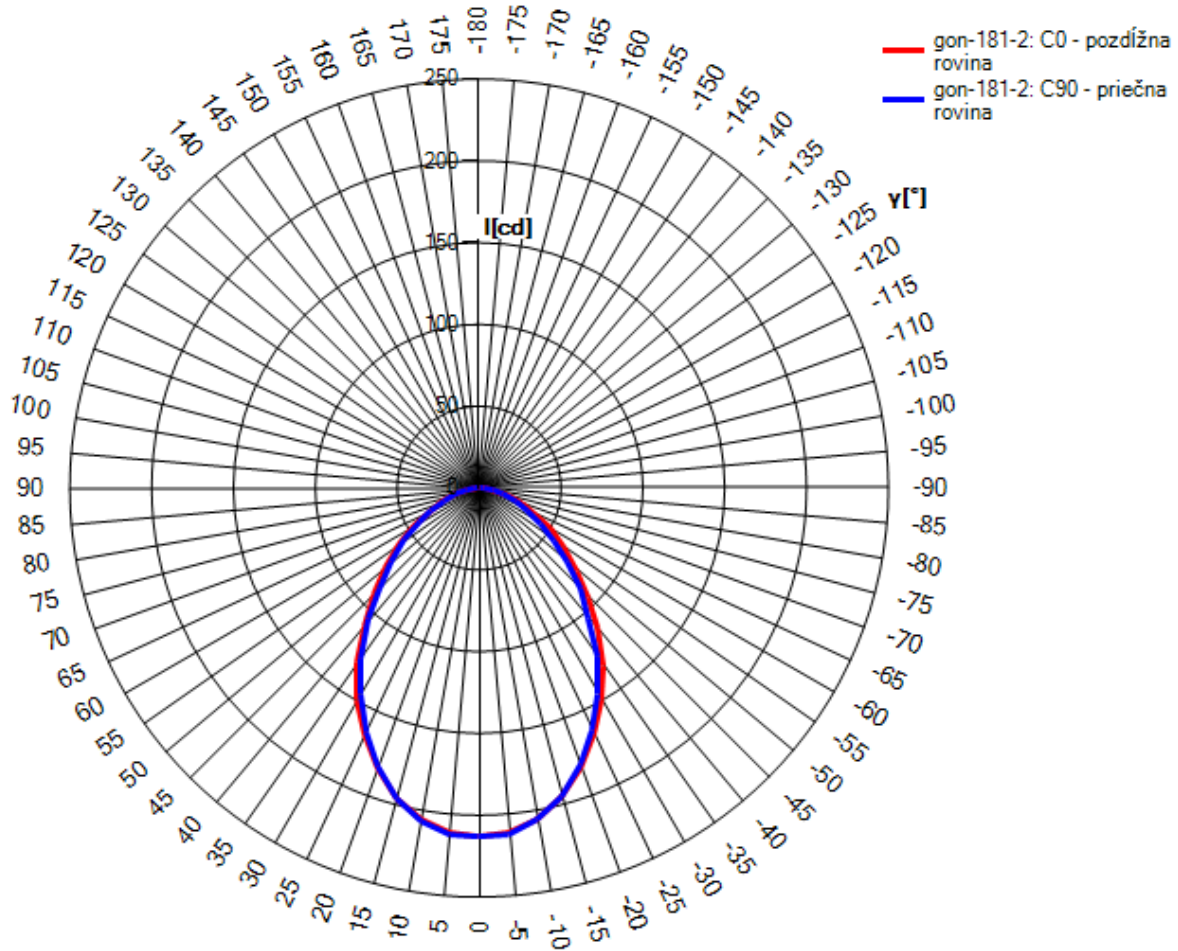
Obr. 37 - Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021172 - 2 mm

Vzorka termoplastu 021181-2mm

Namerané dáta z goniofotometru sú v prílohe P1.5. Z týchto dát je podľa vzťahu (25) vypočítaná svietivosť I a z nej sú zostrojené čiary svietivosti. (Obr. 38)

Uhol polovičnej svietivosti, je vypočítaný zo vzťahu (29). Pre túto vzorku termoplastu je uhol polovičnej svietivosti $\gamma_H = 38^\circ$.

