

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická  
Katedra polygrafie a fotofyziky

Goniospektrometrické měření tištěných vzorků  
Diplomová práce

Autor práce: Bc. Eliška Schützová  
Vedoucí práce: RNDr. Petr Janíček, Ph.D.

2017

University of Pardubice

Faculty of Chemical Technology  
Department of Grafic Arts and Photophysic

Goniospectrometric measurements of printed samples  
Master thesis

Author of the thesis: Bc. Eliška Schützová  
Thesis supervisor: RNDr. Petr Janíček, Ph.D.

2017

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Eliška Schützová**  
Osobní číslo: **C15607**  
Studijní program: **N3441 Polygrafie**  
Studijní obor: **Polygrafie**  
Název tématu: **Goniospektrometrická měření tištěných vzorků**  
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte literární rešerši týkající se goniospektrometrických měření. Zaměřte se zejména na definici používaných veličin, používaná experimentální zařízení a výsledky v oblasti tištěných vzorků a využití těchto měření.
2. Připravte řadu tištěných vzorků různých barev natištěné na různých papírech (lesklých, matných, metalických).
3. Připravené vzorky proměřte goniospektrometrem dostupným na Katedře polygrafie a fotofyziky.
4. Posuďte vhodnost metody s ohledem na konstrukční řešení a výsledky přehledně interpre-  
tujte.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce:

**RNDr. Petr Janíček, Ph.D.**

Ústav aplikované fyziky a matematiky

Konzultant diplomové práce:

**Ing. Ondřej Panák, Ph.D.**

Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání diplomové práce: **21. února 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2017**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.  
děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2017

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 12. 5. 2017

Bc. Eliška Schützová

Tato práce byla podpořena Centrem materiálů a nanotechnologií Fakulty chemicko-technologické a projekty LM2015082 a CZ.1.05/4.1.00/11.0251 financovanými Ministerstvem školství mládeže a tělovýchovy České Republiky, kterým bych na tomto místě ráda poděkovala.

Děkuji vedoucímu mé práce panu RNDr. Petru Janíčkoví, Ph.D. a konzultantovi mé práce panu Ing. Ondřeji Panákovi, Ph.D. za jejich rady, odbornou pomoc a trpělivost při tvorbě této práce.

V neposlední řadě chci poděkovat svým rodičům, celé mé rodině a mému příteli Ondřejovi za to, že mi byli oporou a podporovali mne, psychicky i finančně, během celého mého studia.

## **Anotace**

Tato diplomová práce je věnována gonio-spektrometrickému měření tištěných vzorků a jejich vyhodnocování pomocí matematicko-fyzikální dvousměrné distribuční funkce odrazu (Bidirectional reflectance distribution function). K tomuto účelu byl na Katedře polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice sestaven gonio-spektrofotometr. V práci jsou uvedeny části gonio-spektrofotometru. Jsou diskutovány výsledky získané pro měření řady tištěných vzorků různých barev na různých papírech (matném, lesklém a metalickém) a vhodnost měřicího zařízení pro gonio-spektrometrické měření.

## **Klíčová slova**

Gonio-spektrometrické měření, BRDF, tištěné vzorky, gonio-spektrofotometr

## **Annotation**

This master thesis deals with gonio-spectrometric measurements of printed samples. The main focus is put on evaluation of printed samples by mathematical and physical function – Bidirectional reflectance distribution function. The gonio-spectrometric apparatus used in this work was constructed. Parts of gonio-spectrophotometer are described in this master thesis. Results of the gonio-spectrometric measurements for set of samples of different colours printed on different papers (matt, glossy and metallic) are presented and its suitability for use in gonio-spectrometric measurements is discussed.

## **Keywords**

Goniospectrometric measurements, BRDF, printed samples, gonio-spectrophotometer

# Obsah

Úvod.....	13
1. Interakce světla s povrchem .....	14
2. Radiometrické veličiny.....	15
2.1 Prostorový úhel .....	15
2.2 Zářivý tok (výkon) .....	15
2.3 Intenzita ozáření .....	15
2.4 Zář .....	15
3. BRDF.....	17
3.1 Charakterizace BRDF .....	19
3.2 Podmínky BRDF .....	20
3.3 BRDF modely .....	21
3.4 Měření BRDF .....	26
3.4.1 Části měřicích zařízení.....	27
3.4.2 Charakterizace měřicích zařízení.....	29
3.4.3 Kalibrace měření.....	29
3.4.4 Reprezentace naměřených dat .....	31
4. Goniospektrometrické měření .....	33
4.1 Vzorky.....	33
4.1.1 Příprava vzorků.....	34
4.2 Gonio-spektrofotometr .....	34
4.2.1 Části gonio-spektrofotometru .....	34
4.2.1.1 Osvětlovací část .....	35
4.2.1.2 Otočný držák vzorku .....	36
4.2.1.3 Detekční část .....	37
4.2.2 Kalibrace gonio-spektrofotometru .....	38
4.2.2.1 Stálost zdroje.....	41
4.2.2.2 Charakterizace gonio-spektrofotometru.....	43
4.3 Měření tištěných vzorků.....	48
4.3.1 Stanovení hodnot BRDF .....	48
4.3.2 Hodnoty CIE L*a*b* a jejich stanovení.....	51



5.	Výsledky.....	54
5.1	Hodnoty BRDF potiskovaných substrátů.....	54
5.2	Hodnoty BRDF barevných tištěných vzorků .....	58
5.3	Hodnoty CIE L*a*b* barevných tištěných vzorků.....	67
6.	Závěr.....	72
7.	Použitá literatura.....	74
8.	Přílohy .....	79

## Seznam použitých zkratek a značek

ASTM	American Society for Testing and Materials
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function – Dvousměrná distribuční funkce odrazu
CCD	Charge-Coupled Device – zařízení s vázanými náboji
CIE	Commission Internationale de l’Eclairage
G	Barva Green Pantone Krypto – Zelená
IDS	Ideálně difuzní standard
KPF	Katedra polygrafie a fotofyziky
NIST	Národní institut pro normalizaci a technologie
P	Barva Purple Pantone Krypto – Purpurová
PB	Barva Proces Blue Pantone Krypto – Modrá procesní
PTFE	Polytetrafluorethylen
RB	Barva Reflex Blue Pantone Krypto – Modrá reflexní
RR	Barva Rubine Red Pantone Krypto – Červená
Si	Křemík
UV	Ultrafialová oblast záření
WR	Barva Warm Red Pantone Krypto – Červená až Oranžová
Y	Barva Yellow Pantone Krypto – Žlutá
$\Omega$	Prostorový úhel
$\Omega_r$	Prostorový úhel závislý na směru odraženého toku
$\Omega_i$	Prostorový závislý na směru dopadajícího toku
$\Omega_h$	tzv. <i>half-vektor</i> – „Průměrný“ vektor mezi příchozím a odchozím vektorem
$\Omega_s$	Prostorový úhel osvětlení
$\Omega_d$	Prostorový úhel detektoru
Sr	Steradián
$\Phi_e$	Zářivý tok
$W_e$	Zářivá energie
$t$	Čas
$\mathcal{E}_e$	Intenzita ozáření
$\mathcal{E}_i$	Dopadající záření (intenzita ozáření)

$\mathcal{E}_{iX}$	Intenzita ozáření příslušná pro daný úhel dopadu
$S$	Jednotková plocha
$L_e$	Zář
$L_i$	Dopadající záření
$L_r$	Odražené záření
$L_r^{IDS}$	Odražené záření od referenčního standardu
$I_e$	Zářivost
$p$	Bod na povrchu vzorku (tělesa)
$\theta$	Úhel (zenit)
$\theta_i$	Úhel (zenit) dopadu
$\theta_r$	Úhel (zenit) odrazu
$\theta_s$	Úhel (zenit) rozptýleného záření
$\theta_t$	Úhel (zenit) lomu
$f_r$	BRDF
$\phi$	Azimut
$\phi_i$	Azimut dopadu
$\phi_r$	Azimut odrazu
$\lambda$	Vlnová délka
$k_d$	Difúzní koeficient složky
$k_s$	Koeficient zrcadlového složky
$n$	Definuje lesklost povrchu
$D$	Hustota pravděpodobnosti
$\sigma$	Parametr Torrance a Sparrowa modelu udávající lesklost tělesa
$G$	Funkce geometrického zastínění
$F$	Fresnelův vzorec odrazu
$\eta$	Index lomu
$\eta_t$	Index lomu tělesa
$\eta_i$	Index lomu vnějšího prostředí
$k_a$	Absorpční koeficient
$\alpha_x$	Standardní odchylka sklonu mikro-plošky ve směru tangenty povrchu
$\alpha_y$	Standardní odchylka klonu mikro-plošky ve směru bitangenty povrchu
$\delta$	Diracův impuls
$\beta$	Kalibrační faktor
$P_i$	Energie zdroje záření

$P_s$	Detekovaná energie zdroje záření
$q$	Koeficient záření
$K$	Konstanta pro úpravu BRDF hodnot
$T_{filtr}$	Transmitance filtru
$R_{křemík}$	Reflektance křemíkového waferu
$\varnothing_{ST}$	Průměr světelného svazku gonio-spektrofotometru
$R_{VZ}$	Vzdálenost mezi zdrojem a detektorem gonio-spektrofotometru
$\varnothing_{\xi}$	Průměr štěrbinu gonio-spektrofotometru
$R_{VD}$	Vzdálenost mezi vzorkem a detektorem gonio-spektrofotometru
$F_r$	Naměřená intenzita světla odtáženého od vzorku
$S_0$	Plocha štěrbinu před detektorem gonio-spektrofotometru
$X, Y, Z$	Trichromatické hodnoty
$Me(\lambda)$	Standardizované spektrum osvětlení
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	Trichromatické funkce
$k$	Faktor, který normalizuje trichromatickou hodnotu $Y$
$\hat{R}$	Reflexní faktor BRDF

## Úvod

Pro měření charakteristických vlastností tištěných vzorků se v současné době využívá mnoho zařízení, například leskoměry, spektrofotometry a kolorimetry. Většina těchto zařízení měří dané vlastnosti tištěného vzorku pouze s pevnou geometrií měření. Leskoměry mají většinou základní měřicí úhel  $60^\circ$ , pro vysoce lesklé povrchy je to úhel  $20^\circ$  a pro matné povrchy úhel  $85^\circ$ . U spektrofotometrů se většinou jedná o geometrii 45/0 nebo 0/45 (to znamená úhel dopadu paprsku světla  $45^\circ$  nebo  $0^\circ$  a úhel odrazu paprsku světla  $0^\circ$  nebo  $45^\circ$ ). Není tedy bráno v potaz jak se charakteristické vlastnosti, kterými jsou především reflektance a barevnost, mění se změnou úhlu dopadu světla, či úhlu odrazu světla.

Pro tento účel jsou využívány gonio-reflektometry a gonio-spektrofotometry. Ty jsou schopny měřit vzorky s různou geometrií, tedy pod různými úhly dopadu a s různými úhly odrazu světlených paprsků.

Pro tuto práci byl za účelem gonio-spektrometrického měření tištěných vzorků sestaven gonio-spektrofotometr na Katedře polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice. Jsou na něm posuzovány změny vlastností tištěných vzorků se změnou úhlů dopadu a odrazu. Jedná se hlavně o posuzování změn intenzity odraženého záření se změnou úhlu odrazu. Také jsou porovnávány průběhy křivek změn intenzity při různých úhlech dopadu světla. Dále je posuzováno, jak se změnou těchto parametrů mění barevnost.

Pro vyhodnocování dat naměřených gonio-spektrofotometrem je použita dvousměrná distribuční funkce odrazu – Bidirectional reflectance distribution function.

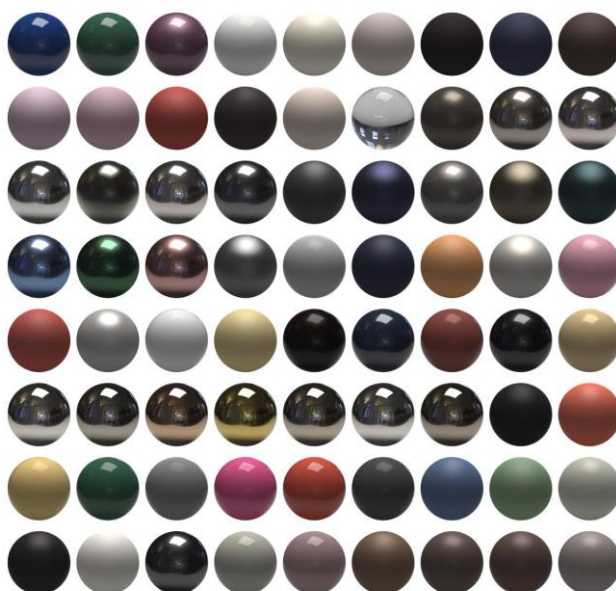
Účelem této práce je zhodnotit vliv různých geometrií na měření reflektance a také zhodnotit funkčnost a vhodnost sestaveného gonio-spektrofotometru, pro gonio-spektrometrické měření.

## 1. Interakce světla s povrchem

Světlo, které dopadá na povrch, se podle typu materiálu může chovat různě. Při dopadu světla na povrch se mohou dít následující typy interakcí [1]:

1. Lom (dochází k němu na rozhraní dvou prostředí s různou optickou hustotou)
2. Odraz (difuzní, zrcadlový, lesklý (viz kapitola 2))
3. Absorpce (pohlcení a zeslabení záření při jeho šíření určitým prostředím)
4. Rozptyl záření pod povrchem

Vztah mezi těmito interakcemi určuje, jak se bude světlo, které dopadlo na povrch chovat a jak se bude pro pozorovatele výsledný materiál jevit.



*Obrázek 1.1 Identicky osvětlené objekty stejných tvarů, ale rozdílných materiálů, a tedy rozdílných optických vlastností a interakcí světla s povrchem [2]*

K tomu abychom mohli objekty dobře charakterizovat, je kvantifikujeme. Kvantifikace povrchu [3] může být použita při kontrole kvality materiálu, pro rozlišení mezi materiály nebo při zjišťování jednotnosti povrchů.

Pro charakterizaci povrchu je určující jeho barva a také jeho povrchová úprava, záleží na tom, zda se povrch jeví jako matný či lesklý. S tím je spojena odrazivost povrchu jako funkce úhlu osvětlení a úhlu pozorování. Je tedy třeba určit, jak povrch odráží, rozptyluje a pohlcuje světlo. K tomu využíváme matematickou abstrakci zvanou BRDF (kapitola 3).

## 2. Radiometrické veličiny

Radiometrie [4, 5] se zabývá měřením a popisem šíření elektromagnetického záření v prostoru. Věnuje se též jevům ovlivňujícím toto záření (včetně odrazivosti). Radiometrie používá absolutní – radiometrické veličiny. Tyto veličiny a jejich rozměry definuje.

### 2.1 Prostorový úhel

Energie je vyzařována do prostoru, proto se v radiometrii používá jednotek vztažených k prostorovému úhlu  $\Omega$ . Je definován jako plocha na jednotkové kouli, na kterou se promítne objekt, jehož prostorový úhel chceme změřit. Paprsky vedené ze středu koule o jednotkovém poloměru vytínají na její ploše plochu  $1 \text{ m}^2$ . Tento vymezený prostor je jednotkou prostorového úhlu – Steradián (sr). Kulová plocha s libovolným poloměrem má plný prostorový úhel,  $4\pi \text{ sr}$ .

### 2.2 Zářivý tok (výkon)

Zářivý tok  $\Phi_e$  je základní radiometrickou jednotkou. Vyjadřuje výkon přenášený zářením – je to zářivá energie  $W_e$  procházející oblastí prostoru (nebo dopadající na plochu) za jednotkový čas  $t$ ;

$$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt} [W] \quad (1) [4]$$

### 2.3 Intenzita ozáření

Intenzita ozáření  $\varepsilon_e$  je přijímaná energie dopadající na plochu (nebo vyzářená z plochy) ze všech směrů. Je měrnou veličinou zářivého toku na ozařované ploše – je to zářivý tok  $\Phi_e$  dopadající na jednotkovou plochu  $S$ ;

$$\varepsilon_e = \frac{d\Phi_e}{dS} [Wm^{-2}] \quad (2) [4]$$

### 2.4 Zář

Zář  $L_e$  je definována jako přijímaný či vyzářený zářivý tok na jednotkovém prostorovém úhlu a jednotce plochy kolmo promítnuté na směr tohoto úhlu. Je určena diferenciálním podílem zářivosti  $I_e$  dané plošky zdroje  $S$  ve zvoleném směru a kolmého průmětu plošky v tomto směru  $\cos\theta$ ;

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos \theta} = \frac{d\Phi_e/d\Omega}{dS \cos \theta} [Wm^{-2}sr^{-1}] \quad (3) [4]$$

Je-li zářivost izotropní, potom je zář číselně rovna zářivosti zdánlivé plochy o velikosti jednoho metru čtverečního.

Mezi intenzitou ozáření a září platí následující vztah:

$$\varepsilon_e(p) = \int_{\Omega} L_e(p, S) \cos \theta dS \quad (4) [6]$$

Podle této rovnice je celkové ozáření, které přichází do bodu  $p$ , integrál přicházejících září přes všechny směry  $\Omega$ .



### 3. BRDF

Dvousměrná distribuční funkce odrazu – Bidirectional reflectance distribution function (dále jen BRDF), je funkce, která matematicky a fyzikálně popisuje lokální vlastnosti na povrchu tělesa. BRDF je funkce skalární, která charakterizuje odrazivost povrchu v jednom bodě. Je tedy využívána pro popis rozptylových (odrazných) vlastností povrchu materiálu. Udává, kolik světla se z jeho příchozího směru odrazí do jeho směru odchozího.

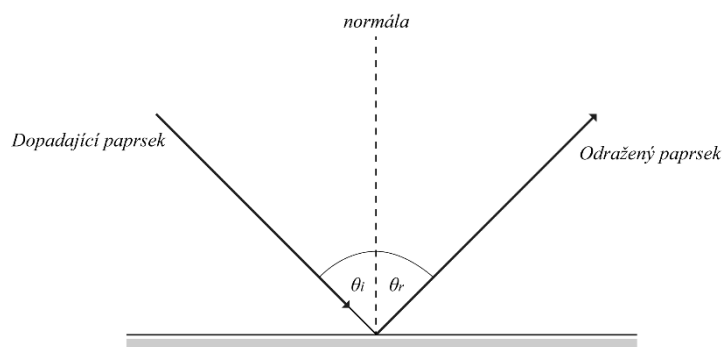
Jako první popsal BRDF Nicodemus [7], který přiřazuje této funkci větší obecnost a flexibilitu k popisu a stanovení geometrických a odrazových vlastností na většině povrchů.

Měření pomocí BRDF je prováděno v reálném čase.

Tradičně se optické šíření skládá ze dvou jevů – zrcadlového (spekulárního) a difuzního šíření.

#### *Model ideální zrcadlového odrazu*

Ideální zrcadlový odraz (Obrázek 3.1) vzniká na naprosto hladkých (zrcadlových) površích. Je to model odrazu, který popisuje odraz světla jako naprosto ideální. Úhel dopadu  $\theta_i$  se rovná úhlu odrazu  $\theta_r$ . Takovéto chování je popsáno pomocí zákona odrazu [8], v němž se uvádí, že dopadající paprsek, odražený paprsek a normála, k povrchu zrcadla, leží všechny ve stejné rovině.



Obrázek 3.1 Model dokonalého zrcadlového odrazu – Zákon odrazu [8]

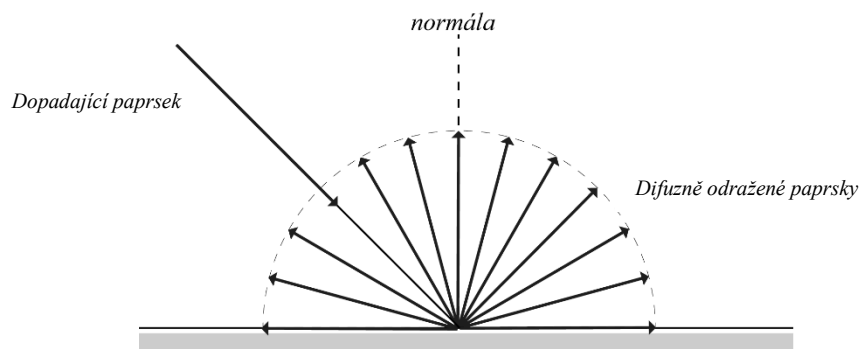
#### *Model ideálního difuzního odrazu*

Difuzní odraz (Obrázek 3.2) vzniká při odrazu záření na strukturovaných, nerovných površích. Záření se při dopadu, na povrch materiálu, odrazí všemi směry. Tento model, který uvádí všechno dopadající záření, jako dokonale difuzní je popsán pomocí Lambertova-kosinova zákona [4, 5, 9, 10] – intenzita odraženého záření od jednoho bodu daného materiálu je dána vztahem;

$$\Delta I_{\theta} = \Delta I_n \cos \theta \quad (5) [10]$$

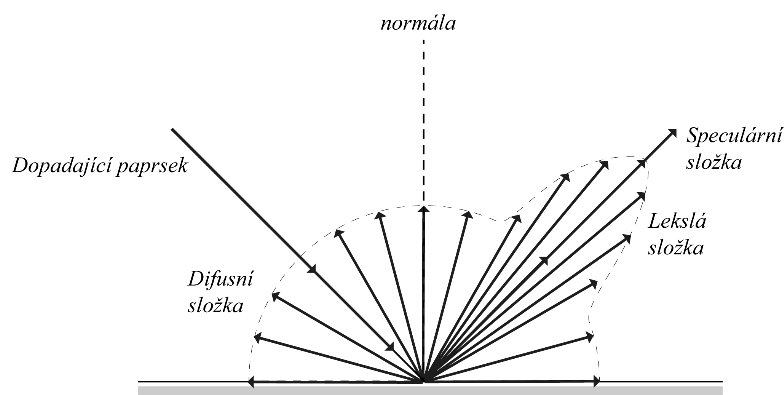
je to vztah mezi zářivostí  $\Delta I_\theta$  ve směru odchýleném od normály o úhel  $\theta$  a zářivostí ve směru kolmém k ploše.

Podle Lambertova zákona [9] vyzařuje, dokonale rozptylující povrch, stejnou záři ve všech směrech (okolo normály povrchu). Takový povrch je nazýván Lambertovským povrchem nebo reflektorem.



Obrázek 3.2 Model dokonalého difuzního odrazu – Lambertův-kosinův zákon

Nicméně, jak tvrdí Nicodem [7], čistě zrcadlový nebo čistě difuzní odraz může být aproximován, ale ani jednoho z nich nelze v praxi dosáhnout zcela nezávisle na sobě. BRDF tedy zahrnuje oba ty to jevy; zrcadlový i difuzní odraz. Rozptýlený odraz [4] nespĺňuje podmínku zrcadlového odrazu, ani difuzoru. Světlo se odráží téměř do všech směrů. Kromě toho je uváděno, že model BRDF zahrnuje i jev lesku. Tedy *lesnou složku* [4], která je podobná zrcadlovému odrazu, s tím rozdílem, že odražené světlo se šíří poblíž uhlu odrazu (lesklá složka závisí na množství zrcadlového odrazu ve srovnání s odrazem difuzním). BRDF je tedy kombinací zrcadlové, difuzní a lesklé složky [11]. To je zobrazeno na Obrázku 3.3.

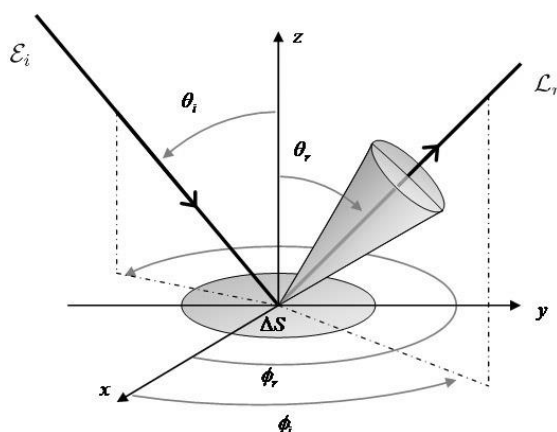


Obrázek 3.3 Model BRDF

Jak již bylo zmíněno výše, model BRDF se využívá k popisu povrchových vlastností materiálu. Jak se píše v [12, 3, 13], funkce poskytuje schopnost rychle zjistit povrchový vzhled pro prakticky jakýkoli druh materiálu, včetně plastů, kovů, textilu, skla, papíru, lakovaných povrchů, a dokonce i lidskou kůži. Je široce používána v počítačové grafice [14], optickém dálkovém průzkumu [15], monitorování životního prostředí [16], modelování objektových charakteristik [17] a v dalších oblastech vědeckého výzkumu [18, 19]. Tradičně se používá pro měření povrchového vzhledu [3].

### 3.1 Charakterizace BRDF

BRDF byla zpočátku definována podle Nikodéma [7] v roce 1977, ale podle [20], má jeho definice v této formě svá omezení, jako je předpoklad izotropního BRDF. Všeobecně přijímaný popis této funkce je – poměr záření odraženého od povrchu v jednotkovém úhlu v odchozím směru k dopadajícímu záření z příchozího směru. Zobrazení dopadajícího i odrazného směru ve sférických souřadnicích je vyobrazeno na obrázku 3.1.1.



Obrázek 3.1.1 Definice BRDF v souřadnicovém systému. Kde  $\varepsilon_i$  je intenzita ozáření,  $L_r$  je zář,  $\theta_i$  je zenit dopadu,  $\phi_i$  je azimut dopadu,  $\theta_r$  je zenit odrazu,  $\phi_r$  je azimut odrazu a  $\Delta S$  je základní plocha povrchu [21].