Činiteľ rozptylu je vypočítaný zo vzťahu (27). Pre túto vzorku termoplastu je činiteľ rozptylu $\sigma=0,617$.



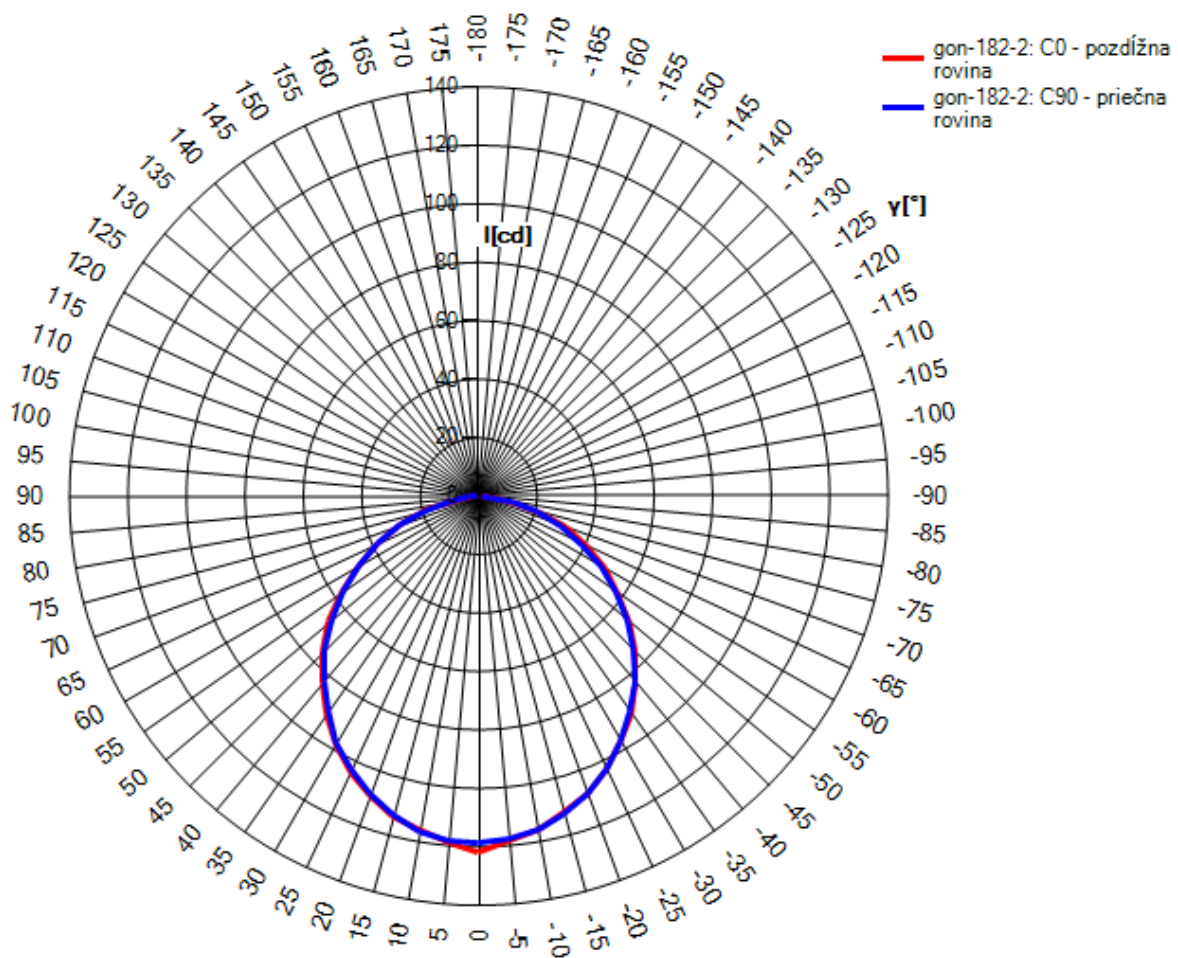
Obr. 38 - Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021172 - 2 mm

Vzorka termoplastu 021182-2mm

Namerané dáta z goniofotometru sú v prílohe P1.6. Z týchto dát je podľa vzťahu (25) vypočítaná svietivosť I a z nej sú zostrojené čiary svietivosti (Obr. 39)

Uhol polovičnej svietivosti, je vypočítaný zo vzťahu (29). Pre túto vzorku termoplastu je uhol polovičnej svietivosti $\gamma_H = 53^\circ$.

Činiteľ rozptylu je vypočítaný zo vzťahu (27). Pre túto vzorku termoplastu je činiteľ rozptylu $\sigma = 0,838$.

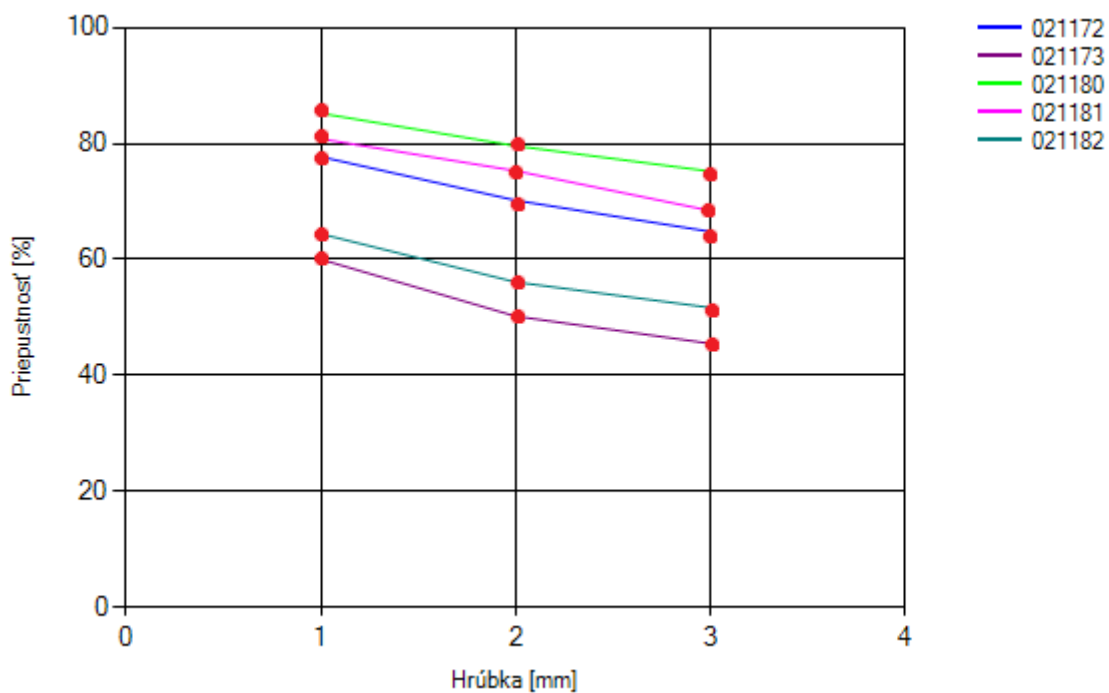


Obr. 39 - Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021172 - 2 mm

6. Vyhodnotenie výsledkov

Porovnanie priepustností jednotlivých termoplastov

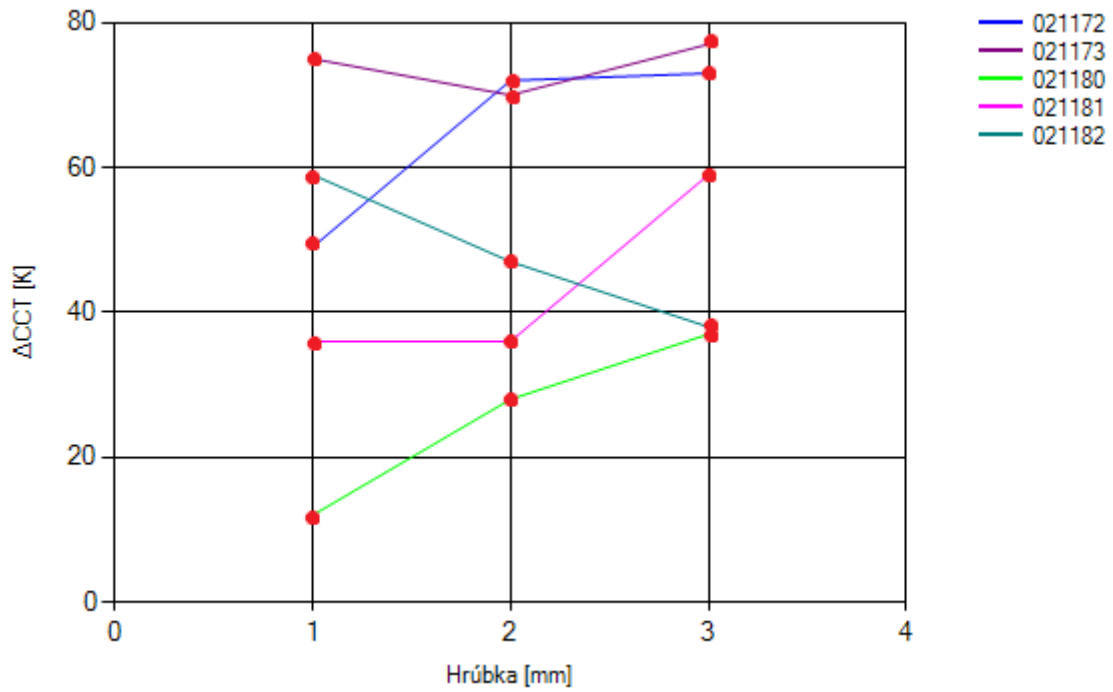
Ako vidíme na obrázku *Obr.40* priepustnosť termoplastu logicky s rastúcou hrúbkou klesá. Rozdielna priepustnosť jednotlivých vzoriek rovnakej hrúbky je spôsobená množstvom pridanej translucenčnej zložky.



Obr.40 - Priepustnosť termoplastov pre dané hrúbky jednotlivých termoplastov

Porovnanie zmeny teploty chromatickosti jednotlivých termoplastov

Ďalšou skúmanou vlastnosťou termoplastov bol ich vplyv na zmenu teploty chromatickosti daného svetla.