BRDF  $f_r$  je obvykle popisována jako funkce těchto základních proměnných [7, 11, 20, 22]; zenit dopadu  $\theta_i$ , azimut dopadu,  $\phi_i$ , zenit odrazu  $\theta_r$  a azimut odrazu  $\phi_r$ :

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \varepsilon_i)}{d\varepsilon_i(\theta_i, \phi_i)} [sr^{-1}] \quad (6) [7]$$

kde  $\theta$  a  $\phi$  společně označují směr (viz Obrázek 3.1.1), index  $i$  označuje prvek spojený s dopadajícím zářivým tokem, index  $r$  označuje prvek spojený s odraženým zářivým tokem,  $\mathcal{E}_i$  je intenzita ozáření,  $L_r$  je odražené záření (zář), a  $d$  označuje diferenciální podíl.

BRDF může být funkcí i dalších proměnných. Těmi mohou být vlnová délka  $\lambda$  [22, 23], polarizace [24], fluorescence [7], poloha a orientace vzorku [20]. BDRF může být proměnlivou funkcí času [7, 25].

B. Balling [20] zdůrazňuje, že je důležité, abychom dělali rozdíl mezi reflektancí (odrážecí schopnost) a reflektivitou (odrazivost povrchu materiálu). Tyto dva pojmy nejsou ekvivalentní a jsou oba jinak definovány. Reflektivita [26] je vlastnost rozhraní dvou prostředí daná poměrem intenzity odraženého záření k intenzitě záření dopadajícího a je měřena nezávisle na tloušťce materiálu. Reflektance [20] je poměr celkového světelného toku (energie) odraženého od povrchu, ku světelnému toku (energie) dopadajícímu. Reflektance nám tedy vyjadřuje, jak moc objekt světlo o dané vlnové délce odráží a využívá se pro měření hustoty energie.

Podle [1] lze tedy BRDF chápat tak, že nám poskytuje hustotu pravděpodobnosti o tom, že foton, který přiletí na povrch ze směru  $\Omega_i$ , se odrazí ve směru  $\Omega_r$ . BRDF je model toho, co se ve skutečnosti děje na úrovni mikrostruktury při pohledu z dálky.

## 3.2 Podmínky BRDF

Každý model BRDF  $f_r$  by měl splňovat tyto základní podmínky [27]:

1. Každý model by měl splňovat podmínku linearitu [1] – BRDF  $f_r$  je lineární, vzhledem k záři. Takže výsledná odražená energie může být složena z několika nezávislých zdrojů světla a z různých směrů.
2. Model BRDF  $f_r$  musí splňovat Helmholtzovu reciprocitu [11] – V BRDF  $f_r$  musí být zaměnitelný směr, z něhož světlo přichází a směr, kam odchází;

$$f_r(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2) = f_r(\theta_2, \phi_2; \theta_1, \phi_1) \quad (7) [7]$$

3. Funkce by měla být nezáporná pro všechny směry (úhly) nad hemisférou
4. Model BRDF  $f_r$  musí splňovat zákon zachování energie [28] – Uzavřený systém, je systém, který je izolován od okolního prostředí a celková energie systému je zachována. Takže, množství světla odraženého od povrchu by měla být menší nebo rovná množství světla, které dopadá na povrch;

$$\int_{\Omega} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r \leq 1 \quad (8) [27]$$

kde  $\Omega_r$  označuje prostorový úhel závislý na směru odraženého toku a  $\cos \theta_r$  označuje cosinus úhlu mezi odraženým tokem záření a normálou povrchu.

Funkce, které splňují tyto podmínky, se označují jako fyzikálně věrohodné (*physically plausible*).

Jak uvádí A. Prochorov [11], by měly být splněny i další podmínky:

5. Model BRDF  $f_r$  by měl mít dostatek parametrů, které by měly být použity při měření BRDF, aby mohly být charakterizovány všechny úhly dopadu, pro které byl měřen.
6. Model BRDF  $f_r$  by měl být správně fyzikálně založen (měl by být vybrán správný fyzikální model BRDF), aby mohly být správně odhadovány hodnoty BRDF mimo rozsah měřených dopadových a pozorovacích úhlů.

### 3.3 BRDF modely

BRDF modely mohou být rozděleny podle vlastností povrchu materiálu, jak je uvedeno v [6] – podle izotropie povrchu nebo podle toho, jak materiál odráží záření. Podle izotropie povrchu se modely dělí na izotropní a anizotropní. BRDF modely jsou podle odrazivosti záření materiálem rozděleny na difuzní (Lambertovy), zrcadlový (spekulární) a retro-reflexní (modely zpětného odrazu). Modely difuzní a zrcadlový jsou popsány v úvodu 2. Kapitoly. Retro-reflexní model [6], je model, ve kterém se záření odráží zpět do směru, ze kterého přichází.

#### *Izotropní modely*

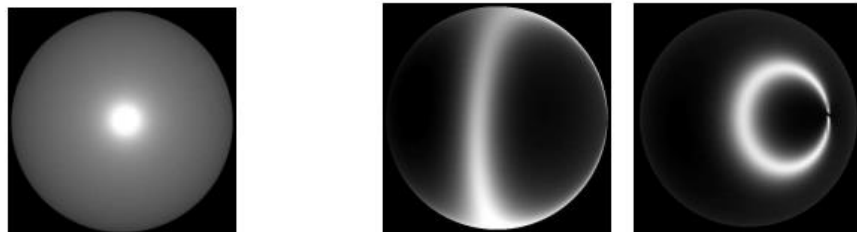
Podle [1] a [27] má většina materiálů izotropní BRDF funkci  $f_r$ . Izotropní povrch (materiál) stále odráží záření stejným způsobem. Což znamená, že funkce BRDF  $f_r$  je invariantní

k otočení kolem normály. Reflexní vlastnosti jsou nezávislé na této rotaci – materiál vypadá ze všech stran stále stejně (Obrázek 2.5). Tedy odrazové vlastnosti nezávisí na tomto otočení;

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_0, \phi_0) = f_r(\theta_i, \phi_i + \phi; \theta_0, \phi_0 + \phi) = f_r(\theta_i, \phi_0 - \phi, \theta_0, \phi_0 - \phi) \quad (9) [1]$$

### **Anizotropní modely**

Anizotropní modely popsané v [1, 6, 27] jsou opakem modelů izotropních. Povrch (materiál) vykazuje, při otočení kolem normály, tedy v různých směrech, odlišné světelné vlastnosti. Při pohledu z různých směrů vypadá povrch (materiál) rozdílně (Obrázek 3.3.1). To je dáno mikrostrukturou povrchu; např. perleťové pigmenty, tkaniny, kovy, broušené materiály.



Obrázek 3.3.1 Ukázka chování izotropních modelů (vlevo) a anizotropních modelů (vpravo) [29]

BRDF  $f_r$  modely mohou být také rozděleny podle principu modelu:

### **Empirické modely**

To jsou modely, které jsou založeny čistě na pozorování výsledku, jak je popsáno v [20, 27]. Jak uvádí [6], modely na tomto principu jsou při měření BRDF nejpoužívanější. Empirické BRDF nereflktují fyzikální realitu odrazu světla, protože neodpovídají uvedeným vlastnostem BRDF.

### **Fyzikální modely**

Jak ve své práci uvádí M. Krahulík [27], jsou známy dva typy fyzikálních modelů;

- Modely popisující povrch na základě optiky paprsku – představa, že povrch se skládá z velmi malých plošek, řádově větších, než je vlnová délka světla.
- Modely založené na teorii šíření elektromagnetických vln.

Fyzikálně založené BRDF [6] jsou funkce odvozené z fyzikálních zákonů (např. Fresnelovy vzorce), často však velmi výpočetně náročné.

Posledním způsobem dělení BRDF modelů je dělení podle způsobu jejich reprezentace. První způsob reprezentace je pomocí funkce aproximující průběh BRDF, obecně řízená nízkým počtem parametrů, které mají vliv na vzhled materiálu [6, 27]. Tyto funkce jsou obvykle tvořeny tak, aby splňovaly fyzikální vlastnosti BRDF.

Dalším způsobem reprezentace je tabulka naměřených hodnot [27]. Hodnoty jsou dosaženy vzorkováním reálných materiálů v laboratoři. Tím lze dosáhnout (v počítačovém zobrazení) velmi realistického vzhledu objektů [6].

Poslední způsob reprezentace *BRDF fitting*, [6]. Tato metoda se používá pro zjednodušování. Po ukončení měření je BRDF aproximováno do vybraného analytického modelu BRDF. To znamená, že jsou vybrány takové analytické parametry, které nejlépe vystihují naměřená data, jak je popsáno v [6].

V další části budou popsány čtyři základní modely, ze kterých jsou dále konstruovány ostatní modely a většina autorů [6, 20, 27], právě tyto modely uvádí. Všechny modely jsou vypsány v tabulce 3.3.1.

Tabulka 3.3.1 Přehled modelů a jejich vlastností [27]

Název modelu	Anizotropní	Poměr mezi dif. a zrc. odrazem	Princip modelu	Reprezentace
Ashikhmin, Shirley	Ano	Fixní	Empirický	Funkce
Cabral and al.	–	–	Tabelovaná výšková pole představující nerovnosti povrchu	Tabulky
Cook and Torrance	Ne	Fixní	Optika paprsku	Funkce
Gondek, Meyer, Newman	Ano	–	Vlnová optika	Adaptivní koule
He, Torrance, Sillion, Greenberg	Ano	–	Vlnová optika	Funkce
Kajiya	Ano	–	Kirchhoffovy zákony	Tabulky
Lafortune, Foo, Torrance, Greenberg	Ano	Variabilní	Empirický	Funkce
Lambert	Ne	Pouze difuzní	Empirický	Funkce
Oren, Nayar	Ne	Pouze difuzní	Optika paprsku	Funkce
Phong	Ne	Fixní	Empirický	Funkce
Poulin and Fournier	Ano	Ne	Optika paprsku	Funkce
Schlick	Ne	Fixní	Empirický	Funkce
Schlick	Ano	Variabilní	Empirický	Funkce
Shirley, Hu, Smits, Lafortune	Ne	Variabilní	Empirický	Funkce
Torrance and Sparrow, Blinn	Ne	Fixní	Optika paprsku	Funkce
Neumann, Neumann, Szirmay-Kalos	Ne	Fixní	Empirický	Funkce
Ward	Ano	Fixní	Lineární funkce	Funkce

První model BRDF je **Lambertův model**. Tento model je nejzákladnějším BRDF modelem a jeho chování je popsáno v úvodu této kapitoly.

### **Phongův model**

Phongův model [30] je nejvíce rozšířený model v počítačové grafice. Jedná se o jednoduchý empirický model, který sice nerespektuje zákon zachování energie, ale používá se díky své jednoduchosti. Podle [20], je jeho základní myšlenkou, že je Snellův zákon dodržován v zrcadlovém směru, v rovině dopadu, definované vektorem dopadajícího světla  $L_i$  a normálou povrchu;

$$f_{r(\Omega_r\Omega_i)} = \frac{k_d}{\pi} + \frac{k_s(n+2)}{2\pi} \cos^n(\theta) \quad (10) [6]$$

kde  $\Omega_i$  je směr dopadajícího záření a  $\Omega_r$  je směr odraženého záření,  $k_d$  je difúzní koeficient složky a  $k_s$  je koeficient zrcadlového složky,  $n$  definuje lesklost povrchu. Čím vyšší je hodnota  $n$ , tím více se povrch jeví jako zrcadlový,  $\theta$  je úhel mezi normálou povrchu a  $\Omega_i$ . Tento model byl upraven Lewisem, tak aby byla splněna podmínka zákona zachování energie, jak uvádí [27] – musí být splněno  $k_d + k_s \leq 1$  [6].

### **Torrance-Sparrow model**

Model Torrance a Sparrowa [31] je založen na geometrické optice – využívá myšlenku, že povrch tělesa je tvořen žlábkami, které mají tvar písmene V, jsou nahodile orientovány a vytvořeny ze zrcadlových mikro-plošek, jak je uvedeno [6, 27];

$$f_{r(\omega_0\omega_i)} = \frac{D(\Omega_h)G(\Omega_r, \omega_i)F_r(\Omega_r)}{4 \cos \theta_0 \cos \theta_i} \quad (11) [6]$$

kde  $\Omega_h$  je tzv. *poloviční vektor (half-vektor)*, který je definován jako;

$$\Omega_h = \frac{(\Omega_r + \Omega_i)}{|(\Omega_r + \Omega_i)|} \quad (12) [6]$$

což je „průměrný“ vektor mezi příchozím a odchozím vektorem.

$D$  je hustota pravděpodobnosti určující kolik plošek je orientováno daným směrem;

$$D(\Omega_h) = e^{-\sin \theta_h \sigma^2} \quad (13) [6]$$



kde  $\sigma$  je parametr modelu udávající lesklost tělesa.

Funkce  $G$  je geometrické zastínění (*geometrical attenuation*);

$$G_{(\Omega_r, \Omega_i)} = \min \left( 1, \min \left( \frac{2(n \cdot \Omega_h)(n \cdot \Omega_r)}{\Omega_r \Omega_h}, \frac{2(n \cdot \Omega_h)(n \cdot \Omega_i)}{\Omega_r \Omega_h} \right) \right) \quad (14) [6]$$

Jak popisuje [6], některé plošky si vzájemně stíní. Funkce  $G$  tedy udává hodnotu (od 0 do 1) kolik přicházejícího světla zůstává nezastíněného.

$F$  je Fresnelův vzorec odrazu [32], který určuje reflexi a propustnost světla dopadajícího na rozhraní dvou prostředí s různými indexy lomu. Fresnelův vzorec je jiný pro dielektrické a vodivé materiály.

Dielektrika:

$$F = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\eta_t \cos \theta_i - \eta_i \cos \theta_t}{\eta_t \cos \theta_i + \eta_i \cos \theta_t} \right)^2 + \left( \frac{\eta_i \cos \theta_i + \eta_t \cos \theta_t}{\eta_i \cos \theta_i - \eta_t \cos \theta_t} \right)^2 \right) \quad (15) [6]$$

Vodiče:

$$F = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{(\eta^2 + k_a^2) \cos \theta_i^2 - 2\eta \cos \theta_i + 1}{(\eta^2 + k_a^2) \cos \theta_i^2 + 2\eta \cos \theta_i + 1} \right)^2 + \left( \frac{(\eta^2 + k_a^2) \cos \theta_t^2 - 2\eta \cos \theta_t}{(\eta^2 + k_a^2) \cos \theta_t^2 + 2\eta \cos \theta_t} \right)^2 \right) \quad (16) [6]$$

kde  $\theta_i$  je úhel dopadu,  $\theta_t$  úhel lomu,  $\eta$  je index lomu,  $\eta_t$  je index lomu tělesa,  $\eta_i$  index lomu vnějšího prostředí a  $k_a$  je absorpční koeficient.

Uvedené Fresnelovy vzorce jsou aproximovány pro nepolarizované světlo.

Mimochodem, tak jak píše [27], model Orena a Nayara a Poulin-Fournierův model jsou konstruovány z Torrance-Sparrowova modelu.

### ***Wardův model***

Wardův model [33] je jednoduchý anizotropní a fyzikálně věrohodný model. Je využíván pro snadnou aproximaci dat (BRDF funkce  $f_r$ ), naměřených gonio-reflektometrem. Myšlenka tohoto modelu je obdobná jako u modelu Torrance a Sparrowa – povrch je tvořen mikro-ploškami, ale je vynecháno použití geometrického zastínění  $G$ ;

$$f_{r(\Omega_i, \Omega_r)} = \frac{k_d}{\pi} + \frac{k_s}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_r}} \cdot \frac{e^{-\tan 2\delta \left( \frac{\cos^2 \phi_e}{a_x^2} + \frac{\sin^2 \phi_e}{a_y^2} \right)}}{4\pi a_x a_y} \quad (17) [6]$$

kde  $\theta_r$  je úhel odrazu,  $k_d$  je koeficient difuzního odrazu,  $k_s$  koeficient zrcadlového odrazu,  $a_x$  je standardní odchylka sklonu mikro-plošky ve směru tangenty povrchu,  $a_y$  standardní odchylka sklonu mikro-plošky ve směru bitangenty povrchu,  $\Phi_e$  je zářivý tok a  $\delta$  je Diracův impuls. Diracův impuls [34] je funkce, která nabývá nuly v celém svém rozsahu s výjimkou nuly (impuls nekonečně úzký), kde nabývá nekonečné hodnoty (impuls nekonečně vysoký).

BRDF modely jsou funkce, které se používají v optice, pro popis odrazu světla. Hlavním oborem, který tyto funkce využívá, je počítačová grafika. Důvody pro použití těchto funkcí v počítačové grafice jsou vykreslování nebo simulace scén. BRDF může být v grafickém průmyslu také použita pro generování pohledu pozorovatele – v případě, že známe fyzický prostor a jeho vlastnosti (BRDF a světelné zdroje).

Funkce BRDF mohou být též použity v polygrafii. Díky tomu, že tato funkce může sloužit k měření vlastností povrchu – drsnost povrchu, vzhled a vady materiálu, optické vlastnosti, odrazivost a lesk materiálu. Tyto vlastnosti lze pozorovat pro různé typy papíru. Též lze pozorovat, změny v barevnosti a odrazivosti materiálu, při různých úhlech dopadu a odrazu světla a též při různých úhlech pozorování. To je předmětem této práce. Způsob měření funkce BRDF  $f_r$  a použité metody měření jsou popsány v následující podkapitole 3.4.

### 3.4 Měření BRDF

Tradiční nástroje pro měření povrchových vlastností materiálů jsou leskoměr, kolorimetr (multi-angle kolorimetr), spektrofotometr (gonio-spektrofotometr) a gonio-reflektometr. Měřicí zařízení je vybráno podle toho, jaké hodnoty chceme měřením získat a co přesně zařízením chceme změřit.

Pro dostatečný popis, povrchových vlastností materiálu, by mělo mít dané zařízení čtyři stupně volnosti [35]. Ty zaručují potřebné pokrytí celé hemisféry – potřebné pro proměření materiálu ve všech úhlech dopadu i odrazu. Měřicí přístroj by měl tedy umožňovat pohyb do čtyř různých směrů (možnými pohyblivými částmi zařízení jsou většinou osvětlovací část, část se vzorkem a detekční část). Takovými zařízeními, pro dostatečný popis vlastností povrchu, jsou gonio-reflektometry a gonio-spektrofotometry.

### 3.4.1 Části měřících zařízení

Gonio-reflektometr je zařízení skládající se ze tří hlavních částí – osvětlovací části, části se vzorkem a detekční části. Konstrukce [35, 36, 37] gonio-reflektometru mohou být různé, ale vždy budou tyto části obsahovat. **Detekční částí**, respektive detektorem gonio-reflektometru je spektroradiometr [36, 37]. Ten se skládá ze dvou částí, a to ze spektrografu a 1024pixelového detektoru s diodovým polem, pokrývajícím celé viditelné spektrum.

Obdobným přístrojem, jako je gonio-reflektometr, je gonio-spektrofotometr. Obsahuje stejné části jako gonio-reflektometr a může mít i podobné konstrukce. Liší se v detekční části, tedy detektorem. Detektorem gonio-spektrofotometru je spektrofotometr. Jednou z částí spektrofotometru je monochromátor (nebo optický filtr). Monochromátor je zařízení izolující z polychromatického záření úzký pás vlnových délek. Monochromátor se skládá ze vstupní štěrbin, disperzního prvku, výstupní štěrbin a zaostřovací pomocné optiky (čočky, zrcadla). Hlavní částí monochromátoru je disperzní prvek, ten rozkládá dopadající záření podle jednotlivých vlnových délek  $\lambda$ . Disperzním může být buď hranol, nebo mřížka. Další částí spektrofotometru je detektor. Tím může být například fotonásobič, diodové pole nebo CCD čip.

Do detektoru detekční části gonio-reflektometrů a gonio-spektrofotometrů je směřováno světlo odražené od povrchu vzorku. Podle [35], je směřováno pomocí achromatické sběrné čočky. Plocha detekovaného vzorku je definována průměrem otvoru (clonou) umístěného před touto čočkou. Detekční plocha by měla být menší než osvětlená plocha vzorku.

Detektory by měly být schopny, měřit intenzity v rozsahu vlnových délek, které jsou pro daná měření důležitá, např. v celé viditelné oblasti. Podle toho by měly být také vybrány. Jako sběrné prvky detektorů se ve většině případů používají CCD čipy [12, 35, 38].

#### ***Osvětlovací část***

Z osvětlovací soustavy, nástrojů užívaných k měření BRDF, by měl vycházet, kolimovaný a co nejméně divergentní svazek paprsků. Světelný zdroj by měl být bodový a měl by splňovat tyto apriorní požadavky [37] – měl by být spektrálně kontinuální v blízké ultrafialové (dále jen UV), viditelné a blízké infračervené záření oblasti záření, také měl by být spektrálně a radiometricky stabilní v čase a nepolarizovaný.

Osvětlovací část měřících zařízení se skládá ze zdroje světla a soustavy čoček a clon. Ty mají zajistit, aby zdroj splňoval výše uvedené požadavky a světlo dopadalo na vzorek správně, pod správným úhlem. Možné konstrukce osvětlovacích částí jsou popsány v [35, 37, 39].

Jako standardní zdroj polychromatického světla se využívá halogenových zdrojů [35, 39]. Nejčastěji je používána halogenová žárovka, která má vysokou stabilitu a trvalý výkon pro vlnové délky viditelného světla.

### ***Mechanický systém – konstrukce***

Konstrukce jednotlivých strojů pro měření BRDF mohou být různé, od jednoduchých sestav [12, 13, 40] až po složité „roboty“ [39]. Protože v praktické části bude používáno zařízení s jednoduchou konstrukcí, které bylo sestaveno na Katedře polygrafie a fotofyziky (KPF), budou zde hlavně popsány možné konstrukce (geometrie) zařízení s jednoduchou sestavou.

Prvním způsobem konstrukce je použití pohyblivého vzorku, a to tak, že je vzorek připevněn na otočném válci. Válec se točí, je osvětlován pevnou osvětlovací soustavou a snímán pevným detektorem. Stupně volnosti má tedy v tomto případě mobilní vzorek. Tuto konfiguraci popisuje J. S. Arney a kol. [38] a byla zvolena pro jedna ze zařízení Národního institutu pro normalizaci a technologie (NIST) [41, 42]. Hodně se tyto měřící zařízení využívají k měření lesku.

Dalším možným způsobem je naopak pevný vzorek a mobilní osvětlovací a detekční část. Jsou využívána motorizovaná ramena se zdrojem osvětlení a detektorem. V tomto případě mají tedy stupně volnosti tyto dvě části. Tento způsob je využíván N. Matsapeym a kol. [35].

V neposlední řadě je možné využít pohyblivého vzorku a pohyblivé části s osvětlením [36, 40] nebo pohyblivého vzorku a pohyblivé části s detektorem. V prvním případě je úhel odrazu a dopadu volen právě osvětlovací částí a otočným vzorkem, v druhém případě pohyblivým vzorkem a mobilním detektorem. Tyto sestavy jsou velmi jednoduché a též jednoduše sestavitelné. Také proto bude varianta s otočným vzorkem a pohyblivou detekční částí použita k měření v experimentální části této práce.

Ren a Zhao [43] navrhli jinou za zajímavou možnost řešení konstrukce měřícího zařízení BRDF. Je sestavené z pohyblivé osvětlovací části (jejímž zdrojem je laser), hranolu dělicího paprsky, detektoru s plošným CCD polem a hemi-parabolického zrcadla. Hlavní výhodou tohoto systému je jeho rychlost, nicméně použití monochromatického záření omezuje jeho možnosti uplatnění při měření.

Přesnost měřícího zařízení je udávána jak mechanickou, tak optickou přesností, tak jak je uvedeno v [35]. Dobré mechanické přesnosti se dá, dosáhnou přesnými polohovadly přístroje a jeho správným nastavením. Těžší je dosáhnout přesnosti optické. Ta je optimalizována minimalizací divergence dopadajícího svazku paprsků světla a uhlovým přijetím detektoru.

### 3.4.2 Charakterizace měřících zařízení

Před samotným měřením je vhodné zařízení charakterizovat/kalibrovat – ověřit, jak přesná změří data. Toho je možno dosáhnout porovnáním známých dat referenčního standardu s naměřenými daty tohoto standardu, na daném přístroji. Tak jak je uvedeno v [35].

Nejužívanějším standardem je *Spektralon* [35, 36, 37, 39]. Spektralon je název pro slinutý Polytetrafluorethylen (PTFE) a jeho výrobcem je firma Labsphere. Slinutý PTFE je možné získat i od jiných firem, pod jinými názvy, jako např. OptoPolymer, Zenith polymer a Fluorilon. Spektralon je však nejznámější a nejvyžívanější.

Slinuté formy PTFE mají odrazivé hodnoty [44] kalibračního faktoru  $\beta$  (viz kapitola 3.4.3) obecně  $> 0,95$  v rozmezí od 250 nm do 2500 nm a hodnoty kalibračního faktoru  $\beta > 0,99$  v určitém rozsahu mezi 400 nm a 1500 nm.

Výhodami [44] slinutého PTFE jsou nejvyšší difuzní chování ze všech dostupných materiálů, tedy poměrně dobré chování blízké ideálnímu difuznímu rozptylu. Též jeho odrazivost v UV oblasti spektra ho odlišuje od ostatních dostupných standardních materiálů.

Jeho nevýhodami jsou postupná degradace [45], i když je uložen v temnu, a jeho rychlé znečištění prachem [44], vlivem elektrostatického náboje.

Dalšími difuzními standardy jsou například standardy uvedené v [44]: BCR-406 – opálové sklo, CERAM – keramická 88% bílá dlaždice, lisovaný prášek BaSO<sub>4</sub> nebo elementární prášek BaSO<sub>4</sub>.

### 3.4.3 Kalibrace měření

Podle standardního protokolu vydaného institucí American Society for Testing and Materials (ASTM), tedy ASTM protokolu [46], je možné provést kalibraci absolutní [36] a relativní [36, 37] metodou.

#### *Absolutní metoda*

Kalibrace absolutní metodou spočívá v porovnání odražených a dopadajících světelných paprsků, v jejich poměru. Detektor se umístí přímo naproti zdroji osvětlení a snímá celý světelný svazek, který při měření dopadá na vzorek. Zachycuje tedy intenzitu světelného zdroje. Následně se změří odražený tok od vzorku v daných úhlových nastaveních. Tyto naměřené hodnoty se následně porovnají.

Podle principu absolutní metody [13] je tedy získáno příchozí záření  $\varepsilon_i$ , dopadající na povrch vzorku, pokud je známá energie  $P_i$  zdroje záření a osvětlovaná plocha vzorku  $S$ . Odraženého záření  $L_r$ , dopadajícího na detektor, je dosaženo, pokud jsou známé veličiny – detekovaná energie  $P_s$ , prostorový úhel  $\Omega$  a velikost detekční plochy  $S \cdot \cos \theta_r$ ;

$$f_r = \frac{L_r}{\varepsilon_i} = \frac{(P_s / \Omega S \cos \theta_r)}{(P_i / S)} = \frac{P_s}{P_i \Omega \cos \theta_r} \left[ \frac{1}{\text{sr}} \right] \quad (18) [13]$$

### **Relativní metoda**

Relativní metoda využívá porovnání odraženého signálu od testovaného vzorku a odraženého signálu od referenčního vzorku (ve většině případů se používá Spektralon (viz kapitola 3.4.2)), u kterého jsou známé hodnoty BRDF  $f_r$ . Vzorek se nastaví do požadovaných úhlů a změří se od něj odražený signál. Poté se proměří referenční standard. Z těchto hodnot se vypočte kalibrační faktor  $\beta$  – převod naměřených dat vzorku, na hodnoty BRDF  $f_r$ .

Kalibrační faktor  $\beta$  [39, 44], je získán jako poměr odraženého záření od vzorku  $L_r$  a odraženého záření od referenčního standardu  $L_r^{IDS}$ ;

$$\beta(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{L_r^{IDS}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)} \quad (19)$$

kde  $\theta_i$  je zenit dopadu,  $\phi_i$  je azimut dopadu,  $\theta_r$  je zenit odrazu a  $\phi_r$  je azimut odrazu.

Referenční standard – Ideálně difuzní standard IDS [39, 44], je charakterizován jako povrch, který má Lambertovské chování. Tedy tak, že odráží, na něj dopadající záření, zcela difuzně. Takovýto standard je však pouze teoretický. Materiál s takovými vlastnostmi neexistuje. Proto musí být IDS dopočítáván. Standard IDS je tedy pouze teoretický koncept, získaný v rámci měření, a to za stejných podmínek. IDS je závislý na geometrii měření, tedy na všech zúčastněných úhlech.

Podobný princip jako má BRDF  $f_r$  (viz kapitola 3.1), má koeficient záření  $q$  [39, 44] (v daném směru, za daných podmínek ozařování. Koeficient záření  $q$  je poměr odraženého záření od osvětlovaného materiálu  $L_r$  a záření dopadajícího na osvětlovaný materiál  $\varepsilon_i$ :

$$q(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{\varepsilon_i(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)} \quad (20)$$

Použití koeficientu  $q$  a BRDF  $f_r$  na jedné straně namísto faktoru  $\beta$  na druhé straně, umožňuje získat stejné výsledky, při popisu úhlového řešení difuzních odrazů.

Je známo, že IDS [39, 44] –  $\beta_{PRD} = 1$  a  $q_{PRD} = 1/\pi$  z čehož lze usuzovat:

$$L_r^{PRD} = \frac{\varepsilon_i}{\pi} \quad (21) [44]$$

$$\beta = q \cdot \pi \quad (22) [44]$$

To samé platí pro funkci BRDF  $f_r$ , která je ale omezena pouze na směrovou geometrii:

$$\beta = f_r \cdot \pi \quad (23) [44]$$

Kalibrační faktor  $\beta$  má tedy hodnotu jedna. Na rozdíl od koeficientu záření  $q$ , a také funkce BRDF  $f_r$ , který má hodnotu  $1/\pi$ , to odpovídá hodnotě 0,318. Rozdíl mezi těmito dvěma specifikacemi je tedy hodnota  $\pi$ .

Mezi hodnotou BRDF  $f_r$  a hodnotou  $q$  je rozdíl v měřené geometrii. Obecný koncept koeficientu záření  $q$  má širší rozsah definice než funkce BRDF  $f_r$ . Koeficient záření  $q$  není omezen pouze na směrovou geometrii určenou směrovými funkcemi  $\theta_i$  a  $\phi_i$ .

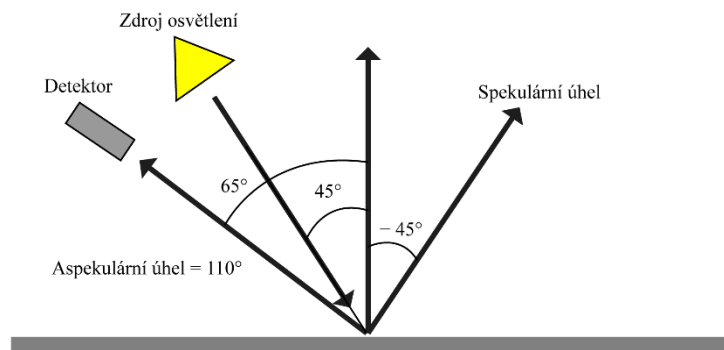
Absolutní metoda měření je vhodná zejména pro povrchy s chováním modelu zrcadlového odrazu. Pro rozptylující Lambertovské povrchy se hodí spíše relativní metoda kalibrace měření.

#### 3.4.4 Re prezentace naměřených dat

Standardní protokol ASTM [47], specifikuje měření barev pozorovaných při aspekulárních úhlech (aspekulární úhel, je celkový pozorovaný úhel od úlu spekulárního odrazu až po detektor). Dle tohoto protokolu se naměřené hodnoty udávají následujícím způsobem.

Jednotlivé obousměrné geometrie jsou specifikovány osvětlovacími a detekovanými úhly respektujícími normálu roviny měřeného vzorku. Úhly jsou, při měření a následné reprezentaci dat, vztaženy k normále vzorku. Úhly naměřené na stejné straně od normály, jako je dopadající svazek parků (zdroj osvětlení), se reprezentují jako pozitivní úhly.

Úhly měřené na opačné straně od normály, než je zdroj osvětlení, jsou udávány jako záporné (Obrázek 3.4.4.1).



Obrázek 3.4.4.1 Příklad osvětlovací a detekční geometrie [47]

*Anormální osvětlovací úhel =  $45^\circ$  a anormální detekovaný úhel =  $65^\circ$ ; proto je aspekulární úhel roven  $45 + 65 = 110^\circ$ .*

Z obrázku 3.4.4.1 je patrné, že vzorek osvětlovaný pod úhlem  $45^\circ$  má úhel odrazu (spekulární)  $-45^\circ$ . Detekční úhel od normály je  $65^\circ$ , to znamená, že detekční úhel od spekulárního odrazu je  $110^\circ$  – to se rovná aspekulárnímu úhlu. Aspekulární úhel je tedy roven součtu anormálního osvětlovacího úhlu a anormálního detekovaného úhlu.



## 4. Goniospektrometrické měření

Tato kapitola je zaměřena na praktickou část této práce. Zabývá se přípravou tištěných vzorků, sestavením a kalibrací gonio-spektrofotometru. Zaměřuje se hlavně na následné měření připravených vzorků a vyhodnocení získaných dat pomocí BRDF funkce.

### 4.1 Vzorky

Pro účel této práce byly vytvořeny vzorky ve třech sadách. Jednotlivé sady se liší použitými substráty, na kterých je natištěna barva. Bylo použito sedm barev. Každá sada tedy obsahuje sedm vzorků.

Jako substráty byly použity papíry s charakteristikou udanou v tabulce 4.1.1:

- Papír matný Luxosatin firmy Papyrus Group
- Papír lesklý Chromolux firmy M-real Zanders
- Papír metalický se stříbrným metalickým nátěrem

*Tabulka 4.1.1 Charakteristika papírových substrátů*

	Matný	Lesklý	Metalický
Plošná hmotnost <sup>1</sup> [gm <sup>-2</sup> ]	120	150	70
Lesk při geometrii 60° <sup>2</sup> [GU]	5,9	89,5	287
Bělost $W_{CIE D65/10}^3$	118,6	82,4	–

<sup>1</sup> Dána výrobcem (matný, lesklý substrát), změřena na kvadrantových vahách (metalický substrát)

<sup>2</sup> Změřen leskoměrem BYK micro-Tri-gloss  $\mu$ , zprůměrováno z pěti hodnot

<sup>3</sup> Změřena spektrofotometrem X-Rite SpectroEye s filtrem D65, zprůměrováno z pěti hodnot

Substráty byly vybrány tak, aby měli různé vlastnosti a mohlo být pozorováno, jak tyto rozdílné vlastnosti měřící zařízení pochyťí.

Všech sedm použitých barev, jsou barvy od firmy BRANCHER. Barvy byly vybrány tak, aby svými reflexními spektry, co nejvíce pokrývaly celé viditelné spektrum. Jedná se konkrétně o barvy Purple Pantone Krypto (P), Reflex Blue Pantone Krypto (RB), Proces Blue Pantone Krypto (PB), Green Pantone Krypto (G), Yellow Pantone Krypto (Y), Warm Red Pantone Krypto (WR) a Rubine Red Pantone Krypto (RR).

### 4.1.1 Příprava vzorků

Vzorky byly připraveny na laboratorním nátiskovém ofsetovém přístroji C1 IGT. Pro tisk byl použit nátiskový váleček IGT 402.083 Rubber blanket. Tiskový tlak byl nastaven na 400 N.

Nastříhané pruhy nosných substrátů barvy o velikosti  $35 \times 150$  mm, byly vloženy na desku nátiskového přístroje a potištěny pomocí nátiskového válečku, na němž byla naválena barva.

Pruhy testovaných papírů byly potištěny barvou, tak aby její vrstva na papíru byla  $1,5 \pm 1$   $\text{gm}^{-2}$ . Barvy byly nanášeny s tloušťkou nánosu přibližně  $1,4$   $\mu\text{m}^1$ .

Všechny typy vzorků byly vytištěny vždy pětkrát, z nichž byl vždy jeden vzorek, s nejmenší odchylkou nánosu od  $1,5$   $\text{gm}^{-2}$ , vybrán pro měření gonio-spektrofotometrem.

## 4.2 Gonio-spektrofotometr

Měřicím zařízením funkce BRDF byl použit gonio-spektrofotometr sestavený na Katedře polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice. Tento gonio-spektrofotometr je jednoduché zařízení skládající z tří hlavních částí. Tyto části jsou – osvětlovací část se zdrojem světla, otočný držák vzorku a detektor pohybující se kolem vzorku. Z detektoru jsou předávána data do počítače, kde mohou být dále zpracovávána. Části gonio-spektrofotometru a jejich funkce jsou popsány v následující kapitole 4.2.1.

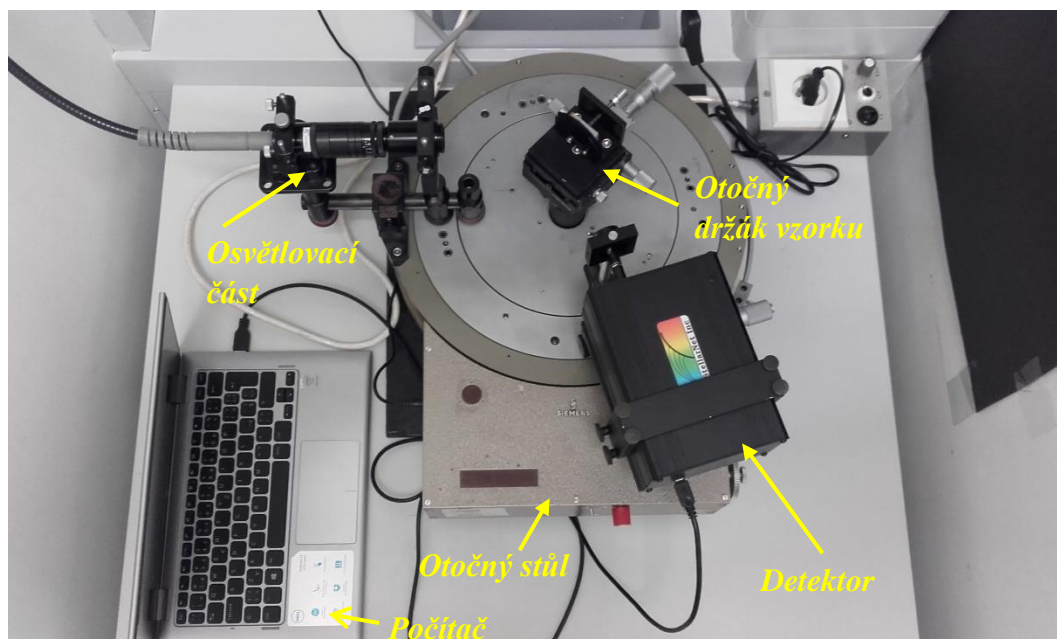
### 4.2.1 Části gonio-spektrofotometru

Základnou gonio-spektrofotometru je točný stůl SIEMENS původního rentgenového difraktometru, na němž jsou všechny tři hlavní části připevněny (Obrázek 4.2.1.1).

Otočného stolu je především využíváno k pohybu detektoru okolo vzorku. K jeho pohybu slouží buď ruční pohon (pro jemnější posun) nebo pohon motorkem (pro potřeby posunu o větší vzdálenosti). K odečtu přesné vzdálenosti (úhlu odrazu) slouží počítadlo umístěné přímo na otočném stole.

---

<sup>1</sup> Tloušťka nánosu je pouze orientační. Byla spočítána pomocí hustoty barev, které byly změřeny pyknometrem. Měření bylo provedeno pouze u dvou barev. Jejich hustota byla však téměř stejná. Proto byl z těchto dvou hodnot vypočten průměr a s tímto průměrem, byla vypočtena tloušťka nánosu barvy.



*Obrázek 4.2.1.1 Gonio-spektrofotometr – Otočný stůl SIEMENS a na něm připevněné tři hlavní části gonio-spektrofotometru*

#### **4.2.1.1 Osvětlovací část**

Před sestavením samotného gonio-spektrofotometru byla nejdříve sestavena jeho osvětlovací část. Ta je složena ze zdroje světla, optického vlákna a optické soustavy. Ze zdroje světla je světlo vedeno do optické soustavy pomocí optického vlákna. Z optické soustavy dopadá světelný svazek na vzorek (Obrázek 4.2.1.1.1).

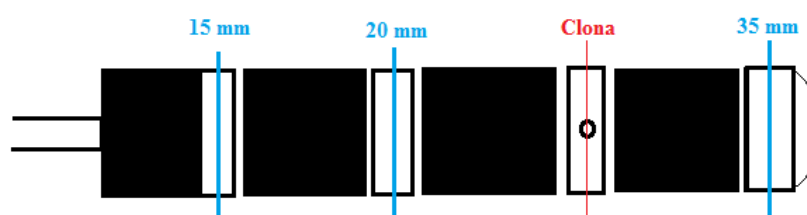


*Obrázek 4.2.1.1.1 Optická soustava osvětlovací části gonio-spektrofotometru, z níž dopadá světelný svazek na vzorek*

Zdrojem světla gonio-spektrofotometru je halogenová 100W žárovka OSRAM, před níž je umístěn denní filtr. Tak je dosaženo modulace spektrálního složení dopadajícího záření tak, aby se potlačil velký nepoměr mezi krátkovlnnou a dlouhovlnnou částí spektra samotné halogenové žárovky.

Při sestavování optické soustavy (Obrázek 4.2.1.1.2), byla snaha dosáhnout toho, aby svazek z ní vycházející byl kolimovaný a co nejméně divergentní, aby splňoval podmínky uvedené v kapitole 3.4.1 Části měřících zařízení – osvětlovací část.

Optická soustava osvětlovací části gonio-spektrofotometru se skládá ze soustavy čoček a clony. Sestava se skládá z čoček s ohniskovými vzdálenostmi 15 mm, 20 mm a 35 mm.



Obrázek 4.2.1.1.2 Jednoduché schéma optické soustavy

Osvětlovací část gonio-spektrofotometru je jednou ze tří hlavních částí, jak již bylo zmíněno výše, a je jedinou z nich která má pevné umístění. Respektive nelze měnit její polohu, směr osvětlení, ať už pohybem do stran, či natáčením optické části.

#### 4.2.1.2 Otočný držák vzorku

Otočný držák vzorku (Obrázek 4.2.1.2.1) je připevněn ve středu otočného stolu. Je umístěn tak, aby na něj byla namířena osvětlovací část a způsobem, aby se okolo něj mohl nezávisle otáčet detektor.

Otočný držák slouží jako stojánek vzorku. Pomocí něj lze vzorek připevnit na dané místo a nastavovat jeho polohu, a to polohu úhlu, pod kterým na vzorek dopadá světlo z osvětlovací části. Nastavuje se na něm tedy úhel dopadu světla. K přesnému odečtení úhlu dopadu slouží stupnice ve spodní části stojanu. Nastavování úhlu je prováděno pomocí mikro-šroubů.

K přesnému vymezení dopadu světla z osvětlovací části, slouží černý vymežovací plíšek s půlkruhovým otvorem. Průměr otvoru byl vytvořen, podle průměru dopadajícího světelného svazku (v přímém směru), což je 2,34 cm.

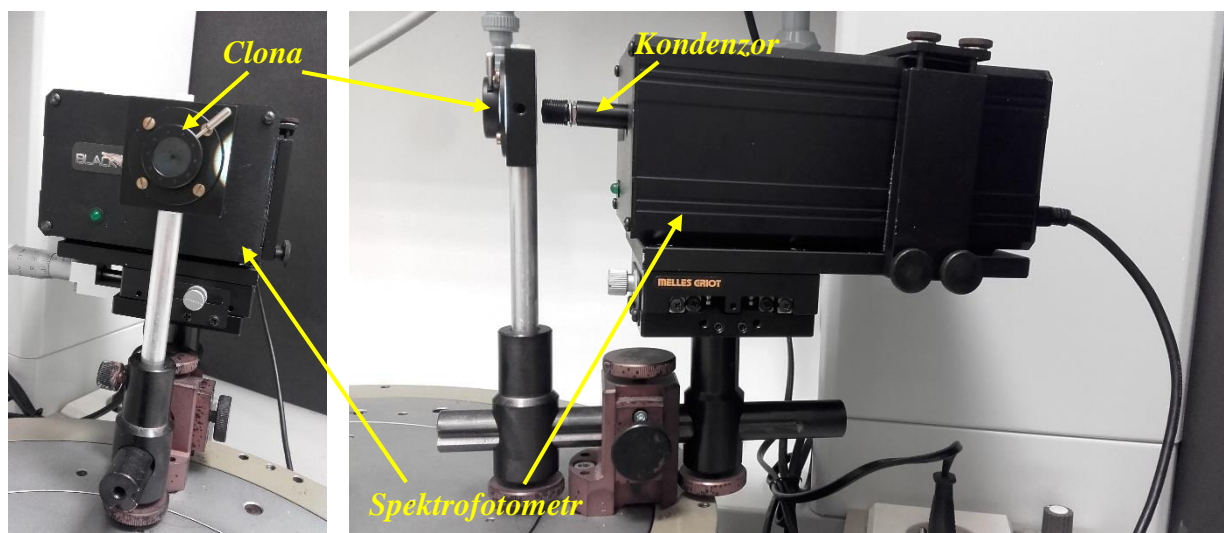
Hlavní část stojánku je vytvořena z otočného, nastavitelného stolečku od firmy Melles Griot.



Obrázek 4.2.1.2.1 Otočný držák vzorku – Detail otočného držáku (vlevo) a ukázka postavení otočného držáku, vůči osvětlovací části a detektoru (vpravo)

#### 4.2.1.3 Detekční část

Detekční část slouží k zachycení a zaznamenání odraženého světelného toku od vzorku. Detekční část se skládá z detektoru (kterým je spektrofotometr), počítače (do něhož jsou z detektoru posílána data) a clony, která je předsazena před detektorem (Obrázek 4.2.1.3.1).



Obrázek 4.2.1.3.1 Detektor (Spektrofotometr) s předsazenou clonou

Hlavní složkou detekční části je detektor, tedy spektrofotometr. Jedná se o spektrofotometr StellarNet BLACK-Comet, který obsahuje pevnou štěrbinu o velikosti 100  $\mu\text{m}$ , která určuje nativní rozlišení měření na hodnotu 3 nm. Sběrnou částí spektrofotometru je kondenzor. Před kondenzorem je postavena clona, s průměrem otvoru 0,15 cm. Clona a vzdálenost detektoru od vzorku vymezují prostorový úhel, odraženého světla od vzorku a dopadajícího na kondenzor detektoru. Velikost prostorového úhlu je 0,00014 sr.

Detektor se clonou jsou připevněny na pohyblivém rameni otočného stolu. Díky tomu je možné s detektorem pohybovat do stran, okolo vzorku, a nastavovat detekovaný úhel odrazu od vzorku – tak, jak je zmíněno výše na začátku kapitoly 4.2.1. Části gonio-spektrofotometru, při popisu otočného stolku. Příklad polohy detektoru je výše na obrázku 4.2.1.1 a obrázku 4.2.1.2.1.

Snímaný odražený světelný tok od vzorku, tedy tok dopadající na detektor, je ze spektrofotometru předáván do počítače. V počítači slouží k zobrazení a dalšímu zpracování dat program SpektraWiz Shortcut.

V programu SpektraWiz Shortcut jsou pro snímání odraženého světelného toku nastavovány následující parametry:

- Integrační čas (Detector integration time) – snižování či zvyšováním integračního času je regulována síla dosaženého signálu
- Počet spekter (Number of Scans to Average), ze kterých je výsledný signál průměrován – snižováním či zvyšováním počtu spekter je regulován šum dosaženého signálu spektra
- XTiming resolution control – pomocí této funkce je regulována síla a kvalita dosaženého signálu

#### **4.2.2 Kalibrace gonio-spektrofotometru**

Před samotným měřením tištěných vzorků musel být gonio-spektrofotometr nakalibrován. Cílem bylo nastavit měřicí přístroj tak, aby detekoval, co nejkvalitnější signál s vysokou intenzitou a co nejmenším šumem. K tomu slouží v první řadě mechanické nastavení gonio-spektrofotometru a následně nastavení parametrů (Integračního času, Počtu průměrovaných spekter, funkce XTiming resolution control) v počítačovém programu SpectraWiz Shortcut.

### ***Mechanická kalibrace***

Při mechanickém nastavení gonio-spektrofotometru, byla jako první nastavována osvětlovací část, respektive poloha její optické soustavy. Následně poloha spektrofotometru a clony. Nakonec byla nastavena poloha otočného držáku vzorku.

Poloha optické soustavy osvětlovací části byla nastavena jako první a od ní se odvíjelo nastavení ostatních částí gonio-spektrofotometru. Optická soustava byla nastavována pomocí vodováhy, tak aby její vodorovná poloha byla v rovině. To je důležité pro to, aby byl držák vzorku (lépe řečeno vzorek) osvětlován přímo, v celé ploše se stejnou intenzitou světelného toku.

Po nastavení optické soustavy osvětlovací části, byla nastavena clona předsazená před detektorem. Clona byla nastavena podle „obrazu“ světleného toku, vycházejícího z optické soustavy. Rameno, které clonu s detektorem drží připevněny k otočnému stolu, bylo nastaveno do polohy  $0^\circ$ . Clona byla dána do držáku ramene a podle „obrazu“ světleného toku, byla nastavována její výška. Cílem nastavení bylo, aby se clona nacházela přímo ve středu „obrazu“ světleného toku. Po nastavení polohy, byla clona do držáku ramene připevněna, pomocí šroubů.

Následovalo nastavení samotného detektoru. K nastavení sloužili jak již nastavená optická soustava a clona, tak také program SpectraWiz Shortcut, ve kterém byla sledována intenzita signálu odečteného nastavovaným detektorem.

V první řadě byla nastavena výška detektoru, podle „obrazu“ světleného toku procházejícím clonou, tak aby byl kondenzor detektoru uprostřed tohoto „obrazu“. Postup byl stejný jako při nastavování clony. Následně byla nastavována stranová poloha detektoru, natáčením detektoru a posouváním stolku, na kterém je detektor připevněn.

Do této chvíle se jednalo o hrubé nastavení detektoru. Pro přesnější nastavení byl poté používán program SpectraWiz Shortcut. Podle v něm zobrazené intenzity signálu, byla nastavena již přesná poloha detektoru, a to jak výška, tak jeho poloha do stran.

Nakonec byl nastaven otočný držák vzorku. K tomu sloužili obě již nastavené části gonio-spektrofotometru. Nejprve byl otočný držák vzorku nastaven podle osvětlovací části. Držák byl seřízen do nulové polohy na nastavovací stupnici. Poté byla podle dopadajícího světelného toku nastavena jeho výška, tak aby světelný tok dopadal do půlkruhového otvoru černého vymezení plíšku. Pro přesné nastavení otočného držáku vzorku do polohy  $0^\circ$ , vůči osvětlovací části, bylo použito zrcátko. To bylo vloženo do otočného držáku vzorku a podle jeho odrazu byla nastavována přesná poloha. Šlo o to, aby zrcátko odráželo světelný

tok zpět do optické soustavy. Aby tedy optická soustava byla ve středu „obrazu“ odraženého světleného toku od zrcátka.

Po přesném nastavení nulové polohy držáku vůči osvětlovací části, byl držák nastavován tak, aby světelný tok dopadal vždy doprostřed vzorku při jakémkoliv jeho natočení. Tedy při jakémkoliv nastaveném úhlu dopadu světla na vzorek. Toho bylo dosaženo posunem otočného držáku vzorku, pohybem dopředu a dozadu, prostřednictvím mikro-šroubů.

Následovala kontrola kompatibility všech tří částí. Nastavením otočného držáku vzorku s vloženým zrcátkem a detektoru do různých poloh a odečítám signálu v programu SpectraWiz Shortcut. Všechny části byly nastaveny tak, aby při spekulárním odrazu byla detekovaná intenzita maximální. Tím byla zakončena mechanická kalibrace.