Obr.41 - Zmena teploty chromatickosti svetla pri použití rôznych termoplastov

7. Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvoriť nástroj pre výrobcov svetidiel, ktorý im pomôže pri výbere vhodného termoplastu na výrobu difúzorov. Ďalej bolo cieľom práce vyhodnotiť zmenu svetelne technických vlastností svetla, pri použití jednotlivých vzoriek termoplastov, určených na výrobu difúzorov.

Predmetom meraní boli translucenčné termoplasty Makrolon od firmy Bayer, ktoré sa používajú na výrobu difúzorov LED svetidiel. Jednalo sa o 5 typov termoplastov s hrúbkou 1 až 3 mm.

Najskôr sme sa zaoberali zmenou spektrálneho zloženia svetla, pri prechode jednotlivými termoplastami. Pre každú vzorku termoplastu sme vyhodnotili spektrálny priebeh činiteľa prestupu. Ďalej sme vypočítali priepustnosti jednotlivých termoplastov ako podiel vychádzajúceho a dopadajúceho svetelného toku pre daný termoplast.

Ďalším krokom bolo určenie farby svetla vychádzajúceho z termoplastu v CIE XYZ farebnom priestore a následná konverzia do systému sRGB, ktorý sa používa v digitálnej technike. Ďalej sme pre jednotlivé svetlá vypočítali teplotu chromatickosti a zistili ako ju jednotlivé termoplasty ovplyvňujú.