Mechanická kalibrace gonio-spektrofotometru sestaveného na Katedře polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice je poměrně obtížná. Vše je nastavováno podle citu uživatele a těžko lze objektivně zhodnotit jakou má nastavení přesnost. Při nastavování jednotlivých částí nejsou na přístroji žádné stupnice, nebo jiné pomocné prvky, (kromě stupnice na otočeném držáku vzorku) kterými by se mohl uživatel při nastavování řídit. Části jsou nastavovány intuitivně podle „obrazu“ světleného toku. Každým uživatelem může být v podstatě tento přístroj nastaven trochu jinak, i když použije stejný postup kalibrace.

Další nevýhodou této kalibrace je to, že nelze provést příliš jemně. Všechny části jsou posouvány pouze ručně, zaleží tedy na tom, jak jemný posun je schopen uživatel provést. Také jsou všechny části gonio-spektrofotometru připevňovány pomocí šroubů. To má za následek, že při utažení dojde ve většině případů k posunu od nastavené polohy (hlavně při nastavení do stran). Tomu lze předejít mírným posunem nastavené polohy před utažením – po utažení dojde k posunu do správné (chtěné polohy). K tomu je ale třeba odhad „velikosti“ daného posunu.

Bohužel i přes to, že přístroj je utahován šrouby, musí se s ním zacházet velmi opatrně. Všechny části jsou sice připevněny ve správných polohách na svých místech, ale jen velmi chatrně. Pokud uživatel přístroje, do nějaké části třeba drkne rukou, dojde velmi pravděpodobně k jejímu posunu a odchýlí se od kalibrace. Nejvíce náchylný k posunu je detektor. Ten je nejméně pevně připevněn na svém místě.

Z těchto důvodů musí být před každým měřením kontrolována poloha všech částí přístroje a tedy správnost mechanické kalibrace.



### ***Nastavení parametrů v programu SpectraWiz Shortcut***

Nastavení parametrů v programu SpectraWiz Schortcut se zaměřuje již na konkrétní substráty a určení konkrétních parametrů s jakými budou substráty měřeny.

Jednotlivé vzorky papírových substrátů byly vloženy do již mechanicky z kalibrovaného přístroje. Podle kvality a intenzity detekovaného signálu zobrazeného v programu SpectraWiz Schortcut byly stanoveny parametry:

- Integrační čas (Detector integration time) byl stanovován tak, aby mohl pro všechny papíry stejný. Tak aby nebyl pro určité substráty příliš vysoký a pro jiné příliš nízký. Tedy tak, aby byl i u substrátu s nízkou odrazivostí odečten dostačený signál.

Integrační čas byl stanoven na 136 ms.

- Počet spekter (Number of Scans to Average), ze kterých je výsledný signál průměrován, byl stanoven pro každý substrát odlišně. Pro substrát s nízkou odrazivostí, a tedy s nízkým signálem, byl stanoven větší počet spekter, ze kterých je signál průměrován. Nízký signál má větší šum.

Proto pro matný papír bylo zvoleno 20 spekter, pro papír lesklý 12 spekter a pro papír metalický pouze 6 spekter.

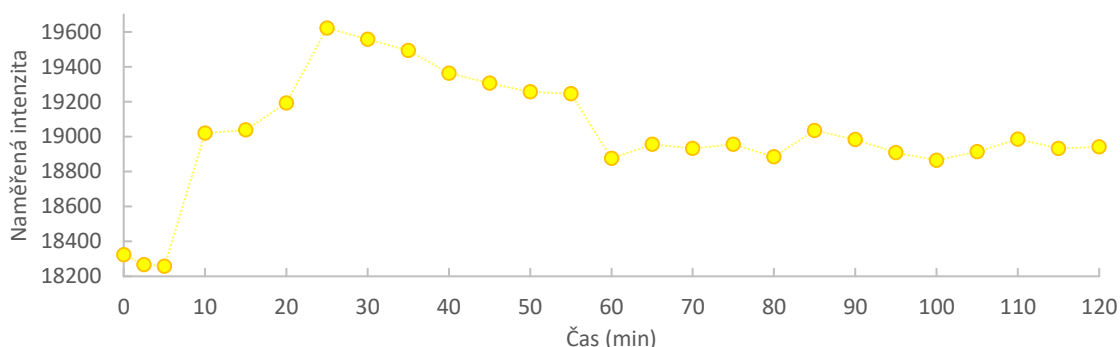
- XTiming resolution control byl zvolen pro všechny substráty stejně, a to s hodnotou 3-high, protože tato hodnota zaručuje nejvyšší sílu signálu a signál nejkvalitnější.

Při měření jiných vzorků mohou být tyto parametry nastaveny jinak a není zcela jasné, zda a jakým způsobem ovlivňuje nastavení těchto parametrů výsledky měření.

#### **4.2.2.1 Stálost zdroje**

Před samotným měřením na gonio-spektrofotometru byla stanovena stálost zdroje v čase. Bylo proměřováno, jak se mění intenzita zdroje za určitý časový úsek (Obrázek 4.2.2.1.1). To proto, aby bylo zjištěno, zda se hodnoty BRDF měřených vzorků nebudou díky případné nestálosti zdroje měnit.

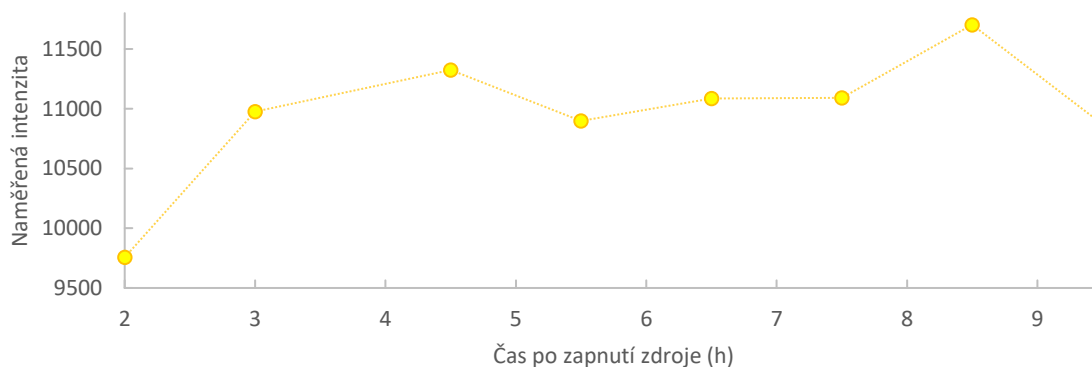
Pro měření stálosti zdroje v čase byla optická část osvětlovací části nastavena napřímo na detektor. Měřením bylo zjištěno, že zdroj světla je velmi nestálý (Obrázek 4.2.2.1.1). Měření probíhalo po dobu dvou hodin. K odečtu hodnot docházelo po pěti minutách. Intenzita zdroje zprvu strmě stoupá a následně začne klesat. Až po hodině měření se intenzita zdroje více méně ustálí. Proto bylo měření testovaných vzorků vždy zahájeno až po dvou hodinách po zapnutí zdroje gonio-spektrofotometru, kdy už intenzita zdroje tolik nekolísala.



*Obrázek 4.2.2.1.1 Závislost intenzity zdroje gonio-spektrofotometru na čase.*

*Je uváděna intenzita pro vlnovou délku 570 nm. Měřeno s integračním časem 100 ms, počtem spekter 1 a s hodnotou 1-low XTiming resolution control*

Následně byla změřena intenzita zdroje v celém dni, aby bylo zjištěno, jak výrazně se intenzita během dne mění. To je zaznamenáno v grafu na obrázku 4.2.2.1.2. Zdroj byl v tomto případě, oproti prvnímu měření stálosti zdroje, měřen odrazem přes křemíkový (Si) wafer (ten byl umístěn na místě vzorku) a s průchodem dopadajícího záření přes neutrální NG filtr. Měření bylo uskutečněno s geometrií  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $\theta_r = -45^\circ$  (viz níže).



*Obrázek 4.2.2.1.2 Závislost intenzity zdroje gonio-spektrofotometru na čase. Měřeno během celého dne. První měření odečteno dvě hodny po zapnutí zdroje. Je uváděna intenzita pro vlnovou délku 570 nm. Měřeno s integračním časem 136 ms, počtem spekter 12 a s hodnotou 3-high XTiming resolution control.*

Po odečtení hodnot bylo zjištěno, že se jednotlivé hodnoty mohou mezi sebou lišit až o cca 1000 jednotek intenzity. Nejnižší a nejvyšší hodnota se dokonce liší přibližně o 1950 jednotek intenzity. Toto měření bylo navíc provedeno pouze v jednom dni a je možné, že v dalších dnech by se intenzita měnila jinak.

Na základě předchozích zjištění bylo stanoveno, že bude měřena intenzita zdroje před měřením každého vzorku a také po ukončení jeho měření. Tím by mělo být zjištěno, s jakou intenzitou zdroje byl vzorek měřen. Zjištěním těchto intenzit by mělo být dosaženo větší přesnosti dalších měření a výpočtů.

Měření zdroje před a po měření každého vzorku bylo prováděno s použitím Si waferu na místě vzorku a NG filtru (typ skla NG4, velikost 50×50, tloušťka 2,0, Shott glas), s geometrií  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $\theta_r = -45^\circ$ . Stejně tak jako byla proměřena intenzita zdroje v celém dni.

Měření takto probíhalo ze dvou důvodů. Prvním důvodem byla jednodušší manipulace se strojem. Pokud by měl být, před a po každém měření vzorku, měřen zdroj v přímém směru, musel by být vždy odebrán otočný držák vzorku. Což by mohlo rozhodit i již nastavenou mechanickou kalibraci stroje. Tuto nutnost eliminovalo použití geometrie měření  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $\theta_r = -45^\circ$  a Si waferu, přes které se světlený svazek odrážel do detektoru.

Druhým důvodem byla nutnost neměnit parametry měření, se kterými byl měřen daný vzorek – Integrační čas, počet spekter a XTiming resolution control. S nezměněnými parametry měření intenzita detekovaného signálu zdroje přesahovala nejvyšší možnou intenzitu, kterou umí detektor zachytit. Proto byl používán filtr, který snížil intenzitu dopadajícího světla a tím i intenzitu detekovaného signálu.

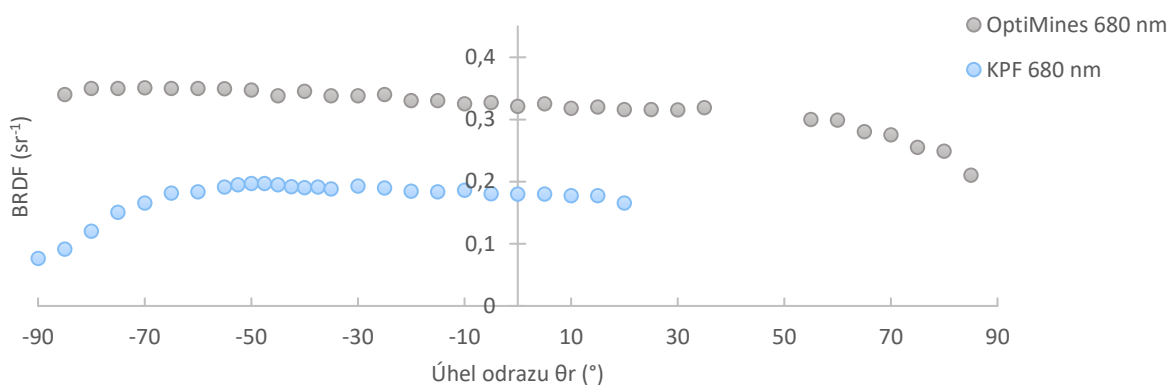
Nevýhodou tohoto postupu je, že kolísající intenzita zdroje a použití Si waferu a NG filtru může přinášet další zdroje chyb.

#### **4.2.2.2 Charakterizace gonio-spektrofotometru**

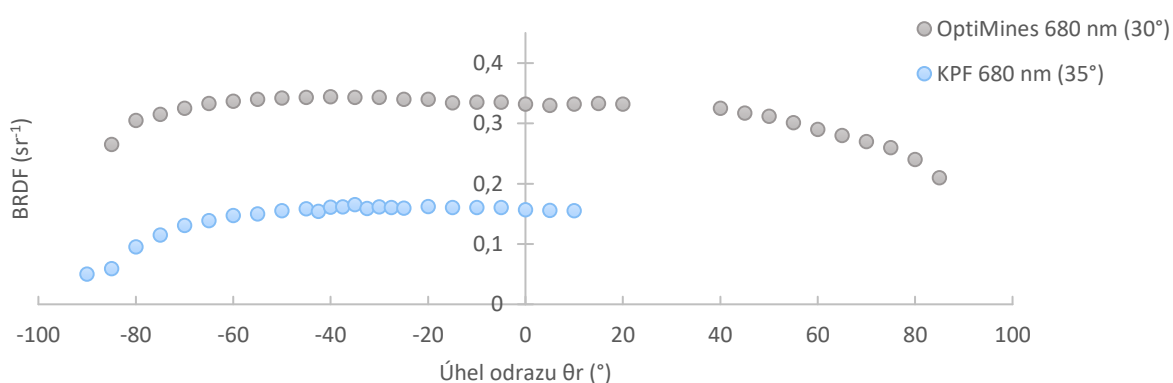
Charakterizací gonio-spektrofotometru je myšleno porovnání známých hodnot BRDF referenčního standardu spektrofotometru (viz kapitola 3.4.2) a naměřených hodnot BRDF daným gonio-spektrofotometrem, při použití Spektralonu jako vzorku. Toto porovnání je uvedeno v grafech na obrázcích 4.2.2.2.1, 4.2.2.2.2.

Pro měření byl použit Spektralon (USRS-99-010, AS-01158-060, SIN, 99AA04 0915, -4222). Spektralon byl vložen do gonio-spektrofotometru a proměřen pod úhly dopadu světla  $\theta_i = 25^\circ$ ,  $\theta_i = 35^\circ$ ,  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $\theta_i = 55^\circ$  a  $\theta_i = 65^\circ$ . Byly použity stejné parametry měření jako parametry, které byly vybrány pro měření matného papírového substrátu – Integrační čas 136 ms, počet spekter 20 a XTiming resolution control 3-high.

Po proměření byl naměřený signál přepočten na hodnoty BRDF, podle postupu uvedeného v kapitole 4.3.1 Stanovení hodnot BRDF.



Obrázek 4.2.2.2.1 Porovnání známých hodnot BRDF Spektralonu z literatury a naměřených hodnot BRDF gonio-spektrofotometrem. Úhel dopadu  $\theta_i = 45^\circ$ , Integrační čas 136 ms, počet spekter 20 a XTiming resolution control 3-high.



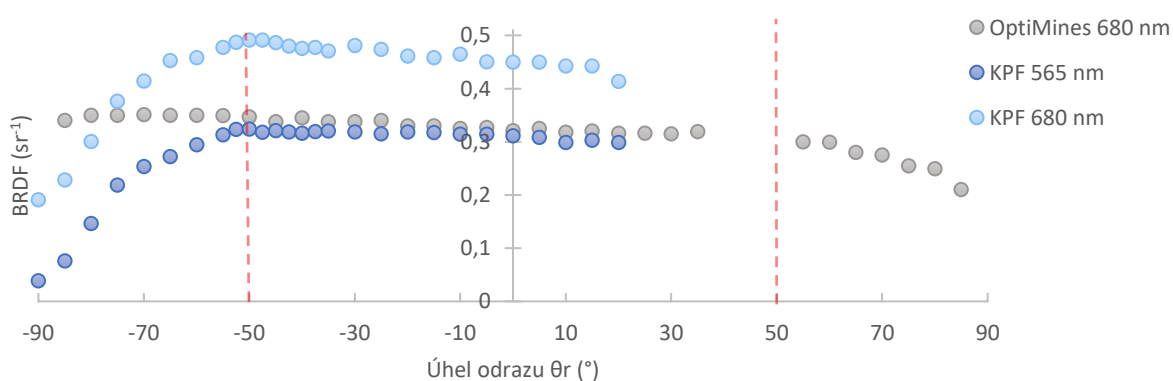
Obrázek 4.2.2.2.2 Porovnání známých hodnot BRDF Spektralonu z literatury a naměřených hodnot BRDF gonio-spektrofotometrem. Úhel dopadu Spektralonu z literatury  $\theta_i = 30^\circ$  vs Spektralonu měřeného  $\theta_i = 35^\circ$ , Integrační čas 136 ms, počet spekter 20 a XTiming resolution control 3-high.

Pro porovnání byla vybrána BRDF data z článku [35], měřená na přístroji OptiMines. Tato data byla vynesena pro vlnovou délku 680 nm.

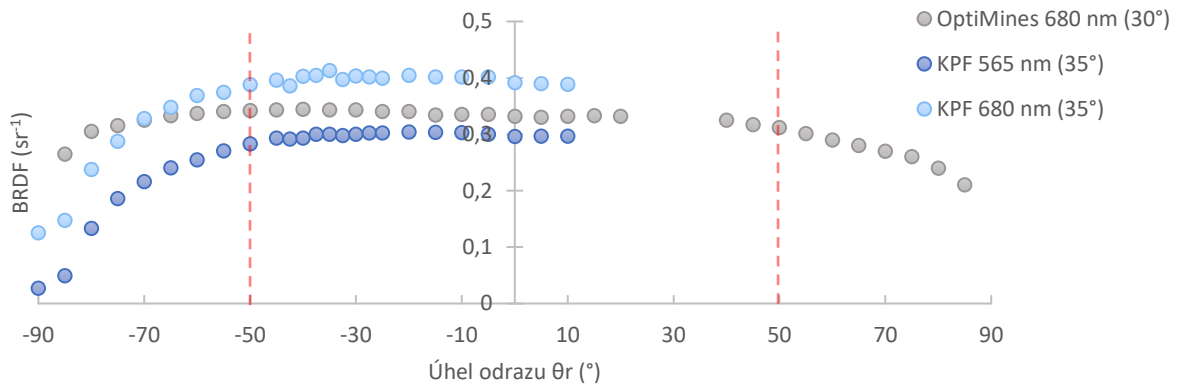
Z uvedených grafů je viditelné, že se data naměřená sestaveným gonio-spektrofotometrem s daty OptiMines neshodují.

Protože je známo, že absolutní BRDF hodnota Spektralonu by měla být  $0,318 \text{ sr}^{-1}$ , data Spektralonu byly na tuto absolutní hodnotu upraveny. Byla nalezena konstanta  $K$  a to tak, aby se absolutní hodnota BRDF Spektralonu pohybovala okolo hodnoty  $0,318 \text{ sr}^{-1}$ . Touto konstantou byla následně vynásobena (upravena) všechna naměřená data. Tím se dosáhlo shody výsledných BRDF dat (jejich absolutních hodnot). Konstanta  $K$  má hodnotu 2,5.

Porovnání BRDF dat Spektralonu, upravených konstantou  $K$ , s daty OptiMines z literatury je uvedeno v grafech na obrázku 4.2.2.2.3, obrázku 4.2.2.2.4. Z daných grafů je jasně vidět, že pro vlnovou délku 680 nm se hodnoty dat BRDF z literatury a dat naměřených gonio-spektrofotometrem (upravených konstantou  $K$ ) neshodují. Avšak pokud jsou porovnávána data OptiMines, s vlnovou délkou 680 nm, s naměřenými daty gonio-spektrofotometrem (upravených konstantou  $K$ ), s vlnovou délkou 565 nm, lze říci, že jsou hodnoty dat velmi podobné. Vlnová délka 565 nm byla vybrána pro porovnání, protože okolo této hodnoty vykazuje světelný zdroj nejvyšší intenzitu.



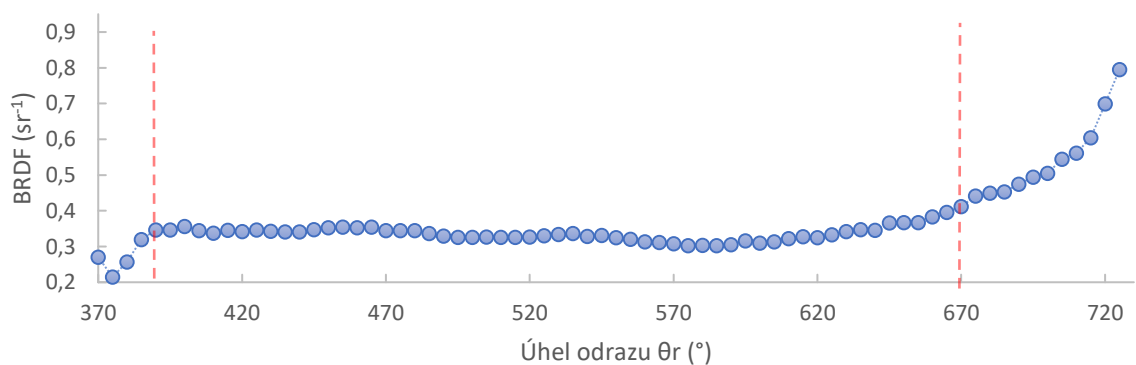
Obrázek 4.2.2.2.3 Porovnání známých hodnot BRDF Spektralonu z literatury a naměřených hodnot BRDF gonio-spektrofotometrem, po úpravě konstantou  $K$ . Úhel dopadu  $\theta_i = 45^\circ$ , Integrační čas 136 ms, počet spekter 20 a XTiming resolution control 3-high.



Obrázek 4.2.2.2.4 Porovnání známých hodnot BRDF Spektralonu z literatury a naměřených hodnot BRDF gonio-spektrofotometrem, po úpravě konstantou  $K$ . Úhel dopadu Spektralonu z literatury  $\theta_i = 30^\circ$  vs Spektralonu měřeného  $\theta_i = 35^\circ$ , Integrační čas 136 ms, počet spekter 20 a XTiming resolution control 3-high.

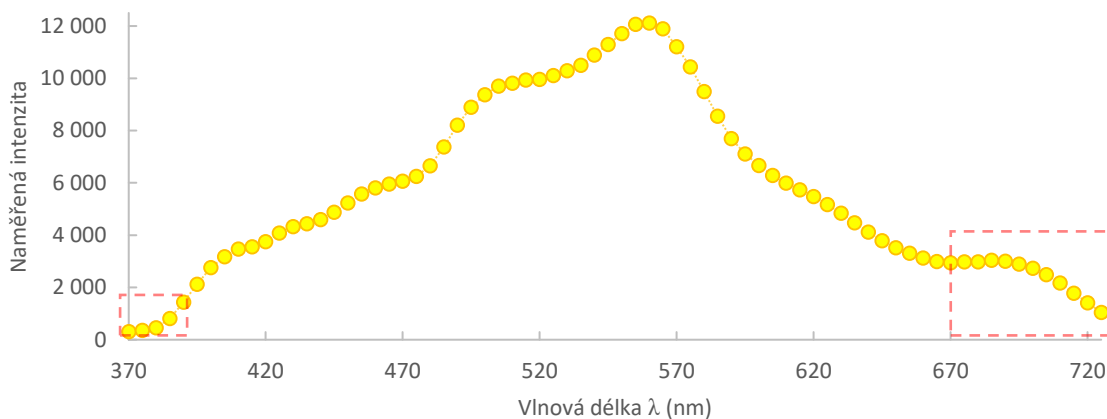
Při zaměření na spektrální průběh křivek daných hodnot BRDF, jsou průběhy v podstatě stejné pro úhly odrazu  $\theta_r$  od  $-50^\circ$  do cca  $50^\circ$ . Za těmito hranicemi se průběhy hodnot začínají odlišovat. A to hlavně v místech spekulárních úhlů odrazu světla.

Neshoda v případě naměřených dat gonio-spektrofotometrem (upravených konstantou  $K$ ), s vlnovou délkou 680 nm, je nejspíše způsobena použitým zdrojem gonio-spektrofotometru (viz níže). V důsledku použití daného zdroje vykazují naměřená data Spektralonu ztrátu Lambertovského charakteru okolo vlnové délky 670 nm. Lambertovský průběh je zachován při měření mezi vlnovými délkami 390 nm a 670 nm (Obrázek 4.2.2.2.5).



Obrázek 4.2.2.2.5 Závislost hodnot BRDF Spektralonu, upravených konstantou  $K$ , na vlnové délce.  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $\theta_r = 0^\circ$ , Integrační čas 136 ms, počet spekter 20 a XTiming resolution control 3-high.

Rozdíly mezi hodnotami BRDF OptiMines a naměřenými BRDF hodnotami jsou pravděpodobně způsobeny nestálostí použitého zdroje v průběhu měření. Též jsou pravděpodobně způsobeny jeho odlišnou charakteristikou (charakteristika zdroje a pravděpodobná místa problému jsou uvedena v grafu na obrázku 4.2.2.2.6), od použitého zdroje v případě naměřených dat OptiMines. Nejedná se totiž o standardizovaný zdroj, jeho charakteristika ho standardizovanému zdroji pouze přibližuje.



*Obrázek 4.2.2.2.6 Závislost intenzity světelného zdroje (měřené pomocí Si waferu a NG filtru) na vlnové délce. V rámečcích jsou vyznačena pravděpodobná místa problému, díky kterým jsou neměřená data pravděpodobně zkreslována.*

Lze tedy říci, že po úpravě konstantou  $K$ , jsou hodnoty BRDF získané použitým gonio-spektrofotometrem ve shodě s daty z literatury. Po úpravě, konstantou  $K$ , se hodnoty BRDF pro Spektralon při nulovém úhlu odrazu správně pohybují okolo hodnoty  $0,318 \text{ sr}^{-1}$ . Musí být, ale také počítáno s tím, že jsou hodnoty ve shodě pouze v určitých mezích. A to mezi vlnovými délkami 390 nm a 670 nm.

Neshoda naměřených BRDF dat gonio-spektrofotometrem, před úpravou konstantou  $K$ , a BRDF dat OptiMines z literatury, může být způsobena různými faktory. Jedním z nich je mechanická kalibrace (každý uživatel může gonio-spektrofotometr nakalibrovat jinak, tudíž mu mohou vycházet i rozdílné hodnoty).

Pro výpočet BRDF bylo využito vztahů z literatury [35], které předpokládají homogenní rozložení světelného toku v osvětlovacím svazku. Vzhledem k tomu, že prostorový úhel detektoru je podstatně menší, než osvětlovací prostorový úhel může nastat chyba při výpočtu intenzity ozáření (viz kapitola 4.3.1).

### 4.3 Měření tištěných vzorků

Vzorky byly měřeny pod různými úhly dopadu světla  $\theta_i = 25^\circ$ ,  $\theta_i = 35^\circ$ ,  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $\theta_i = 55^\circ$  a  $\theta_i = 65^\circ$ . U nich byly vždy změřeny všechny úhly odrazu, které umožňovalo rozpětí otočného stolu gonio-spektrofotometru (tabulka 4.3.1). Úhly odrazu byly měřeny po  $5^\circ$ , okolo spekulárního úhlu odrazu po  $2,5^\circ$ .

Tabulka 4.3.1 Rozpětí měřených úhlů odrazu pro dané úhly dopadu

$\theta_i$ (°)	Rozpětí $\theta_r$ (°)
25	- 90-0
35	- 90-10
45	- 90-20
55	- 90-30
65	- 90-40

Pro měření vzorků byly stanoveny parametry při kalibraci v programu SpetraWiz Schortcut. Parametry byly stanoveny pro každý potiskovaný substrát, a na něm natištěné barevné vzorky, zvlášť. Parametry pro jednotlivé substráty jsou uvedeny v tabulce 4.3.2.

Tabulka 4.3.2 Parametry měření pro jednotlivé potiskované substráty

Substrát	Integrační čas (ms)	Počet spekter	XTiming resolution control
Matný	136	20	3-high
Lesklý	136	12	3-high
Metalický	136	6	3-high

#### 4.3.1 Stanovení hodnot BRDF

Naměřené hodnoty intenzit detekovaného signálu, jsou přepočteny na hodnoty BRDF. Data byla zpracovávána v programu Microsoft Excel. Pro výpočet byly využívány především poznatky od N. Matsapey a kol. [35].

#### *Kompenzace nestálosti intenzity zdroje osvětlení*

Při výpočtu BRDF musela být nejprve provedena kompenzace nestálosti zdroje osvětlení. Provedením této kompenzace, by mělo být dosaženo vyrovnání podmínek pro jednotlivé naměřené hodnoty. Zároveň byla stanovena intenzita přímého svazku světla  $F_{direct}$ . Ta by byla naměřena detektorem v přímém směru. Tedy pokud by zdroj nebyl měřen přes Si wafer, filtr a s geometrií měření  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $\theta_r = -45^\circ$  (viz kapitola 4.2.2.1 Stálost zdroje).



Intenzita zdroje byla změřena vždy před a po měření každého vzorku. Byla předpokládána lineární změna intenzity s časem. Každému úhlu dopadu byla přiřazena intenzita;

$$F_{direct\ 25} = \frac{F_K}{T_{filtr} \cdot R_{křemík}} \quad (24)$$

$$F_{direct\ 35} = \frac{F_Z + 3(F_K - F_Z)/4}{T_{filtr} \cdot R_{křemík}} \quad (25)$$

$$F_{direct\ 45} = \frac{F_Z + 2(F_K - F_Z)/4}{T_{filtr} \cdot R_{křemík}} \quad (26)$$

$$F_{direct\ 55} = \frac{F_Z + (F_K - F_Z)/4}{T_{filtr} \cdot R_{křemík}} \quad (27)$$

$$F_{direct\ 65} = \frac{F_Z}{T_{filtr} \cdot R_{křemík}} \quad (28)$$

$F_{direct\ 25}$  je intenzita přímého svazku světla pro  $\theta_i = 25^\circ$ ,  $F_{direct\ 35}$  je intenzita přímého svazku světla pro  $\theta_i = 35^\circ$ ,  $F_{direct\ 45}$  je intenzita přímého svazku světla pro  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $F_{direct\ 55}$  je intenzita přímého svazku světla pro  $\theta_i = 55^\circ$ ,  $F_{direct\ 65}$  je intenzita přímého svazku světla pro  $\theta_i = 65^\circ$ ,  $F_K$  je naměřená intenzita zdroje na konci měření vzorku,  $F_Z$  je naměřená intenzita zdroje na začátku měření,  $T_{filtr}$  je transmitance použitého filtru a  $R_{křemík}$  je reflektance použitého křemíkového waferu.

### **Výpočet intenzity ozáření $E_i$**

Intenzita ozáření byla vypočtena též pro každý úhel dopadu zvlášť. Pro daný úhel dopadu byla vždy použita intenzita přímého svazku světla  $F_{direct\ x}$  příslušná pro daný úhel dopadu  $F_{direct\ x}$ .

$$\mathcal{E}_{iX}(\lambda, \theta_i, \varphi_i) = \frac{F_{direct\ x}}{S_0} \cdot \frac{\Omega_s}{\Omega_d} \cdot \cos(\theta_i) \quad (29) [35]$$

$\mathcal{E}_{iX}$  je intenzita ozáření příslušná pro daný úhel dopadu  $\theta_i$ ,  $S_0$  je plocha štěrbiny před detektorem,  $\cos(\theta_i)$  je cosinus úhlu dopadu,  $\Omega_s$  prostorový úhel osvětlení a  $\Omega_d$  prostorový úhel detektoru,

$$\Omega_s = \frac{(\pi \cdot \Phi_{ST}^2)/4}{R_{VZ}^2} \quad (30)$$

$$\Omega_d = \frac{(\pi \cdot \Phi_s^2)/4}{R_{VD}^2} \quad (31)$$

$\Phi_{ST}$  je průměr světelného svazku,  $R_{VZ}$  je vzdálenost mezi zdrojem a detektorem,  $\Phi_s$  je průměr štěrbinu a  $R_{VD}$  je vzdálenost mezi vzorkem a detektorem.

Vztah (29) předpokládá homogenní rozložení intenzity osvětlení a tedy to, že intenzita osvětlení je  $\Omega_s/\Omega_d$  krát větší než intenzita měřená detektorem. Pokud není rozložení intenzity světla v dopadajícím a od Si waferu odraženém svazku homogenní může být vztah (29) příčinou nutnosti použití konstanty  $K$  (viz kapitola 4.2.2.2.)

#### ***Výpočet odraženého záření $L_r$***

Odražené záření  $L_r$  je vypočteno jako podíl naměřené intenzity světla odtažného od vzorku  $F_r$  a plochy štěrbinu před detektorem  $S_0$  vynásobené prostorovým úhlem detektoru  $\Omega_d$ :

$$L_r(\lambda, \theta_r, \varphi_r) = \frac{F_r(\lambda, \theta_r, \varphi_r)}{S_0 \cdot \Omega_d} \quad (32) [35]$$

#### ***Výpočet hodnot BRDF***

Hodnoty BRDF  $f_r$  byly následně vypočteny podílem odraženého záření  $L_r$  a intenzity ozáření  $\mathcal{E}_i$ . Odražené záření  $L_r$  pro daný úhel dopadu  $\theta_i$  byl vždy podělen příslušnou intenzitou ozáření  $\mathcal{E}_{iX}$ , pro tentýž úhel dopadu  $\theta_i$ .

$$f_r(\lambda, \theta_i, \varphi_i) = \frac{L_r(\lambda, \theta_r, \varphi_r)}{\mathcal{E}_{iX}(\lambda, \theta_i, \varphi_i)} [sr^{-1}] \quad (33)$$

Vypočtené BRDF  $f_r$  byly následně vynásobeny konstantou  $K = 2,5$ , pomocí níž byly získané správné absolutní BRDF  $f_r$  hodnoty.

### 4.3.2 Hodnoty CIE $L^*a^*b^*$ a jejich stanovení

Barvový prostor CIE  $L^*a^*b^*$  je jedním ze standardů, využívaných k popisu barev. Jeho podstatou je, stejně jako všech barvových prostorů, možnost matematicky definovat reprodukci barev reálného světla.

Barvový prostor  $L^*a^*b^*$ , byl vytvořen v roce 1976, komisí CIE, Commission Internationale de l'Éclairage, která byla založena v roce 1931. Barvové prostory CIE jsou tzv. barvové prostory nezávislé na zařízení. To znamená, že označení jednotlivých barevných odstínů nezávisí na subjektivních vlastnostech pozorovatele, proto byl vytvořen tzv. standardní pozorovatel [48].

Složky  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  barvového prostoru CIE  $L^*a^*b^*$ , jsou definovány pomocí trichromatických hodnot  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  [48]. Složky  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  se získají vynásobením standardizovaného spektra osvětlení  $M_e(\lambda)$ , reflexního faktoru  $\hat{R}(\lambda)$  a odpovídající trichromatické funkce  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  [48];

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} M_e(\lambda) \hat{R}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} M_e(\lambda) \hat{R}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} M_e(\lambda) \hat{R}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (34)$$

kde  $k$  je faktor, který normalizuje trichromatickou hodnotu  $Y$ , tak aby byla rovna 100;

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} M_e(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (35)$$

pro dokonale bílý difuzní vzorek, jehož reflexní faktor je  $\hat{R}(\lambda) = 1$ .

Reflexní faktor  $\hat{R}$  je definován jako poměr světelného toku odraženého od objektu  $\Phi$  ke světlenému toku odraženému od bílého difuzního vzorku  $\Phi_{ref}$ .

Z těchto hodnot jsou tedy vypočteny složky  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ;

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \quad \text{pro } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856 \\ L^* &= 903,3 \left( \frac{Y}{Y_0} \right) \quad \text{pro } \frac{Y}{Y_0} \leq 0,008856 \end{aligned} \quad (36)$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right] \quad (37)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right] \quad (38)$$

Jestliže platí, pro jeden z poměrů  $X/X_0$ ,  $Y/Y_0$ ,  $Z/Z_0$  obecně  $A < 0,008856$ , ve vztazích (37) a (38), pak je  $A^{1/3}$  nahrazeno výrazem  $7,787 \cdot A + 16/116$ .

$X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  jsou trichromatické hodnoty dokonale bílého difuzního vzorku, jehož reflexní faktor je  $\hat{R}(\lambda) = 1$ .

Tištěné barevné vzorky byly proměřeny spektrofotometrem SpectroEye X-Rite s geometrií osvětlení 45/0.

#### ***Převod BRDF hodnot na hodnoty CIE $L^*a^*b^*$***

Hodnoty BRDF stanovené postupem z kapitoly 4.2.1 jsou v této práci dále převedeny na hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , které dávají informaci o barvě vzorků.

Hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  mohou být z hodnot BRDF vypočteny dvěma způsoby. Prvním způsobem je vypočtení reflexního faktoru  $\hat{R}$  [9, 49]:

$$\hat{R} = \frac{BRDF_{vzorek}}{BRDF_w} \quad (39)$$

Jak je zmíněno výše, reflexní faktor  $\hat{R}$  je definován jako poměr světelného toku  $\Phi$  odraženého od vzorku k světlenému toku  $\Phi_{ref}$  odraženému od bílého difuzního vzorku. V případě této práce je tedy reflexní faktor  $\hat{R}$  poměrem hodnot měřeného vzorku  $BRDF_{vzorek}$  ku hodnotám Spektralonu  $BRDF_w$ .

Vypočtený reflexní faktor  $\hat{R}$  se následně dosadí do rovnic (34) pro výpočet trichromatických hodnot  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Dále jsou hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  vypočteny běžným postupem pro výpočet hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , viz vztahy (36), (37) a (38).

Druhým způsobem výpočtu hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  je výpočet trichromatických hodnot  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  vzorku a trichromatických hodnot  $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $Z_w$  Spektralonu pro zvolenou geometrii přímo z BRDF. Vypočtené trichromatické hodnoty vzorku  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  a Spektralonu  $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $Z_w$  se dosadí do rovnic pro výpočet hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , viz vztahy (36), (37) a (38). Trichromatické hodnoty Spektralonu  $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $Z_w$  se dosadí na místo hodnot  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ . Tedy na místo trichromatických hodnot dokonale bílého difuzního vzorku.

Pro výpočet kolorimetrických parametrů by měl být brán v úvahu bílý difuzní standard. Tím je v případě této práce referenční standard Spektralon. Použitím tohoto standardu, ale dojde ke zkreslení hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  pro lesklé vzorky, pro zvolené úhly dopadu a odrazu.

Obecně nám BRDF říká o složce difuzní (informace o barvě) a přímém odrazu, které se vzájemně kombinují. Pomocí různých modelů [6, 27] se pak naměřená data prokládají modely BRDF. K vykreslení daného vzhledu (renderování), je využito znalosti těchto modelů, nebo znalosti naměřených dat. Reprodukce tohoto vzhledu je pak vytvářena na základě modelování daných druhů materiálů.

Převod BRDF na informaci o barvě ve zvoleném směru, není jednoznačný a jednoduchý. Proto budou v této práci převáděna pouze data naměřená s geometrií měření  $\theta_i = 45^\circ$  a  $\theta_r = 0^\circ$ .

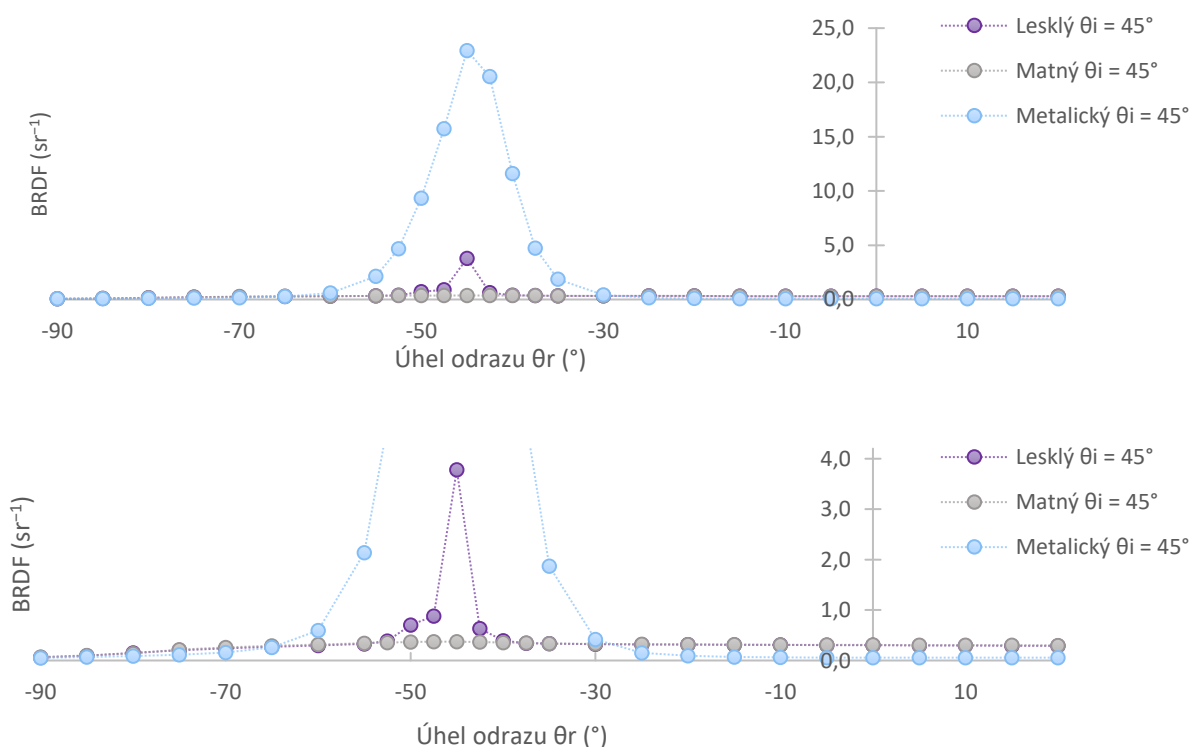
Hodnoty BRDF by bylo možné převést na hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , ve všech směrech úhlů dopadu a odrazu, pokud by bylo možné z naměřených hodnot BRDF pro daný vzorek získat informace o poměru difuze, lesku, drsnosti (což je pomocí některých modelů možné). Bylo by možné tyto konstanty dosadit na výpočet BRDF virtuální bílé, která by měla stejné vlastnosti jako měřený vzorek jen s tím, že by neabsorbovala záření v žádné části viditelného spektra záření. Také pokud by bylo možné dosadit BRDF tohoto bílého virtuálního vzorku za referenční bílou BRDF<sub>w</sub>, pro vyjádření barevnosti ve zvoleném směru.

## 5. Výsledky

V této kapitole jsou uvedeny výsledky gonio-spektrofotometrického měření tištěných vzorků. Jsou zde uvedeny závislosti naměřených a vypočtených hodnot BRDF a výsledné hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , které byly vypočteny za použití daných hodnot BRDF. Výsledky jsou uváděny pouze pro hodnoty BRDF mezi vlnovými délkami 390 nm a 670 nm, z důvodů, které jsou uvedeny v kapitole 4.2.2.2 Charakterizace gonio-spektrofotometru.

### 5.1 Hodnoty BRDF potiskovaných substrátů

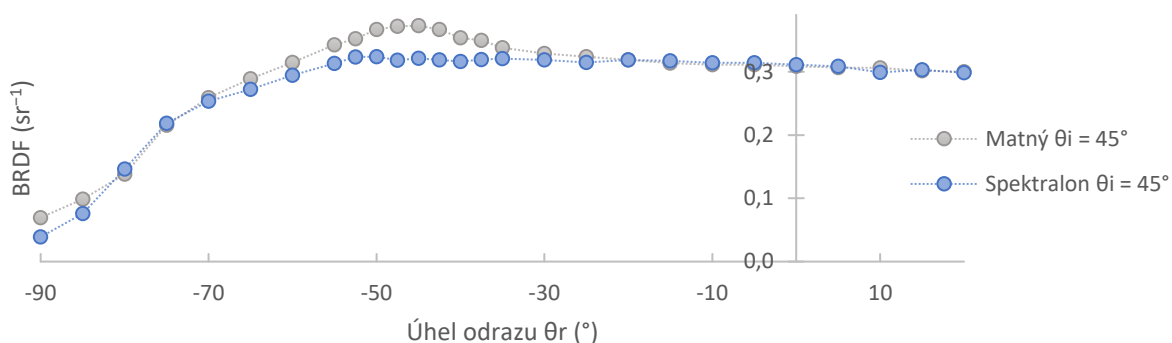
Výsledek porovnání BRDF hodnot jednotlivých substrátů (Obrázek 5.1.1) je podle očekávání. Matný papír má BRDF hodnoty nejnižší, odráží velmi málo světla, jeho BRDF hodnoty jsou velmi podobné BRDF hodnotám bílého standardu Spektralonu (Obrázek 5.1.2). Odlišují se v hodnotách okolo spekulárního úhlu odrazu. Výrazně nejvyšší hodnoty BRDF má papír metalický a v nižším středu se nachází papír lesklý.



Obrázek 5.1.1 Porovnání hodnot BRDF a odrazivosti jednotlivých potiskovaných substrátů.

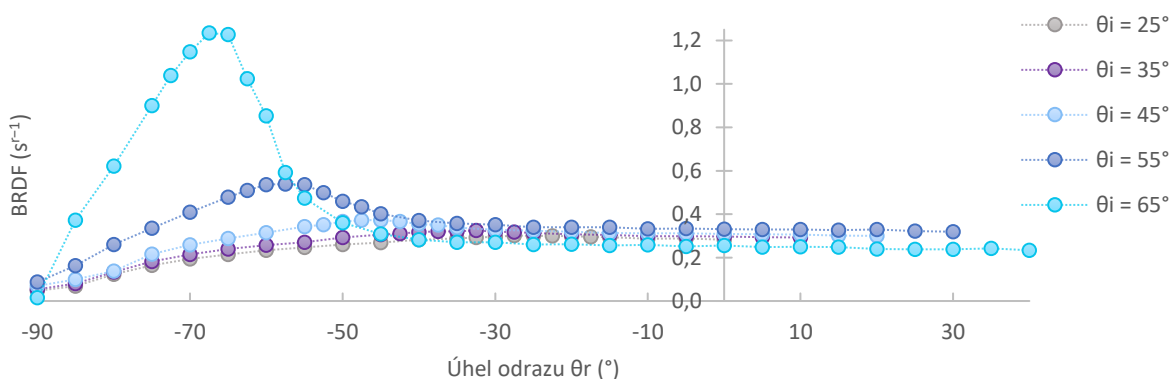
Závislost BRDF hodnot na úhlu odrazu, při úhlu dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a vlnové délce 565 nm.

Reálné porovnání všech třech substrátů (nahore) a přiblížení na spodní oblast grafu se zaměřením na lesklý a matný substrát (dole).



Obrázek 5.1.2 Porovnání hodnot BRDF Spektralonu a matného papíru. Závislost BRDF hodnot na úhlu odrazu při úhlu dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a vlnové délce 565 nm.

Všechny substráty se chovají podle předpokladů, i co se týče průběhu jejich změn s detekovaným úhlem odrazu. U matného papíru se, ve většině případů, nenachází žádné výrazné píky (Obrázek 5.1.3). Matný papír se svým chováním přibližuje k chování modelu podle Lambertova zákona.

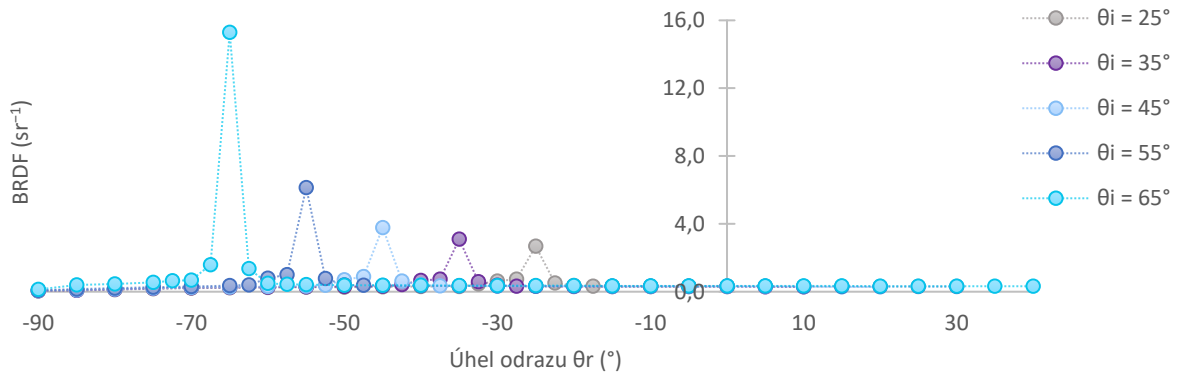


Obrázek 5.1.3 Matný papír – závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 565 nm.

Neočekávané píky, které jsou u matného papíru, se nachází ve spekulárních úhlech odrazu a jsou nejspíše způsobené postavením detektoru. Ten je při větších úhlech dopadu světla v pozici více napřímo k osvětlovací části. Může tedy docházet i k zachycení části přímého paprsku světla. Tento důvod je též vysvětlením i pro další dva substráty, kdy stejně jako u matného papíru, narůstají hodnoty BRDF ve spekulárních úhlech odrazu, se zvyšujícím se úhlem dopadu (viz Obrázek 5.1.4 a Obrázek 5.1.5).

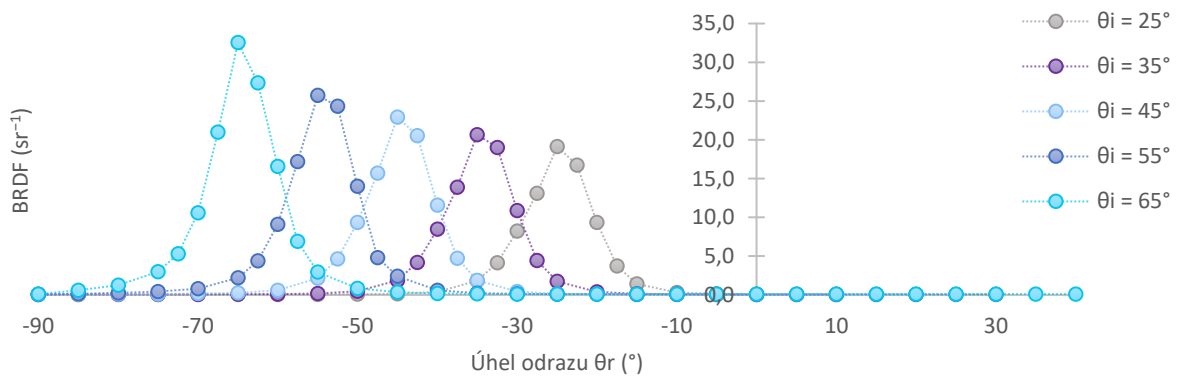
Postavení detektoru vůči osvětlovací části při různých úhlech odrazu je znázorněno na obrázku 5.1.6.

U lesklých papírů dochází podle očekávání k rychlému nárůstu BRDF hodnot ve spekulárním úhlu (Obrázek 5.1.4). Mimo spekulární úhel jsou hodnoty BRDF nízké a skoro neměnné. Lesklý papír se přibližuje k materiálům chovajících se podle modelu ideálního zrcadlového odrazu.