V nasledujúcej časti sme zostrojili čiary svietivosti pre 2mm hrubé vzorky termoplastov (dáta použité z bakalárskej práce[8]). Ďalej sme vypočítali uhly polovičnej svietivosti pre jednotlivé termoplasty. Tie sa určujú z grafu čiar svietivosti. Uhol polovičnej svietivosti je uhol, ktorý je odvodený z čiary svietivosti a určený smermi, v ktorých svietivosť klesá na polovicu. Nakoniec sme vypočítali činitele rozptylu jednotlivých termoplastov ako podiel aritmetického priemeru hodnôt jasov meraných pod uhlami 20,70 a 5° od normály pri kolmom dopade svetla.

Všetky tieto svetelne technické vlastnosti a ich zmeny sú automaticky vyhodnotené aplikáciou, ktorá je súčasťou tejto práce. Vstupnými dátami pre aplikáciu sú dáta zo spektrometra (hustota žiarivého toku) a z goniofotometra (hodnota osvetlenosti pre jednotlivé uhly natočenia ramena goniofotometra). Výstup aplikácie je jednak zobrazený v samotnej aplikácii, alebo je vytvorený pdf súbor, v ktorom sú všetky tieto dáta zdokumentované.

Ako môžeme vidieť z výsledkov meraní a výpočtov, teplota chromatickosti sa prechodom termoplastom znižuje. Miera zmeny teploty chromatickosti závisí na spektrálnom priebehu činiteľa prestupu. Pri prechode svetla termoplastom, sú určité časti spektra pohlcované viac ako iné a výsledné svetlo je teda ochudobnené o tieto časti spektra a to má vplyv na teplotu chromatickosti. Z výsledkov vidíme, že najväčšia zmena teploty chromatickosti, bola pozorovaná pri termoplaste 021173, ktorého spektrálny priebeh činiteľa prestupu má najvyššie hodnoty. Naopak pri termoplaste 021180, s najnižšími hodnotami spektrálneho priebehu činiteľa prestupu je zmena teploty chromatickosti najnižšia.

Z výsledkov je zrejmé, že činiteľ prestupu sa znižuje s narastajúcou hrúbkou materiálu, tak ako sme predpokladali. Ďalej sme predpokladali, že rozptyl jednotlivých termoplastov, bude klesať s rastúcim činiteľom prestupu, čo sa nám aj potvrdilo. Tieto veličiny závisia na transparentnosti materiálu, čiže podľa predpokladov sme najväčšiu hodnotu rozptylu svetla

a zároveň najmenšiu priepustnosť namerali pri termoplaste 021173, ktorý sa vyznačoval najmenšou transparentnosťou, ktorá bola dosiahnutá pridaním väčšieho množstva translucenčnej zložky. Teda v prípade, že výrobca svietidiel chce dosiahnuť čo najväčší rozptyl svetla, je vhodné na výrobu difúzora použiť práve tento typ termoplastu. Naopak, ak je požiadavka na svietidlo čo najmenší rozptyl, je vhodné použiť termoplast 021180, s ktorým dosiahneme aj najvyššiu priepustnosť.

Táto práca teda môže slúžiť pre výrobcov svietidiel, ktorý by mal zohľadniť všetky vyššie spomenuté vlastnosti pri výbere vhodného materiálu na výrobu difúzora svietidla. Okrem termoplastov, ktoré sú skúmané v tejto práci, môže pomocou priloženej aplikácie vyhodnotiť ľubovoľné termoplasty, ktorých svetelne technické vlastnosti potrebuje zhodnotiť. Výsledkom tejto práce je teda nástroj, ktorý pomôže výrobcovi svietidiel nájsť najvhodnejší materiál na výrobu difúzora, podľa požadovaných parametrov.