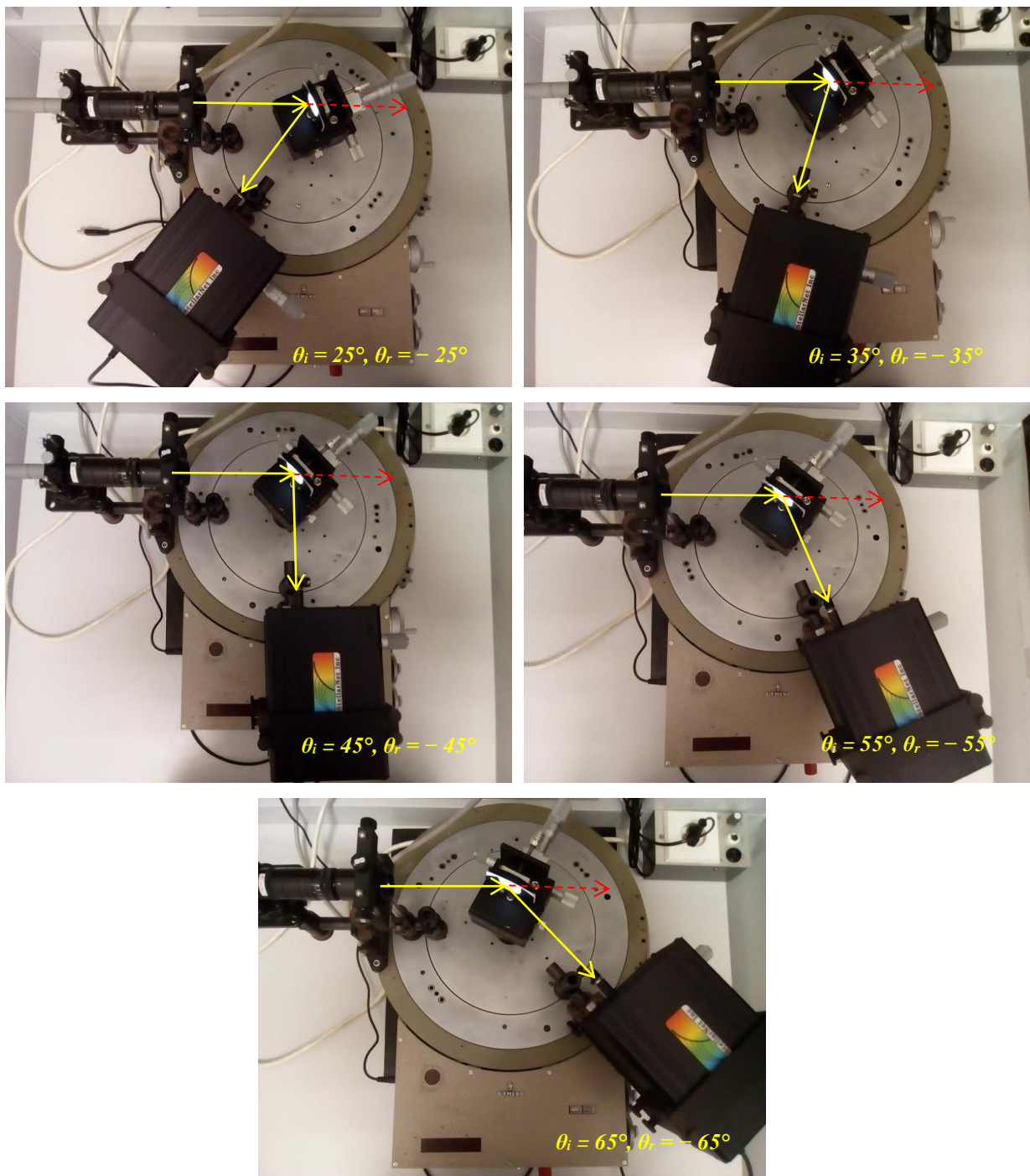
Obrázek 5.1.4 Lesklý papír – závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 565 nm.

U metalického papíru dochází k nejvyššímu nárůstu BRDF hodnot ze všech potiskovaných substrátů. Má též píky ve spekulárních úhlech, jako papír lesklý, ale jeho hodnoty jsou mnohem vyšší a nárůst hodnot je postupný (Obrázek 5.1.5). Netvoří ostrý pík jako papír lesklý.



Obrázek 5.1.5 Metalický papír – závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 565 nm.





Obrázek 5.1.6 Postavení detektoru, při spekulárních úhlech odrazu, vůči osvětlovací části, při různých úhlech dopadu.

## 5.2 Hodnoty BRDF barevných tištěných vzorků

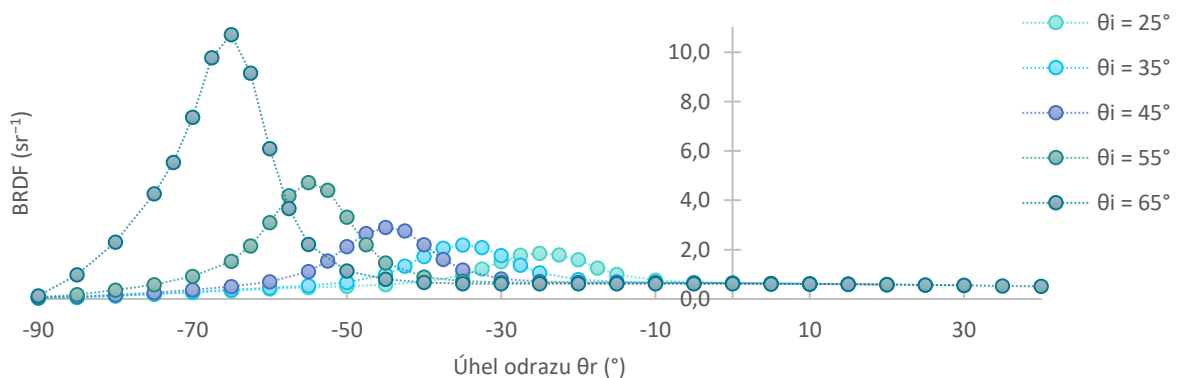
V této části jsou uvedeny výsledky hodnot BRDF pro barevné vzorky. Jsou zde prezentovány výsledné grafy pouze pro jednu barvu a tou je barva Proces Blue. Průběhy výsledných hodnot BRDF (grafy) ostatních šesti barev jsou prezentovány v přílohách.

Vlnové délky, při kterých jsou vynášeny závislosti BRDF na úhlech odrazu, jsou vlnové délky, při nichž jsou hodnoty BRDF (respektive naměřené intenzity) daných barev nejvyšší.

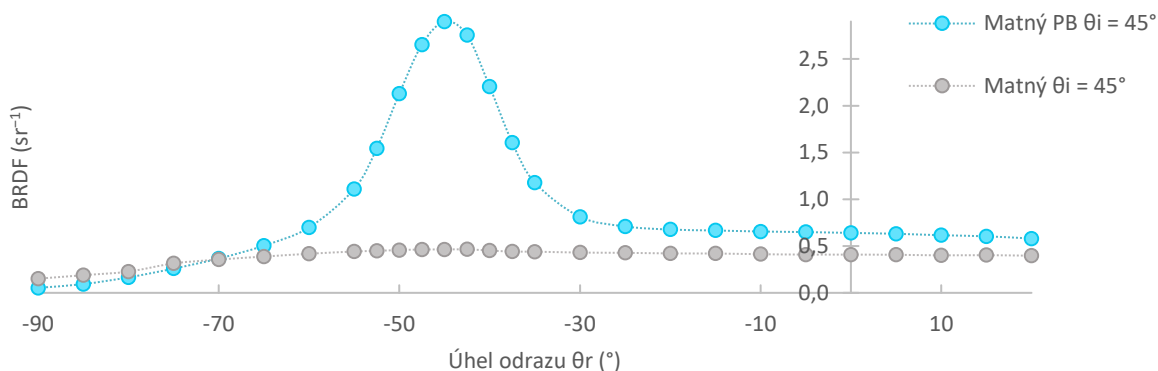
Stejně jako u potiskovaných substrátů narůstají hodnoty BRDF ve spekulárních úhlech odrazu, se zvyšujícím se úhlem dopadu (Obrázek 5.2.1., Obrázek 5.2.6 a Obrázek 5.2.11). Je tomu tak, ze stejného důvodu, který byl popsán výše v kapitole 5.1 Hodnoty BRDF potiskovaných substrátů.

### *Matné vzorky*

U matných barevných vzorků vznikají, v porovnání s matným nepotštěným papírem, vysoké píky BRDF hodnot ve spekulárních úhlech odrazu (Obrázek 5.2.2). To je způsobeno tím, že tisková barva zalije póry matného papíru a tím papír v podstatě vyhladí. Díky tomu se zvýší lesk a měřené hodnoty BRDF na matném papíře narostou. Píky narůstají postupně, nedochází k ostrému nárůstu píků.

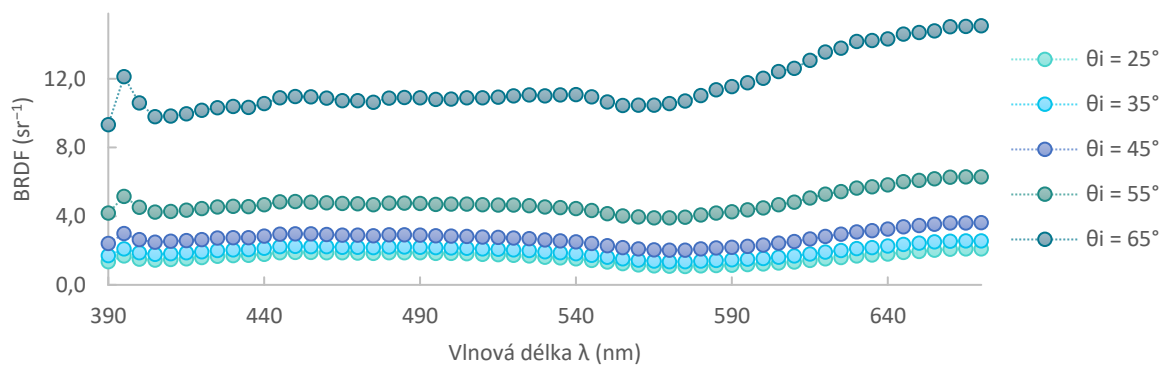


Obrázek 5.2.1 Matný papír, barva Proces Blue – závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 470 nm.

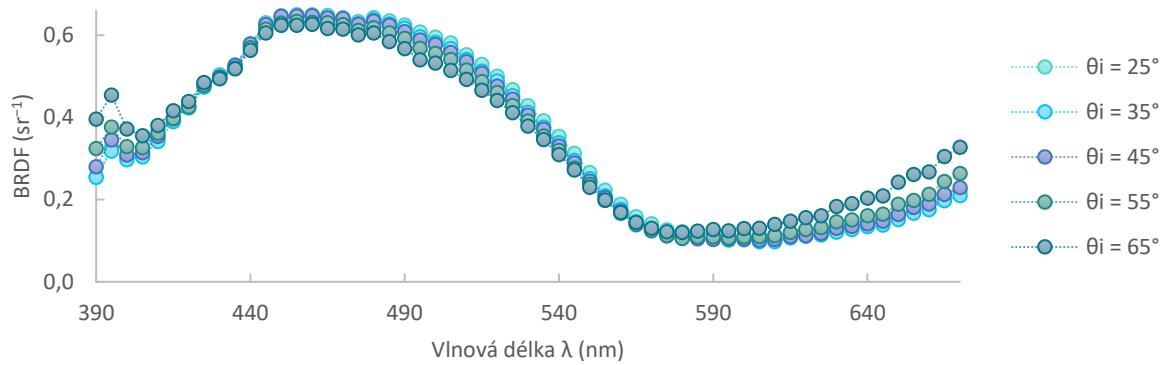


Obrázek 5.2.2 Porovnání matného nepotíštěného papíru s matným potíštěným papírem barvou Proces Blue. Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, při úhlu dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a vlnové délce 470 nm

Co se týče závislosti hodnot BRDF matných papírů na vlnové délce, ta se změnou úhlu dopadu nemění (Obrázek 5.2.3 a Obrázek 5.2.4). Mění se však se změnou úhlu odrazu. Při spekulárních úhlech odrazu barva svou barevnost v podstatě ztrácí (Obrázek 5.2.3) – spektrální závislost BRDF nemá výrazné píky, naopak mimo spekulární úhel má BRDF takový spektrální průběh, jaký je očekáván (Obrázek 5.2.4) pro modrou barvu – vyšší hodnoty BRDF v modré oblasti spektra. Ztráta barevnosti je způsobená tím, že lesklá složka začíná převažovat nad složkou barevnou.

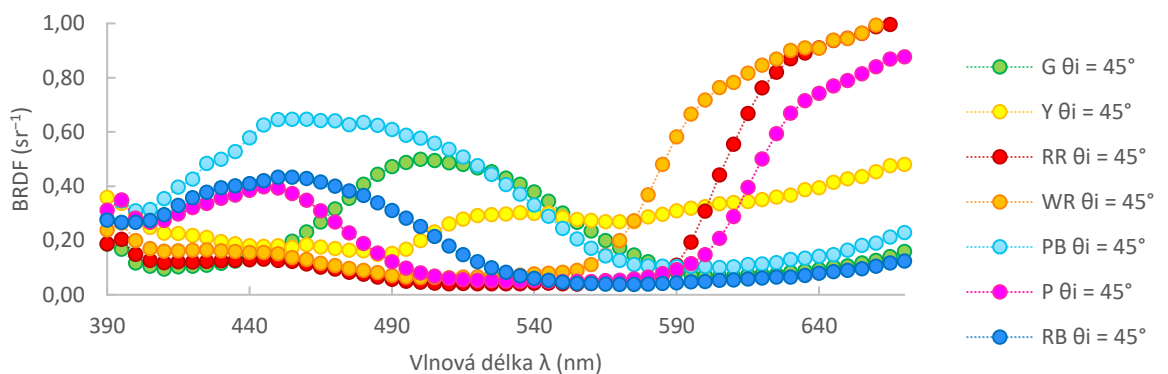


Obrázek 5.2.3 Matný papír, barva Proces Blue – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu (tzn. pro  $\theta_i = 25^\circ$  je  $\theta_r = -25^\circ$ , pro  $\theta_i = 35^\circ$  je  $\theta_r = -35^\circ$ , pro  $\theta_i = 45^\circ$  je  $\theta_r = -45^\circ$ , pro  $\theta_i = 55^\circ$  je  $\theta_r = -55^\circ$ , pro  $\theta_i = 65^\circ$  je  $\theta_r = -65^\circ$ ).



Obrázek 5.2.4 Matný papír, barva Procés Blue – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .

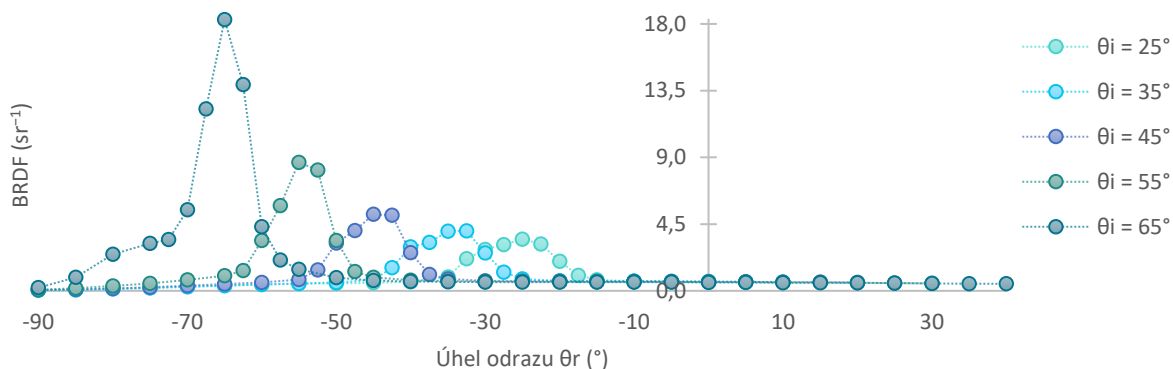
U všech matných barevných vzorků jsou závislosti hodnot BRDF na vlnové délce podle očekávání (mimo spekulární úhly odrazu). Průběhy jejich křivek odpovídají barvě, kterou má daný měřený barevný vzorek (Obrázek 5.2.5).



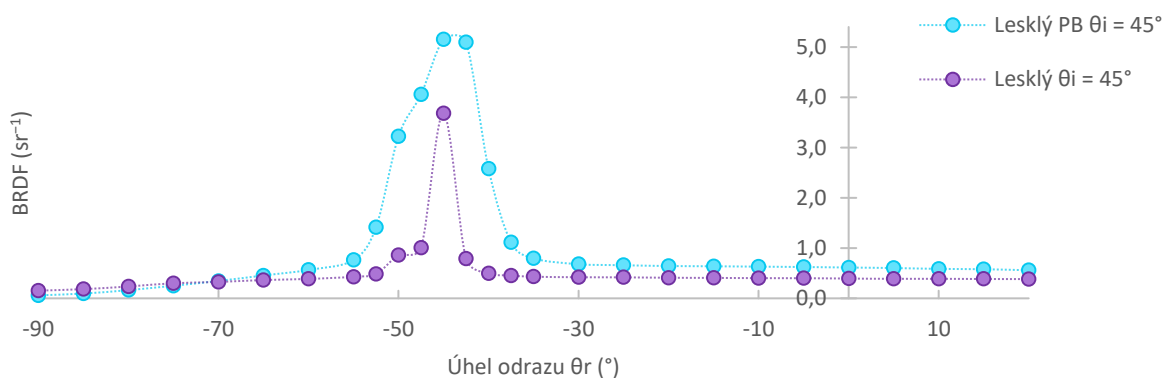
Obrázek 5.2.5 Matný papír, všechny barevné vzorky – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro úhel dopadu  $\theta_i = 45^\circ$ , při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .

### Lesklé vzorky

U lesklých barevných vzorků dochází ke změně tvaru píku se spekulárních úhlech odrazu. Tvar píku již není tak ostrý. Píky jsou mírně zakulacené a narůstají postupně (Obrázek 5.2.6). Při porovnání lesklých barevných vzorků s lesklým nepotíštěným papírem, dochází k mírným nárůstům BRDF hodnot ve spekulárních úhlech odrazu (Obrázek 5.2.7). Tisková barva jen mírně zvýší lesk papírů, spíše lesklost papíru jen podpoří.

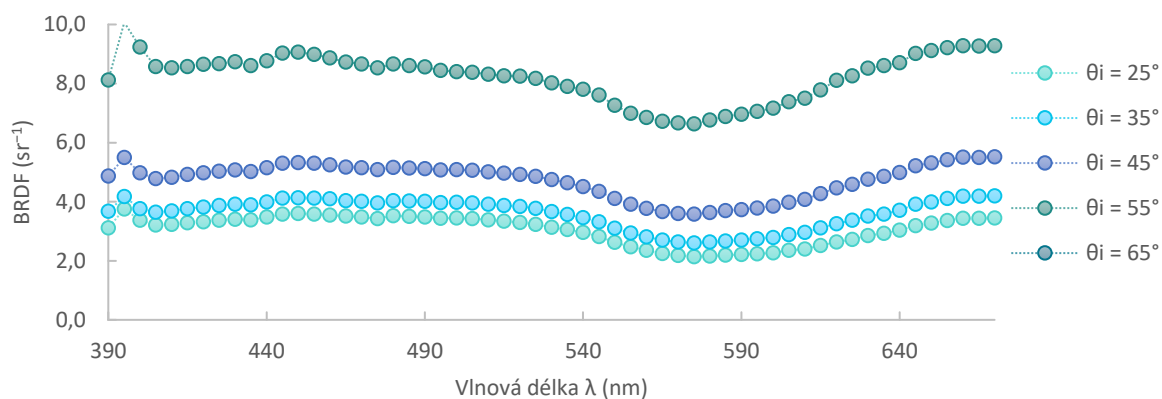


Obrázek 5.2.6 Lesklý papír, barva Procyan Blue – závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 470 nm.

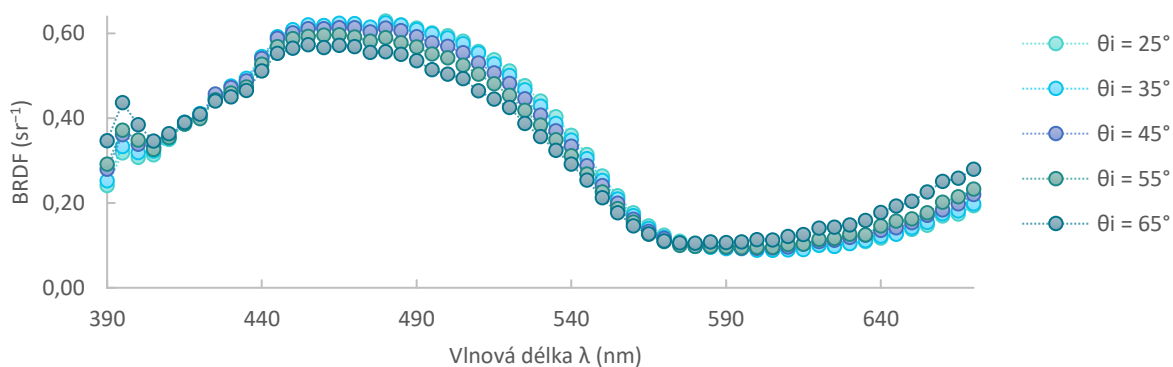


Obrázek 5.2.7 Porovnání lesklého nepotištěného papíru s lesklým potištěným papírem barvou Procyan Blue. Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, při úhlu dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a vlnové délce 470 nm.

Stejně jako u závislosti hodnot BRDF matných papírů na vlnové délce, se i závislost BRDF hodnot lesklých vzorků se změnou úhlu dopadu nemění (Obrázek 5.2.8 a Obrázek 5.2.9). A stejně tak se mění se změnou úhlu odrazu. Průběh je stejný jako u matných vzorků. Při spekulárních úhlech odrazu barva svou barevnost v podstatě ztrácí (Obrázek 5.2.8) a mimo spekulární úhel má, stejně jako u matných vzorků, má BRDF takový spektrální průběh, jaký je vzhledem k použité barvě očekávan (Obrázek 5.2.9). Ztráta barevnosti, ve spekulárních úhlech odrazu, je způsobená tím, že lesklá složka převažuje nad složkou barevnou.

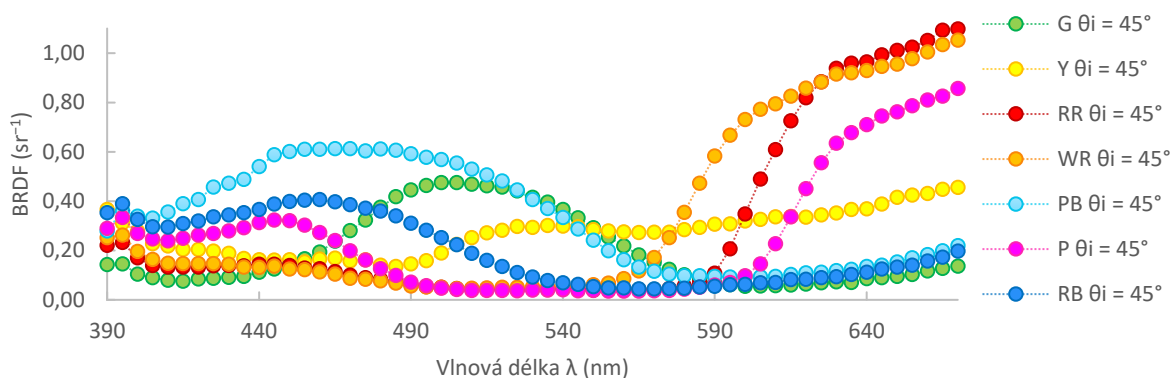


Obrázek 5.2.8 Lesklý papír, barva Proces Blue – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu (tzn. pro  $\theta_i = 25^\circ$  je  $\theta_r = -25^\circ$ , pro  $\theta_i = 35^\circ$  je  $\theta_r = -35^\circ$ , pro  $\theta_i = 45^\circ$  je  $\theta_r = -45^\circ$ , pro  $\theta_i = 55^\circ$  je  $\theta_r = -55^\circ$ , pro  $\theta_i = 65^\circ$  je  $\theta_r = -65^\circ$ ).



Obrázek 5.2.9 Lesklý papír, barva Proces Blue – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .

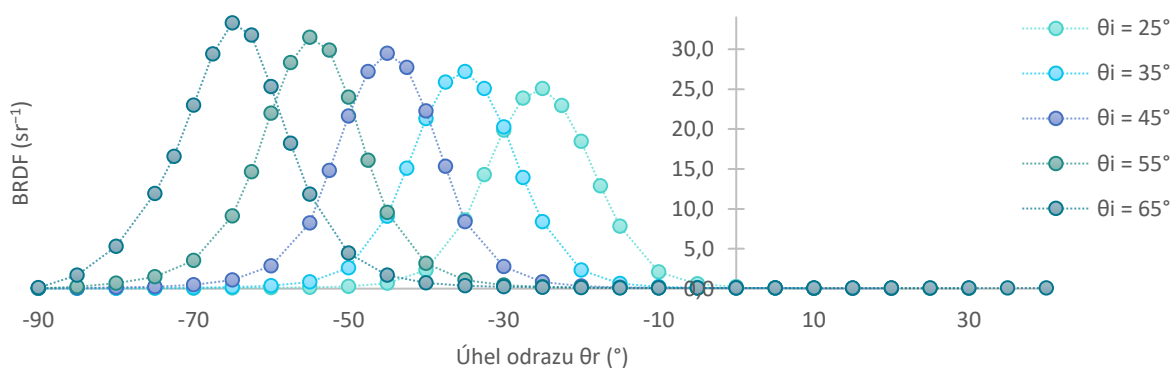
U všech lesklých barevných vzorků jsou závislosti hodnot BRDF na vlnové délce podle očekávání (mimo spekulární úhly odrazu), stejně jako matných papírů. Spektrální průběhy BRDF odpovídají použité barvě na daných barevných vozcích (Obrázek 5.2.10).



Obrázek 5.2.10 Lesklý papír, všechny barevné vzorky – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro úhel dopadu  $\theta_i = 45^\circ$ , při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .

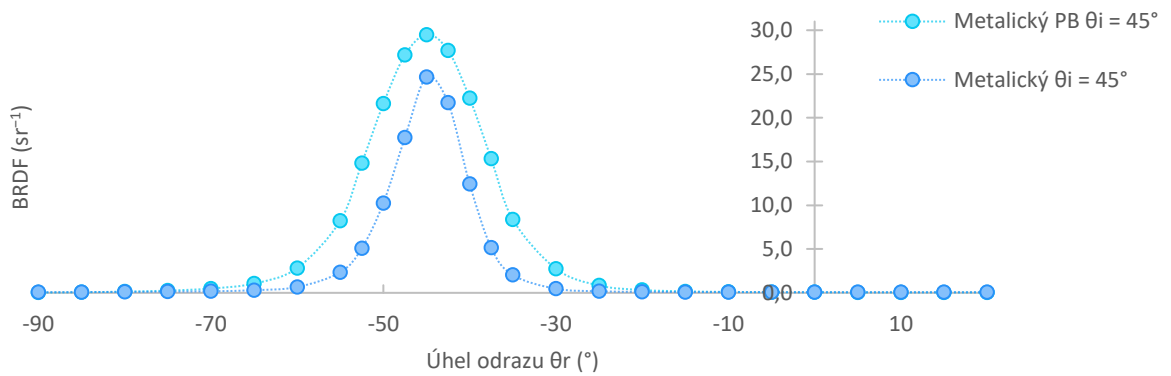
### Metallické vzorky

U metalických barevných vzorků, jako u jediných nedochází, ke změně tvaru píků ve spekulárních úhlech odrazu. Píky mají stále stejný tvar, jsou zakulacené a narůstají postupně (Obrázek 5.2.11). Při porovnání metalických barevných vzorků s metalickým nepotíštěným papírem, dochází k mírným nárůstům BRDF hodnot ve spekulárních úhlech odrazu (Obrázek 5.2.12). Stejně jako u lesklých vzorků porovnávaných s leklým nepotíštěným papírem.