8. Použitá literatura

- [1] HABEL J. a kolektiv: Světlo a osvětlování, FCC PUBLIC, 2013
- [2] HORŇÁK P. : Umelé osvetlenie Alfa, 1979
- [3] Vliv prostředí a adaptačních podmínek na zrakový vjem. In: SVĚTLO časopis pro osvětlování [online]. © 2014 - 2015 - FCC Public s. r. o. Dostupné na: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/barva-svetla-ve-verejnem-osvetleni-cast-2-vliv-prostredi-a-adaptacnich-podminek-na-zrakovy-vjem--1239>
- [4] A Standard Default Color Space for the Internet – sRGB In: w3.org [online]. Dostupné na: <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>
- [5] Correlated Color Temperature. In: lrc.rpi [online]. Dostupné na: <http://www.lrc.rpi.edu/education/learning/terminology/cct.asp>
- [6] Spectrometer Knowledge. In: bwtek.com © 2016 B&W Tek. Dostupné na: <http://bwtek.com/spectrometer-introduction>
- [7] Základy měření světelně technických veličin. In: powerwiki.cz [online]. Dostupné na: <http://www.powerwiki.cz/attach/A5M15ES1/A5M15ES1-05-Fotometrie.pdf>
- [8] HOLUBEC, Lukáš. Analýza světelně technických vlastností materiálů pro difuzory svítidel. Praha, 2015. Bakalářská práce (Bc.). České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická, katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Marek Bálský.
- [9] ČSN IEC 50(845) - Mezinárodní elektrotechnický slovník, Kapitola 845: Osvětlení
- [10] Illuminating Ideas: Material Solutions for LED Lighting. In: plastics.covestro.com [online]. Dostupné na: <http://www.plastics.covestro.com/>
- [11] Psychophysics of Vision by Michael Kalloniatis and Charles Luu. In: webvision.med.utah.edu [online]. Copyright © 2016 Webvision. Dostupné na: <http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/psychophysics-of-vision/>
- [12] Color Spaces. In: zone.ni.com [online]. © 2016 National Instruments Corporation. Dostupné na: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372916P-01/nivisionconcepts/color_spaces
- [13] Kolorimetrické soustavy. In: dirk.kmi.tul.cz Dostupné na: <http://dirk.kmi.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Kolorimetrie/6KME-xyzlab.pdf>
- [14] Spektrometry. In: narran.cz [online]. 2013 © Narran, s.r.o. Dostupné na: <http://www.narran.cz/spektrometry>

9. Zoznam obrázkov

Obr.1	K výpočtu priestorového uhlu, pod ktorým je z bodu P vidieť plocha A.....	13
Obr.2	K výpočtu osvetlenosti bodovým zdrojom Z v bode P umiestnený v rovine ρ	14
Obr.3	Čiary svietivosti v polárnych súradniciach.....	16
Obr.4	Spektrálna citlivosť S,L,M čapíkov.....	18
Obr.5	Spektrálna citlivosť oka pri fotoskopickom a skotopickom videní.....	19
Obr.6	Funkcie trichromatických činiteľov.....	20
Obr.7	Rovinný rez kolorimetrického priestoru CIE XYZ.....	21
Obr.8	Kolorimetrický priestor CIE XYZ.....	22
Obr.9	Príklady jednotlivých teplôt chromatickosti.....	25
Obr.10	Spektrometer Narran HR 8.....	27
Obr.11	Goniofotometer.....	28
Obr.12	Priebeh merania spektrometrom.....	29
Obr.13	Princíp difúzoru.....	32
Obr.14	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021172-1mm.....	34
Obr.15	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021172-2mm.....	35
Obr.16	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021172-3mm.....	36
Obr.17	Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021172.....	37
Obr.18	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021173-1mm.....	38
Obr.19	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021173-2mm.....	39
Obr.20	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021173-3mm.....	40
Obr.21	Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021173.....	41
Obr.22	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021180-1mm.....	42
Obr.23	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021180-2mm.....	43
Obr.24	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021180-3mm.....	44
Obr.25	Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021180.....	45
Obr.26	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021181-1mm.....	46
Obr.27	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021181-2mm.....	47