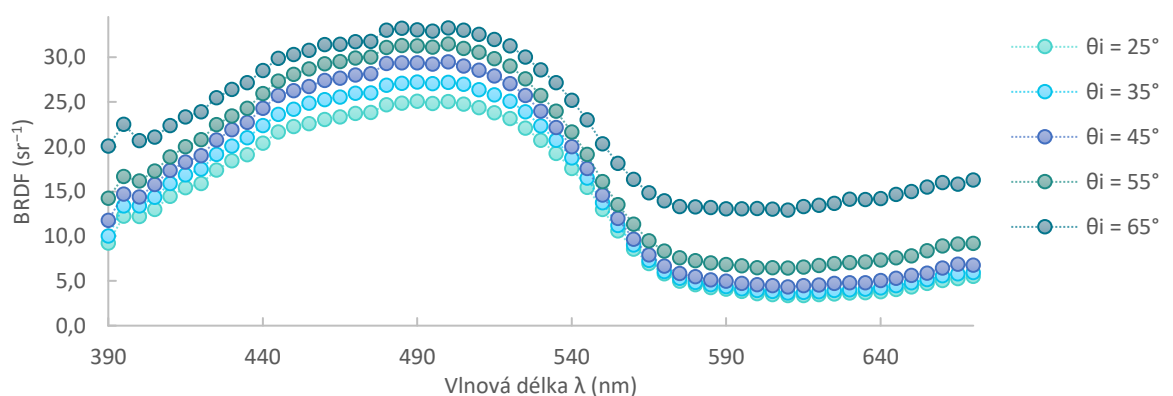
Obrázek 5.2.11 Metallický papír, barva Proces Blue – závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 500 nm.





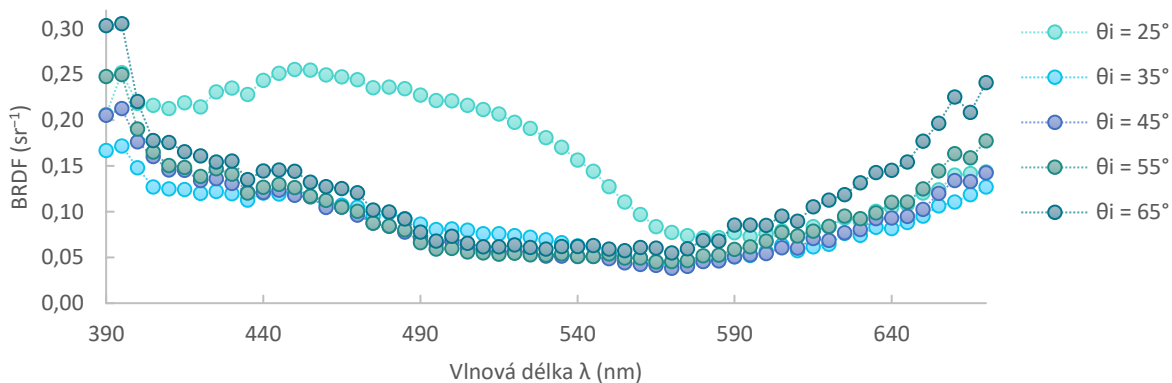
Obrázek 5.2.12 Porovnání metalického nepotištěného papíru s metalickým potištěným papírem barvou Proces Blue. Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, při úhlu dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a vlnové délce 500 nm.

Stejně jako u závislosti hodnot BRDF matných a lesklých vzorků na vlnové délce, se i závislost BRDF hodnot metalických vzorků se změnou úhlu dopadu nemění (Obrázek 5.2.13 a Obrázek 5.2.14). Také stejně jako u matných a lesklých vzorků se mění se změnou úhlu odrazu. V tomto případě však barevný vzorek má takový spektrální průběh BRDF, jaký je očekáván, ve spekulárních úhlech odrazu (Obrázek 5.2.13). Svou barevnost naopak ztrácí mimo spekulární úhel odrazu (Obrázek 5.2.14). Metalický papír se chová opačně než matný a lesklý papír, co se týče závislosti BRDF na vlnových délkách. Pravděpodobně není mimo spekulární úhly (a jejich okolí) dostatečný signál, tzn. že potištěný metalický papír mimo okolí spekulárního úhlu odrazu odráží velmi málo dopadajícího světla.



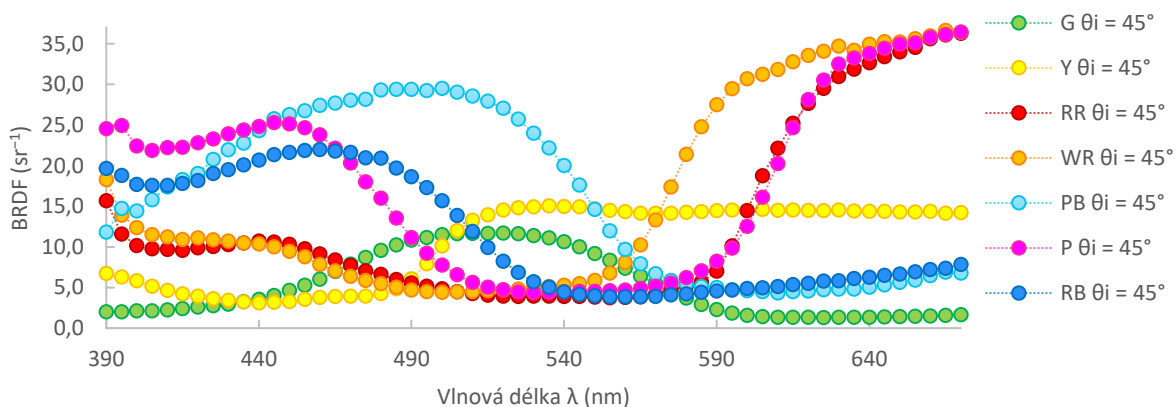
Obrázek 5.2.13 Metalický papír, barva Proces Blue – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu (tzn. pro  $\theta_i = 25^\circ$  je  $\theta_r = -25^\circ$ , pro  $\theta_i = 35^\circ$  je  $\theta_r = -35^\circ$ , pro  $\theta_i = 45^\circ$  je  $\theta_r = -45^\circ$ , pro  $\theta_i = 55^\circ$  je  $\theta_r = -55^\circ$ , pro  $\theta_i = 65^\circ$  je  $\theta_r = -65^\circ$ ).





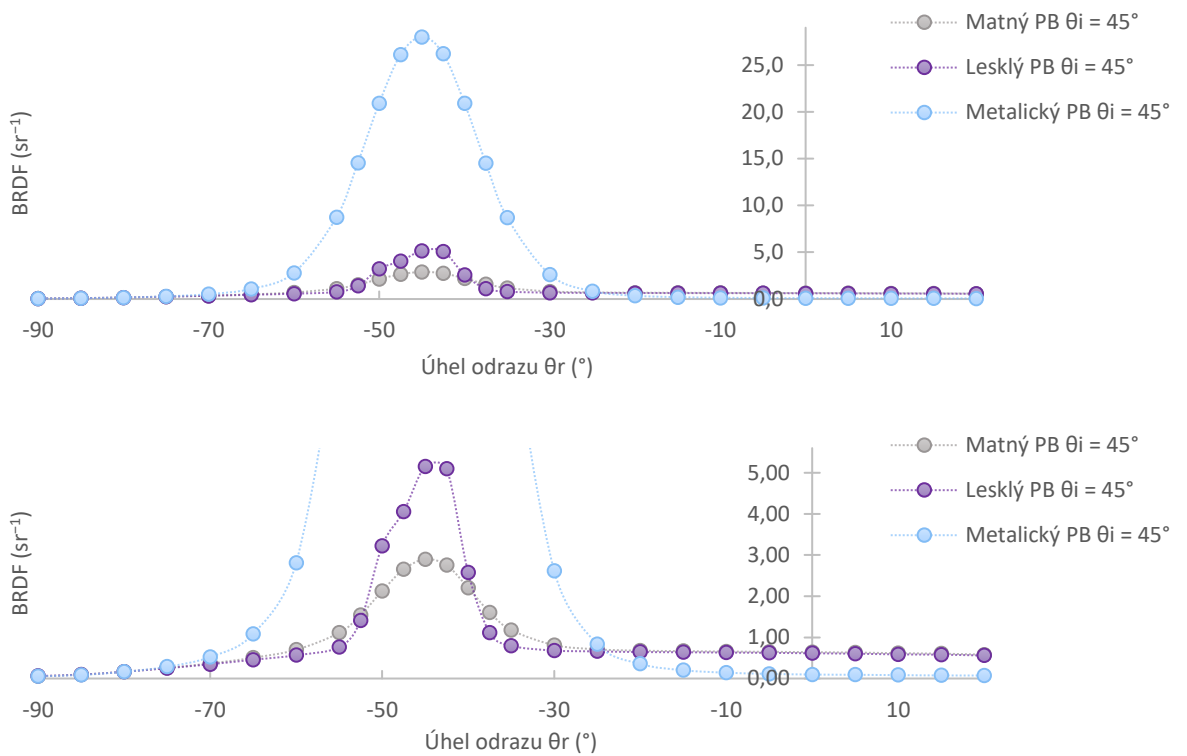
Obrázek 5.2.14 Metalický papír, barva Proces Blue – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .

U všech metalických barevných vzorků jsou závislosti hodnot BRDF na vlnové délce podle očekávání, ale pouze ve spekulárních úhlech (Obrázek 5.2.15). Mimo spekulární úhly svou barevnost postupně ztrácí (viz Obrázek 5.2.14).



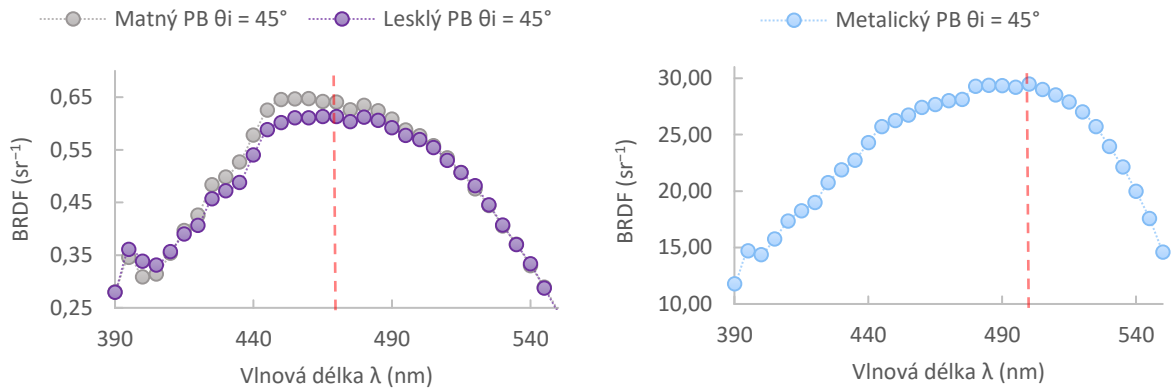
Obrázek 5.2.15 Metalický papír, všechny barevné vzorky – Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro úhel dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a spekulární úhly odrazu  $\theta_r = -45^\circ$ .

Porovnání BRDF hodnot matných, lesklých a metalických vzorků (Obrázek 5.2.16) je stejné jako porovnání matných lesklých a metalických substrátů. Metalický vzorek má opět nejvyšší hodnoty, lesklý střední hodnoty a matný hodnoty nejnižší. Díky zalití pórů v matném papíru tiskovou barvou dochází k nárůstu BRDF hodnot u matných substrátů a tím ke snížení rozdílu BRDF hodnot mezi lesklým a matným vzorkem, oproti lesklému a matnému substrátu.



Obrázek 5.2.16 Porovnání hodnot BRDF a barvy Procés Blue na matném, metalickém a lesklém substrátu. Závislost BRDF hodnot na úhlu odrazu, při úhlu dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a vlnové délce 470 nm. Reálné porovnání hodnot BRDF barvy Procés Blue na matném, metalickém a lesklém substrátu (nahore) a přiblížení na spodní oblast grafu se zaměřením na lesklý a matný vzorek (dole).

Co se týče porovnání spektrálního průběhu BRDF všech barevných vzorků, u metalických vzorků jsou křivky BRDF, oproti matným a lesklým vzorkům, mírně posunuty k vyšším vlnovým délkám (Obrázek 5.2.17). To je způsobeno stříbrným metalickým nátěrem na metalickém papíře. Stříbrný podklad metalického papíru barevnost mírně změní, oproti bílým podkladům matného a lesklého papíru.



Obrázek 5.2.17 Ukázka posunu průběhu křivek BRDF a k vyšším vlnovým délkám u metalického papíru. Matný a lesklý papír, barva Procés Blue, měřeno při úhlu dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$  (vpravo). Metalický papír, barva Procés Blue, měřeno při úhlu dopadu  $\theta_i = 45^\circ$  a úhlu odrazu  $\theta_r = -45^\circ$  (vlevo).

### 5.3 Hodnoty CIE $L^*a^*b^*$ barevných tištěných vzorků

Zde jsou uvedeny výsledky vypočtených hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , pro barevné vzorky na všech substrátech. Jsou porovnány vypočtené hodnoty pomocí metody s použitím reflexního faktoru  $\hat{R}$  a metody s použitím trichromatických hodnot Spektralonu  $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $Z_w$ . Hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  vypočtené pomocí obou metod jsou dále porovnávány s hodnotami  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  naměřenými spektrofotometrem SpectroEye X-Rite.

Hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  byly získané přepočtem z BRDF hodnot a naměřeny spektrofotometrem SpectroEye X-Rite. Pro výpočet i měření byly použity stejné standardy – standardní 2° pozorovatel a standardní osvětlení D50. Hodnoty naměřené spektrofotometrem SpectroEye X-Rite, byly zprůměrovány z pěti naměřených hodnot.

Pro porovnání výsledných hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , mezi jednotlivými metodami je využito vypočtení barvových odchylek  $\Delta E^*_{ab}$  [48].

Pro porovnání hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  vypočtených pomocí obou metod s hodnotami  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  naměřenými spektrofotometrem SpectroEye X-Rite jsou též použity barvové odchylky  $\Delta E^*_{ab}$ . Navíc je k porovnání využito výpočtu rozdílů měrné světlosti  $\Delta L^*$  [48], rozdílů chromy  $\Delta C^*$  [48] a odchylek odstínu  $\Delta H^*$  [48]:

$$\Delta H = \sqrt{\Delta E_{ab}^2 - \Delta L^2 - \Delta C^2} \quad (40)$$

Podle vypočtených barvových odchylek  $\Delta E^*_{ab}$  mezi jednotlivými metodami výpočtu hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  není velký rozdíl (Tabulka 5.3.1, Tabulka 5.3.2 a Tabulka 5.3.3). Nejvyšší barvou odchylku má barva Purple na lesklém papíře  $\Delta E^*_{ab} = 2,90$ .

Metody mají velmi podobné barvové odchylky  $\Delta E^*_{ab}$  i, co se týče porovnání s naměřenými hodnotami spektrofotometrem SpectroEye X-Rite. Mírně menší hodnoty barvových odchylek  $\Delta E^*_{ab}$  má metoda výpočtu s použitím reflexního faktoru  $\hat{R}$ . Přesto ale nelze označit tuto metodu za vyloženě lepší. Rozdíl hodnot je velmi malý.

Rozdíl mezi vypočtenými hodnotami  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  a naměřenými hodnotami  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , pomocí spektrofotometru SpectroEye X-Rite, je velmi znatelný. Barvové odchylky  $\Delta E^*_{ab}$  se pohybují v rozmezí od 30 do 60. V tomto případě hodnoty získané z gonio-spektrofotometru, přepočtem hodnot BRDF, nejsou správné.

Hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  se liší především v hodnotách měrné světlosti  $L^*$ , což je znatelné z rozdílů měrné světlosti  $\Delta L$ . Avšak v hodnotách chromy  $C^*$  a odstínu  $H^*$ , tak velké rozdíly, ve většině případů, nejsou. U barevných vzorků Rubine Red, Warm Red a Yellow se chroma  $C^*$  liší výrazněji. Odstín je poměrně dobře zachován, u většiny barevných vzorků, až na vzorek Green na metalickém papíře.

Vzorky na metalickém papíře mají nejvíce zkreslené hodnoty (Tabulka 5.3.3). U těchto vzorků dochází ke zkreslení hodnot díky, stříbrnému metalickému podkladu. V první řadě danou barvu zkreslí stříbrná barva podkladu (barva bude rozdílná, proti barvě na bílém podkladu). V druhé řadě, jak je zmíněno v kapitole 5.2, metalické vzorky odráží především okolo spekulárního úhlu odrazu a směrem od toho úhlu svou barevnost postupně ztrácí.

V případě hodnot  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , získaných přepočtem hodnot BRDF, nelze zcela říci, co zapříčiňuje jejich nesprávnost. Nesprávnost může být působena, použitým přístrojem, respektive jeho osvětlovací částí (Obrázek 4.2.2.2.5). Jak již bylo řečeno v přechozích kapitolách, použitý zdroj není standardizovaný, tudíž může hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  zkreslovat. K výpočtu je použito spektrum standardizovaného zdroje D50.

Možností zkreslení hodnot je též samotné naměření BRDF hodnot. Neshoda v naměřených a vypočtených hodnotách  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , vede k závěru, že absolutní hodnoty BRDF, nemusí být naprosto správné.

Další možností je, že u spektrofotometru nejsou známy přesné údaje o prostorových úhlech dopadajícího záření a odraženého záření při geometrii 45/0. Pro přesnější vysvětlení a kalibraci na absolutní radiometrické hodnoty by bylo nejspíše potřeba měření barevných vzorků, na gonio-spektrofotometru, porovnat s měřením na sofistikovanějším zařízení, než je spektrofotometr SpectoEye X-Rite.

Tabulka 5.3.1 Vypočtené a naměřené  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  hodnoty matných vzorků a jejich barvové odchylky  $\Delta E^*_{ab}$ .

		G	P	PB	RB	RR	WR	Y
Metodou $X_w, Y_w, Z_w$	$L^*$	91,35	71,36	91,84	58,14	77,20	96,89	96,10
	$a^*$	- 81,17	95,71	- 5,70	21,23	103,19	92,17	5,75
	$b^*$	7,54	- 41,08	- 53,66	- 79,59	25,75	50,74	31,26
Metodou $\hat{R}$	$L^*$	91,04	70,52	91,35	57,72	76,45	96,97	96,12
	$a^*$	- 80,17	93,29	- 36,86	19,08	101,67	91,16	5,92
	$b^*$	6,61	- 42,20	- 54,42	- 80,12	24,60	50,98	31,21
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>1,40</b>	<b>2,80</b>	<b>1,47</b>	<b>2,25</b>	<b>2,05</b>	<b>1,04</b>	<b>0,18</b>
X-Rite	$L^*$	58,50	38,56	56,95	29,81	43,20	58,57	87,67
	$a^*$	- 79,40	73,72	- 33,77	12,05	75,79	64,11	- 2,59
	$b^*$	1,99	- 42,67	- 49,60	- 66,18	18,69	35,95	72,71
	<b>Metoda <math>X_w, Y_w, Z_w</math>/X-Rite</b>							
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>33,36</b>	<b>39,58</b>	<b>35,18</b>	<b>32,66</b>	<b>44,23</b>	<b>49,74</b>	<b>43,12</b>
	$\Delta L$	32,85	32,79	34,89	28,33	34,00	38,31	8,43
	$\Delta C$	2,09	18,97	4,44	15,10	28,29	31,71	40,97
	$\Delta H$	5,43	11,22	0,66	6,00	0,25	0,69	10,44
	<b>Metoda <math>\hat{R}</math>/X-Rite</b>							
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>32,88</b>	<b>37,48</b>	<b>34,87</b>	<b>31,98</b>	<b>42,54</b>	<b>49,31</b>	<b>43,20</b>
	$\Delta L$	32,54	31,96	34,40	27,91	33,25	38,40	8,45
	$\Delta C$	1,03	17,21	5,72	15,09	26,54	30,95	40,99
	$\Delta H$	4,57	9,32	0,15	4,00	0,40	0,11	10,70

Tabulka 5.3.2 Vypočtené a naměřené  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  hodnoty lesklých vzorků  
a jejich barvové odchylky  $\Delta E^*_{ab}$ .

		G	P	PB	RB	RR	WR	Y
Metodou $X_w, Y_w, Z_w$	$L^*$	89,15	65,49	91,00	61,23	79,21	95,34	95,58
	$a^*$	- 86,53	97,56	- 39,77	19,52	106,82	97,30	3,81
	$b^*$	10,93	- 36,29	- 51,14	- 69,95	24,84	55,07	34,67
Metodou $\hat{R}$	$L^*$	88,81	64,52	90,51	60,81	78,42	95,40	95,62
	$a^*$	- 85,48	95,17	- 40,87	17,55	105,33	96,26	4,08
	$b^*$	9,91	- 37,62	- 51,94	- 70,49	23,62	55,30	34,64
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>1,50</b>	<b>2,90</b>	<b>1,45</b>	<b>2,08</b>	<b>2,08</b>	<b>1,06</b>	<b>0,28</b>
X-Rite	$L^*$	57,56	32,14	56,34	30,22	42,52	56,63	88,11
	$a^*$	- 84,24	79,34	- 39,15	9,15	78,46	68,39	- 3,90
	$b^*$	4,93	- 40,69	- 48,05	- 66,52	18,18	43,74	80,63
	<b>Metoda <math>X_w, Y_w, Z_w</math>/X-Rite</b>							
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>32,23</b>	<b>38,25</b>	<b>34,80</b>	<b>32,87</b>	<b>46,85</b>	<b>49,63</b>	<b>47,20</b>
	$\Delta L$	31,58	33,35	34,66	31,01	36,69	38,71	7,47
	$\Delta C$	2,83	14,92	2,81	5,47	29,13	30,62	45,85
	$\Delta H$	5,76	11,34	1,44	9,45	0,07	5,14	8,35
	<b>Metoda <math>\hat{R}</math> /X-Rite</b>							
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>31,67</b>	<b>36,17</b>	<b>34,43</b>	<b>31,97</b>	<b>45,17</b>	<b>49,13</b>	<b>47,28</b>
	$\Delta L$	31,25	32,38	34,16	30,59	35,90	38,77	7,51
	$\Delta C$	1,67	13,17	4,11	5,50	27,40	29,83	45,85
	$\Delta H$	4,85	9,30	1,09	7,49	0,66	4,51	8,77

Tabulka 5.3.3 Vypočtené a naměřené  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  hodnoty vzorků  
a jejich barvové odchytky  $\Delta E^*_{ab}$ .

		G	P	PB	RB	RR	WR	Y
Metodou $X_w, Y_w, Z_w$	$L^*$	56,17	46,05	48,48	44,43	53,18	51,27	60,53
	$a^*$	22,01	32,29	18,71	21,66	46,04	32,56	- 22,89
	$b^*$	- 22,21	- 11,19	- 24,29	- 14,22	2,94	1,09	20,00
Metodou $\hat{R}$	$L^*$	55,99	45,86	48,31	44,29	53,03	51,29	60,37
	$a^*$	21,04	31,31	17,74	20,80	45,45	31,94	- 21,90
	$b^*$	- 22,43	- 11,41	- 24,48	- 14,40	2,77	1,20	20,18
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>1,01</b>	<b>1,03</b>	<b>1,00</b>	<b>0,88</b>	<b>0,63</b>	<b>0,63</b>	<b>1,02</b>
X-Rite	$L^*$	21,44	11,82	16,42	8,47	20,04	19,43	25,71
	$a^*$	- 25,74	25,98	- 0,02	3,71	35,28	21,01	- 8,53
	$b^*$	- 14,45	- 15,05	- 28,89	- 23,08	11,66	12,59	19,59
	Metoda $X_w, Y_w, Z_w$ /X-Rite							
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>59,55</b>	<b>35,02</b>	<b>41,15</b>	<b>41,16</b>	<b>35,92</b>	<b>35,77</b>	<b>37,66</b>
	$\Delta L$	34,73	34,23	32,06	35,96	33,14	31,84	34,82
	$\Delta C$	1,75	4,15	1,77	2,53	8,98	8,08	9,03
	$\Delta H$	48,35	6,13	19,20	19,85	10,55	14,15	11,17
	Metoda $\hat{R}$ /X-Rite							
	$\Delta E^*_{ab}$	<b>58,70</b>	<b>34,64</b>	<b>40,62</b>	<b>40,63</b>	<b>35,65</b>	<b>35,55</b>	<b>37,15</b>
	$\Delta L$	34,55	34,04	31,89	35,82	32,99	31,86	34,66
	$\Delta C$	1,23	3,30	1,35	1,92	8,38	7,46	8,41
	$\Delta H$	47,44	5,55	18,25	19,07	10,60	13,91	10,41

## 6. Závěr

Gonio-spektrofotometr sestavený na Katedře polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice je možné použít pro měření tištěných vzorků a k zjištění jejich BRDF hodnot. Po proměření tištěných vzorků tímto gonio-spektrofotometrem lze zjistit charakteristické vlastnosti a chování vzorku, při změnách úhlů dopadu a úhlů odrazu. Tyto hodnoty by však neměly být považovány za stoprocentně přesné a průkazné. Gonio-spektrofotometr má svá omezení a jsou zde faktory při nastavení gonio-spektrofotometru a při měření pomocí něj, které mohou měření a výsledné BRDF hodnoty ovlivnit.