Obr.28	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021181-3mm.....	48
Obr.29	Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021181.....	49
Obr.30	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021182-1mm.....	50
Obr.31	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021182-2mm.....	51
Obr.32	Spektrálny priebeh činiteľa prestupu termoplastu 021182-3mm.....	52
Obr.33	Porovnanie spektrálnych priebehov činiteľa prestupu pre jednotlivé hrúbky termoplastu 021182.....	53
Obr.34	Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre samotný zdroj svetla (bez termoplastu).....	55
Obr.35	Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021172-2 mm.....	56
Obr.36	Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021173-2 mm.....	57
Obr.37	Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021180-2 mm.....	58
Obr.38	Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021181-2 mm.....	59
Obr.39	Graf čiar svietivosti v polárnych súradniciach pre vzorku 021182-2 mm.....	60
Obr.40	Priepustnosť termoplastov pre dané hrúbky jednotlivých termoplastov.....	61
Obr.41	Zmena teploty chromatickosti svetla pri použití rôznych termoplastov.....	62

10. Prílohy

- P1 Namerané hodnoty z goniofotometru pre jednotlivé vzorky..... 69
- P2 Namerané hodnoty zo spektrometru pre jednotlivé vzorky - Elektronická príloha-Dáta zo spektrometra
- P3 Aplikácia na výpočet daných vlastností - Elektronická príloha - Aplikácia

P.1.1 Samotný zdroj svetla

γ	$E_{\gamma-C0}$ [lx]	$E_{\gamma-C90}$ [lx]
-90	0,27	0,28
-85	0,35	0,34
-80	0,5	0,44
-75	0,73	0,63
-70	0,89	0,91
-65	7,6	1,28
-60	16,5	9,33
-55	18,54	15,12
-50	30,3	21,79
-45	32,6	35
-40	43,6	37,8
-35	48,3	42,8
-30	50,2	56,1
-25	52,1	58,5
-20	59	60,5
-15	68,3	76,5
-10	69,5	77,2
-5	70,7	77,3
0	71,1	63,8
5	71,6	77,5
10	71,7	77,2
15	71,1	76,6
20	67,2	60,8
25	54,4	57,9
30	52,8	55,5
35	50,5	46,7
40	42,5	36,7
45	32,8	34
50	29,7	21,03
55	17,41	12,06
60	14,88	8,54
65	6,4	1,06
70	0,81	0,74
75	0,59	0,49
80	0,36	0,33
85	0,24	0,24
90	0,2	0,2

P.1.2 Termoplast 021172-2mm

γ	$E_{\gamma-C0}$ [lx]	$E_{\gamma-C90}$ [lx]
-90	0,26	0,21
-85	1,22	0,86
-80	2,92	2,37
-75	5,01	4,31
-70	7,32	6,52
-65	9,88	8,98
-60	12,66	11,62
-55	15,66	14,52
-50	19,03	17,69
-45	22,53	21,29
-40	26,3	25,04
-35	30,2	28,95
-30	34,1	33,1
-25	37,7	37
-20	41,1	40,6
-15	44	43,7
-10	46,3	46,1
-5	47,6	47,7
0	48	48,3
5	47,8	47,9
10	46,5	46,7
15	44	44,2
20	41,1	41,1
25	37,7	37,6
30	33,7	33,5
35	29,8	29,4
40	25,7	25,3
45	21,89	21,49
50	18,3	17,89
55	15,01	14,62
60	11,9	11,64
65	9,06	8,93
70	6,49	6,44
75	4,13	4,22
80	2,05	2,24
85	0,55	0,74
90	0,17	0,18

P.1.3 Termoplast 021173-2mm

γ	E_{γ} -C0 [Ix]	E_{γ} -C90 [Ix]
-90	0,22	0,16
-85	1,25	0,93
-80	3,01	2,6
-75	5,04	4,62
-70	7,17	6,79
-65	9,29	8,93
-60	11,33	10,96
-55	13,25	12,96
-50	15,03	14,86
-45	16,75	16,61
-40	18,39	18,24
-35	19,84	19,79
-30	21,17	21,06
-25	22,31	22,34
-20	23,27	23,37
-15	24,15	24,19
-10	24,81	24,79
-5	25,21	25,24
0	25,37	25,33
5	25,22	25,28
10	24,98	24,88
15	24,43	24,26
20	23,61	23,54
25	22,65	22,61
30	21,42	21,34
35	20,14	20,01
40	18,59	18,49
45	16,93	16,81
50	15,13	15,08
55	13,15	13,13
60	11,09	11,09
65	8,86	8,95
70	6,59	6,79
75	4,31	4,58
80	2,2	2,46
85	0,58	0,79
90	0,13	0,14

P.1.4 Termoplast 021180-2mm

γ	E_{γ} -C0 [Ix]	E_{γ} -C90 [Ix]
-90	0,25	0,22
-85	1,03	0,72
-80	2,44	1,86
-75	4,25	3,37
-70	6,38	5,14
-65	8,91	7,28
-60	11,91	9,81
-55	15,44	13,01
-50	19,44	16,82
-45	23,85	21,31
-40	28,53	26,07
-35	33,2	31,2
-30	37,8	36,2
-25	41,9	41
-20	46	45,5
-15	49,6	49,2
-10	51,9	52,1
-5	53,6	53,7
0	54	54
5	53,4	53,5
10	52	52,5
15	49,5	49,9
20	46	46
25	42	41,3
30	37,5	36,6
35	32,8	31,3
40	27,9	26
45	23,16	21,06
50	18,77	16,53
55	14,57	12,75
60	11,06	9,54
65	8,12	7
70	5,61	4,92
75	3,5	3,16
80	1,72	1,67
85	0,48	0,57
90	0,17	0,17

P.1.5 Termoplast 021181-2mm

γ	E_{γ} -C0 [Ix]	E_{γ} -C90 [Ix]
-90	0,27	0,22
-85	1,13	0,8
-80	2,69	2,13
-75	4,66	3,89
-70	6,96	5,93
-65	9,56	8,22
-60	12,51	10,98
-55	15,84	14,12
-50	19,73	17,68
-45	23,8	21,86
-40	28,29	26,25
-35	32,7	30,9
-30	36,9	35,8
-25	41	40,2
-20	44,8	44,3
-15	48,2	48,1
-10	50,6	50,6
-5	52,2	52,3
0	52,5	52,4
5	52	52,3
10	50,6	50,9
15	48,4	48,4
20	45	44,6
25	41	40,5
30	36,9	35,9
35	32,1	31,2
40	27,6	26,3
45	23,06	21,76
50	18,88	17,59
55	15,03	13,95
60	11,62	10,75
65	8,64	8,06
70	6,1	5,74
75	3,82	3,72
80	1,9	1,98
85	0,53	0,65
90	0,19	0,18

P.1.6 Termoplast 021182-2mm

γ	E_{γ} -C0 [Ix]	E_{γ} -C90 [Ix]
-90	0,25	0,21
-85	1,37	1,08
-80	3,29	2,9
-75	5,53	5,12
-70	7,86	7,47
-65	10,21	9,85
-60	12,52	12,18
-55	14,73	14,45
-50	16,91	16,67
-45	19,02	18,75
-40	20,99	20,83
-35	22,86	22,65
-30	24,46	24,44
-25	25,98	25,93
-20	27,33	27,25
-15	28,29	28,33
-10	29,22	29,19
-5	29,74	29,72
0	30	29,9
5	29,9	29,8
10	29,2	29,3
15	28,5	28,4
20	27,5	27,3
25	26,2	26
30	24,6	24,5
35	22,9	22,61
40	21	20,8
45	19,01	18,78
50	16,84	16,59
55	14,53	14,34
60	12,05	12,01
65	9,65	9,64
70	7,17	7,23
75	4,67	4,83
80	2,36	2,58
85	0,62	0,8
90	0,15	0,14