Gonio-spektrofotometr je tedy vhodné použít pro zjištění přibližných BRDF hodnot nebo pro zjištění spektrálního průběhu vzorku. Spektrální průběhy vzorku totiž toto měřicí zařízení ukazuje poměrně přesně, na rozdíl od absolutních hodnot.

Základním faktorem, který ovlivní celé měření je kalibrace gonio-spektrofotometru. Při kalibraci dochází k subjektivnímu hodnocení při citlivém nastavování v průběhu mechanické kalibrace. Proto je vhodné před každým měřením provést charakterizaci zařízení proměřením Spektralonu. Tím může uživatel zvolit vhodnou konstantu, která zajistí shodu absolutních hodnot, při měření gonio-spektrofotometrem. V případě této práce, byla BRDF data jiná než očekávání. BRDF data měla správný spektrální průběh, v rozsahu vlnových délek od 390 nm do 670 nm, ale jiné absolutní hodnoty vypočtené odrazivosti. Proto byla veškerá naměřená data upravena pomocí konstanty  $K$ , díky čemuž bylo dosaženo i shody absolutních hodnot s daty z odborné literatury.

S charakterizací gonio-spektrofotometru souvisí i výběr vhodného vzorku Spektralonu. Dalším faktorem, který ovlivňuje měření daným gonio-spektrofotometrem je zdroj osvětlení. V daném případě je zdroj nestálý v čase, jeho intenzita kolísá. To ovlivňuje jak samotné měření, tak výpočet hodnot BRDF. Díky tomu, že v daném gonio-spektrofotometru je intenzita zdroje v určitých intervalech vlnových délek relativně nízká, ovlivňuje tím dosažené výsledky. Proto jsou v této práci výsledky udávány v rozmezí vlnových délek pouze od 390 nm do 670 nm.

Posledním z faktorů, který ovlivňuje měření je homogenita osvětlovacího svazku, kterou by bylo dobré ověřit.

Po použití konstanty  $K$  jsou výsledné hodnoty BRDF bílého difuzního standardu téměř podle očekávání. Metalický substrát i vzorek mají hodnoty BRDF nejvyšší, lesklý substrát i vzorek hodnoty BRDF střední a matný substrát, vzorek i Spektralon hodnoty BRDF nejnižší.



U substrátů i vzorků dochází k nárůstu BRDF hodnot ve spekulárních úhlech odrazu, se zvyšujícím se úhlem dopadu. To je pravděpodobně způsobeno pozicí gonio-spektrofotometru vůči osvětlení.

Spektrální závislosti BRDF hodnot (závislosti BRDF hodnot na vlnové délce) barevných vzorků jsou podle očekávání v závislosti na použité barvě. U lesklých a matných vzorků je získávána očekávaná spektrální závislost BRDF mimo spekulární úhly odrazu, u metalických vzorků ve spekulárních úhlech odrazu. Přes všechny nedostatky popsané v této práci je pro zjištění spektrálního průběhu BRDF u tištěných vzorků možné daný gonio-spektrofotometr použít.

Stanovené hodnoty  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , daným gonio-spektrofotometrem nejsou zcela správné. Nicméně, k jejich přibližnému stanovení by se dal gonio-spektrofotometr použít. Nejvhůře stanovitelným atributem je měrná skvětllost  $L^*$ . Odstín a chroma jsou, ve většině případů, ze získaných dat, z gonio-spektrofotometru, stanoveny poměrně dobře v porovnání s měřením přístrojem SpectoEye X-Rite.

Pokud chce tedy uživatel gonio-spektrofotometru zjistit alespoň přibližné absolutní hodnoty BRDF nebo zjistit spektrální průběhy BRDF tištěných vzorků, je možné tento gonio-spektrofotometr k měření použít. Musí se ale počítat se všemi omezeními a faktory, popsány v této práci, které měření a výsledky ovlivňují.

## 7. Použitá literatura

- [1] KLADEČEK P. Odraz světla, BRDF. *Skupina počítačové grafiky – Univerzita Karlova* [online]. 2011, 17. 10. 2011 [cit. 15-11-2016]. Dostupné z: <http://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/teaching/2011-pg3/poznamky/03%20-%20odraz%20svetla,%20BRDF.pdf>.
- [2] ODFORCE *forum PBR all purpose layered shader* [online]. © Community Software by Invision Power Services, Inc. [cit. 05-05-2017]. Dostupné z: <http://forums.odforce.net/topic/18353-pbr-all-purpose-layered-shader/>.
- [3] KOSTAL, H. Novel technologies go beyond color to measure surface appearance. *Laser focus world*, 2008, roč. 44, č. 8, s. 115–117, ISSN 1043-8092.
- [4] DOHNAL, M. *Fyzikální základy reprodukce obrazu*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003, s. 7–69, ISBN 978-80-7194-945-9.
- [5] WYSZECKI, G. a W. S. STILES, *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. Vyd. 2. New York: Wiley, c1982. ISBN 978-0-471-39918-6.
- [6] MATĚJKA, J. *BRDF dílna*, Praha, 2011. s. 59, Diplomová práce. Univerzita Karlova, Fakulta matematicko-fyzikální. Vedoucí práce RNDr. Josef Pelikán, KSVI.
- [7] NICODEMUS, F. E., J. C. RICHMOND, J. J. HSIA a kol., *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*, 1977, s. 67, ISBN 003-003-01793.
- [8] RICHARD FITZPATRICK. *Law of Reflection* [online]. © 2007 [cit. 23-04-2016]. Dostupné z: <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/302/lectures/node127.html>.
- [9] HÉLBERT M., R. D. HERSH A P. EMMEL, *Fundamentals of Optics and Radiometry for Color Reproduction. Handbook of Digital Imaging* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2015, [cit. 05-05-2017]. ISBN 9781118798706. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118798706.hdi062>.
- [10] FYZIKÁLNÍ ÚSTAV UK Oddělení fyziky biomolekul, *Fotometrie a radiometrie* [online] © 2017 Univerzita Karlova. [cit. 05-05-2016]. Dostupné z: [http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Fotometrie\\_a\\_radiometrie.pdf](http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Fotometrie_a_radiometrie.pdf).
- [11] PROKHOROV, A. Effective Emissivities of Isothermal Blackbody Cavities Calculated by the Monte Carlo Method Using the Three-component Bidirectional Reflectance Distribution Function Model. *Applied Optics* [online]. 2012, roč. 51, č. 13, s. 2322–2332, [cit. 23-04-2016]. Dostupné z: [http://www.virial.com/pdf/AO2012-51-13-2322-2332\\_EE3C.pdf](http://www.virial.com/pdf/AO2012-51-13-2322-2332_EE3C.pdf).

- [12] MATUSIK, W. *A data-driven reflectance model* Massachusetts, 2003. s. 115, PhD Disertace. Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Vedoucí práce Leonard McMillan [online]. [cit. 15-11-2016]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.7014&rep=rep1&type=pdf>.
- [13] WANG, H., W. ZHANG.a A. DONG, Measurement and modeling of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) on material surface. *Measurement* 2013, roč.46, č. 9, s. 3654–3661, ISSN 0263-2241.
- [14] LAWRENCE, J.D, *Acquisition and Representation of Material Appearance for Editing and Rendering* Princeton 2006. 20–36 s. PhD Disertace. Princeton University, Department of Computer Science [online]. [cit. 13-11-2016]. Dostupné z: [http://gfx.cs.princeton.edu/pubs/\\_2006\\_AAR/thesis\\_hires.pdf](http://gfx.cs.princeton.edu/pubs/_2006_AAR/thesis_hires.pdf).
- [15] GEORGIEV, G.T, C.K. GATEBE, J.J. BUTLER a kol., *Comparison between laboratory and airborne BRDF measurements for remote sensing* [online]. s. 629603- [cit. 13-11-2016]. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.680542>
- [16] OTREMBA, Z., J. PISKOZUB, Modeling the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater polluted by an oil film. *Optics Express*. 2004, roč. 12, č. 8, s. 1671–1676, ISSN 1094-4087.
- [17] GERMER T.A., M.E. NADAL, Modeling the appearance of special effect pigment coatings. *Proceedings of SPIE* 4447, 2001, s. 77–86, ISSN 0277-786X.
- [18] BAI L., Z.S. WU, X.R. ZOU a kol., Seven-parameter statistical model for BRDF in the UV band. *Optics Express*, 2012, roč. 20, č. 11, s. 12085–12094, ISSN 1094-4087.
- [19] LU R., J.J. KOENDERINK a A.M.L. KAPPERS, Optical properties (bidirectional reflectance distribution function) of shot fabric. *Applied Optics*, 2000, roč. 39, č. 31, s. 5785–5795, ISSN: 2155-3165.
- [20] BALLING, B. A, *Comparative Study of The Bidirectional Reflectance Distribution Function of Several Surfaces as a Mid-Wave Infrared Diffuse Reflectance Standard*, Ohio, 2009. 198 s. Diplomová práce. Air University, Institute of Technology. Vedoucí práce Dr. Michael Marciniak.
- [21] SPIE Probing Optical Properties of Nanomaterials *Sensing & Measurement* [online] © 2016. [cit. 25-04-2016]. Dostupné z: <http://spie.org/newsroom/technical-articles-archive/4047-probing-optical-properties-of-nanomaterials>.
- [22] MARSCHNER, S. R., S. H. WESTIN, E. P. F. LAFORTUNE a kol., *Image-Based BRDF Measurement Including Human Skin*. Eurographics Rendering Techniques'99, 1999, s. 131–144. ISBN 978-3-7091-6809-7.

- [23] PROKOPENKO, V. T., S. A. ALEKSEEV, N. V. MATVEEV, a kol., Simulation of the Polarimetric Bidirectional Reflectance Distribution Function. *Optics and Spectroscopy*, 2013, roč. 114, č. 6, s. 961–964, ISSN 1562-6911.
- [24] PRIEST, R. G. a T. A. GERMER, *Polarimetric BRDF in the Microfacet Model: Theory and Measurements*, Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposium Specialty Group on Passive Sensors, 2000, 1, s. 169–181.
- [25] SUN, B., K. SUNKAVALLI, R. RAMAMOORTHI a kol., Time-Varying BRDFs. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, roč. 13, č. 3, s. 595–609, ISSN 1077-2626.
- [26] OXFORD UNIVERSITY PRESS Dictionary *Definition of Reflectivity in English* [online]. © 2016. [cit. 13-11-2016]. Dostupné z: <http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/reflectivity>.
- [27] KRAHULÍK, M. *Reprezentace BRDF v Počítačové Grafice* Praha, 2005. s. 81, Diplomová práce. ČVUT FEL, Katedra počítačů. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Sloup.
- [28] MARK E. TUCKERMAN Law of Conservation of Energy. *Law of Conservation of Energy*. [online]. © 2011 [cit. 29-04-2016]. Dostupné z: [http://www.nyu.edu/classes/tuckerman/adv.chem/lectures/lecture\\_2/node4.html](http://www.nyu.edu/classes/tuckerman/adv.chem/lectures/lecture_2/node4.html).
- [29] STÁTNICE FI MUNI mgr-szz 6-gra [online]. © 2014. [cit. 01-12-2016]. Dostupné z: <http://statnice.dqd.cz/mgr-szz:in-gra:6-gra>.
- [30] PHONG, B. T. Illumination for Computer Generated Pictures. *Communications of the ACM*, 1975, roč. 18, č. 6, s. 311–317, ISSN 0001-0782.
- [31] TORRANCE, K. E. a E. M. SPARROW, *Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces\**, *Journal of the Optical Society of America*, 1967, roč. 57, č. 9, s. 1105–1114, ISSN 1084-7529.
- [32] LVOVSKY, A. I. *Fresnel Equations*. Encyclopedia of Optical Engineering, Taylor and Francis: New York, USA, 2013, s. 1–6
- [33] WARD, G. J. Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1992, roč. 26, č. 2, s. 265–272, ISSN:0097-8930.
- [34] FEEC VUT BRNO Multimediální Učebnice, *Slovník pojmů Diracův Impuls*. [online]. © 2010 [cit. 30-04-2016]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=diracuv\\_impulz&bck=4-4-A](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=diracuv_impulz&bck=4-4-A)
- [35] MATSAPEY, N., J.FAUCHEU, M. FLURY a kol., Design of a gonio-spectrophotometer for optical characterization of gonio-apparent materials. *Measurement Science and Technology*, 2013, roč. 24, č. 6, ISSN 0957-0233.

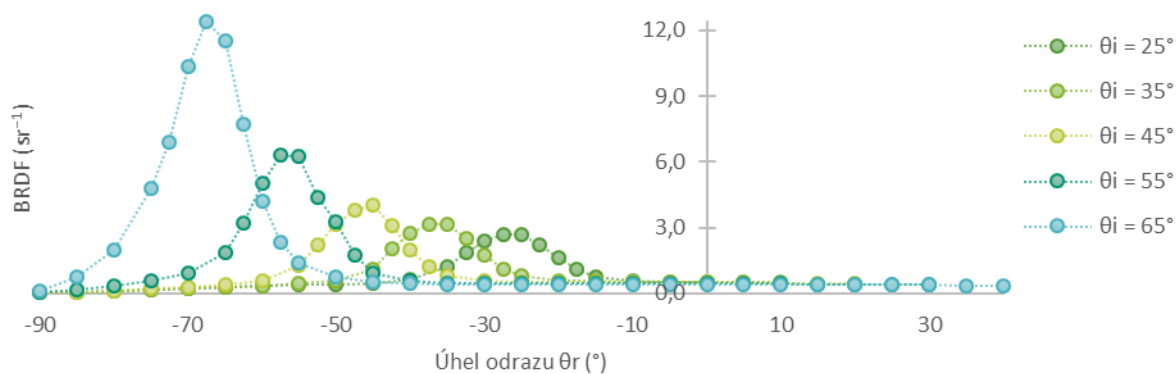
- [36] LI, H., S. FOO, K. E. TORANCE a kol., Automated three-axis gonioreflectometer for computer graphics applications. *Optical Engineering*, 2006, roč. 45, č. 4, ISSN: 0091-3286.
- [37] FOO, S.CH. *A gonioreflectometer for measuring the bidirectional reflectance of material for use in illumination computation* 1997, s. 145, Diplomová práce. Cornell University, Faculty of the Graduate School, Vedoucí práce prof. Ken Torrance.
- [38] ARNEY, J. S., H. HEO A P. G. ANDERSON, A Micro-Goniophotometer and the Measurement of Print Gloss. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2004, roč. 48, č. 5, ISSN 1062-3701.
- [39] HUNERHOFF, D., U. GRUSEMANN a A. HÖPE, New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection. *Metrologia*, 2006, roč. 43, č. 2, s. 11–16, ISSN 0026-1394.
- [40] HAN, Y., H. SUN, J. FENG a kol., Analysis of the optical scattering characteristics of different types of space targets, *Measurement Science and Technology*, 2014, roč. 25, č. 7, ISSN 0957-0233.
- [41] NADAL, M. E., E. A. EARLY a R. R. BOUSQUET *NIST Special Publication SP250-71-0:45 Surface Color* National Institute of Standards and Technology Special Publication SP250-71, 2008, s. 84, CODEN: NSPUE2 [online]. [cit. 21-02-2017]. Dostupné z: [https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/pml/div685/grp05/SP250\\_71-Colorimeter.pdf](https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/pml/div685/grp05/SP250_71-Colorimeter.pdf).
- [42] NADAL, M. E. a G. OBEIN, *NIST goniospectrometer for surface color measurements* CIE expert Symposium on advances in Photometry and Colorimetry, CIE publication, 2008, s. 134–138.
- [43] REN, J. a J. ZHAO, Measurement of a bidirectional reflectance distribution and system achievement based on a hemi-parabolic mirror. *Optics Letters*, 2010, roč. 35, č. 9, s. 1458–1460, ISSN 0146-9592.
- [44] HÖPE A., K.-O. HAUER, Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials. *Metrologia*, 2010, roč. 47, č. 3, s. 295, ISSN 0026-1394.
- [45] MÖLLER, W., K.-P. NIKOLAUS a A. HÖPE, Degradation of the diffuse reflectance of Spectralon under low-level irradiation. *Metrologia*, 2003, roč. 40, č. 1, s. 212, ISSN 0026-1394.
- [46] ASTM E1392-69., *Standard Practice for Angle Resolved Optical Scatter Measurements on Specular or Diffuse Surfaces*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1996.

- [47] ASTM E2194 – 12, Standard Practice for *Multiangle Color Measurement of Metla Flake Pigmented Materials*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA 19428-2959.
- [48] KAPLANOVÁ, M. a kol. *Moderní polygrafie*. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2009. ISBN 978-80-254-4230-2.
- [49] SIMONOT, L., M. HÉBERT a D. DUPRAZ. *Goniocolorimetry: From measurement to representation in the CIELAB color space*. *Color Research & Application* [online]. 2011, 36.3, s. 169–178 [cit. 06-05-2017] ISSN 03612317.  
Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/col.20605>.

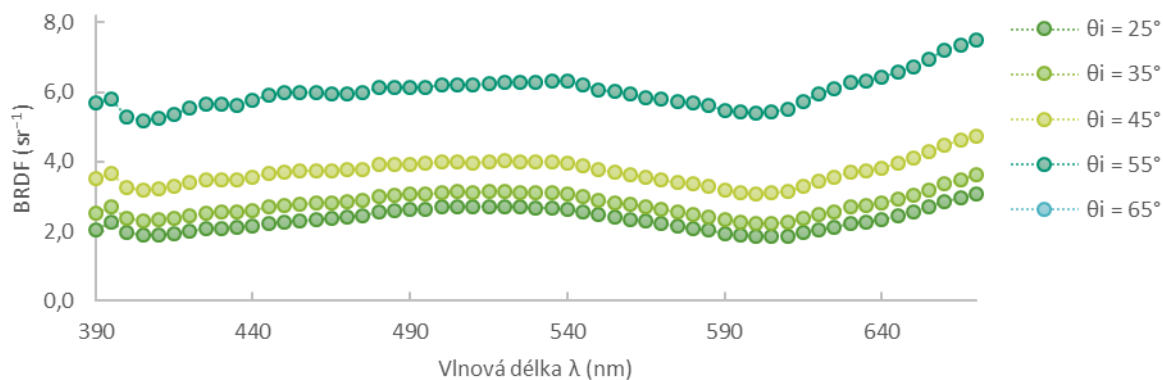
## 8. Přílohy

Obrázek P. A1 <i>Matný papír – Barva Green</i> .....	80
Obrázek P. A2 <i>Matný papír – Barva Purple</i> .....	81
Obrázek P. A3 <i>Matný papír – Barva Reflex Blue</i> .....	82
Obrázek P. A4 <i>Matný papír – Barva Rubine Red</i> .....	83
Obrázek P. A5 <i>Matný papír – Barva Warm Red</i> .....	84
Obrázek P. A6 <i>Matný papír – Barva Yellow</i> .....	85
Obrázek P. B1 <i>Lesklý papír – Barva Green</i> .....	86
Obrázek P. B2 <i>Lesklý papír – Barva Purple</i> .....	87
Obrázek P. B3 <i>Lesklý papír – Barva Reflex Blue</i> .....	88
Obrázek P. B4 <i>Lesklý papír – Barva Rubine Red</i> .....	89
Obrázek P. B5 <i>Lesklý papír – Barva Warm Red</i> .....	90
Obrázek P. B6 <i>Lesklý papír – Barva Yellow</i> .....	91
Obrázek P. C1 <i>Metalický papír – Barva Green</i> .....	92
Obrázek P. C2 <i>Metalický papír – Barva Purple</i> .....	93
Obrázek P. C3 <i>Metalický papír – Barva Reflex Blue</i> .....	94
Obrázek P. C4 <i>Metalický papír – Barva Rubine Red</i> .....	95
Obrázek P. C5 <i>Metalický papír – Barva Warm Red</i> .....	96
Obrázek P. C6 <i>Metalický papír – Barva Yellow</i> .....	97

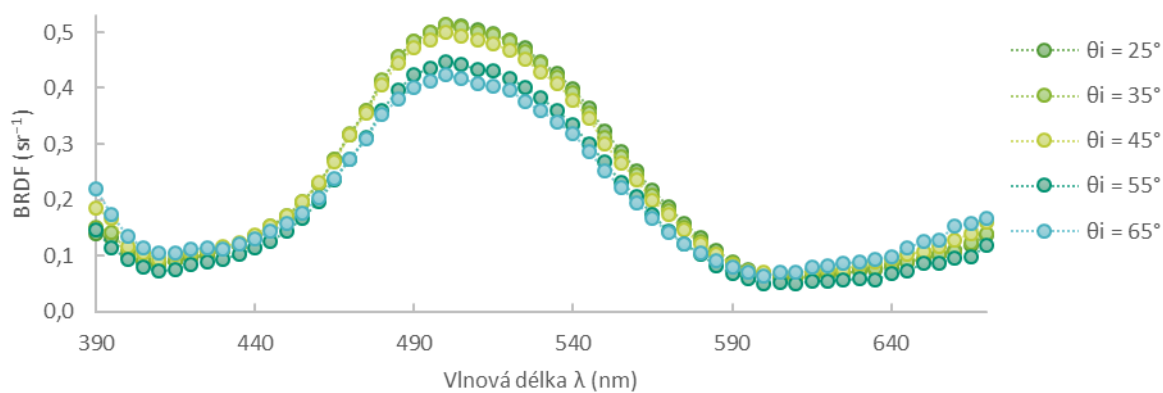
**Obrázek P. A1** Matný papír – Barva Green



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 500 nm.*



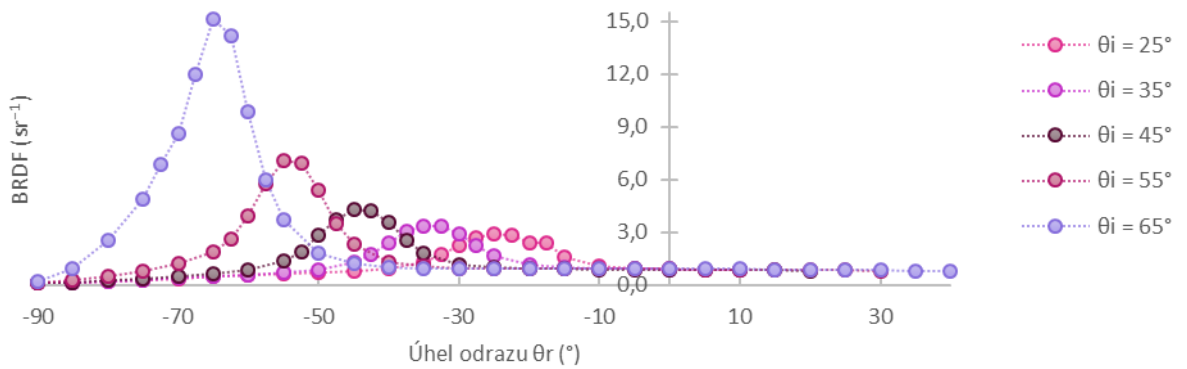
*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*



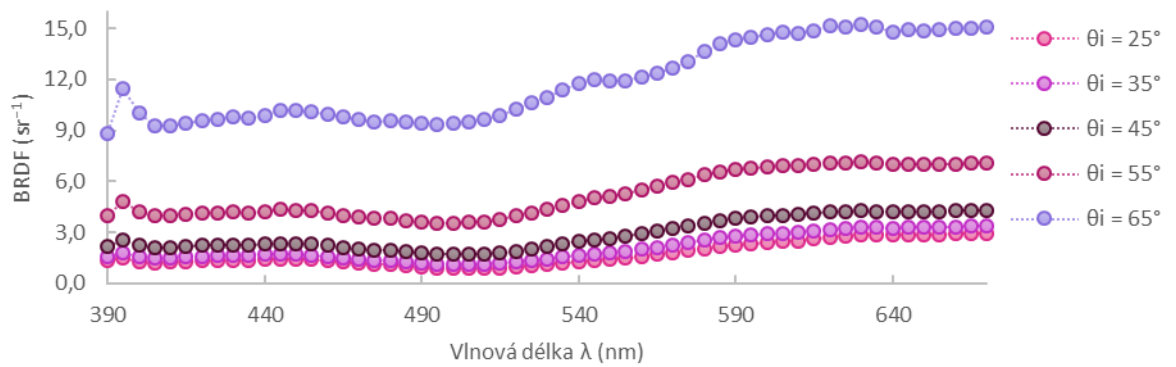
*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*



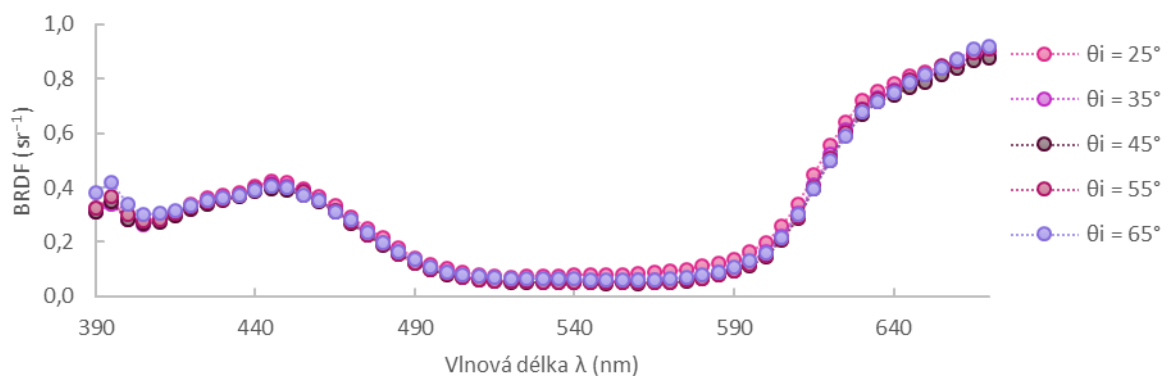
**Obrázek P. A2** Matný papír – Barva Purple



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

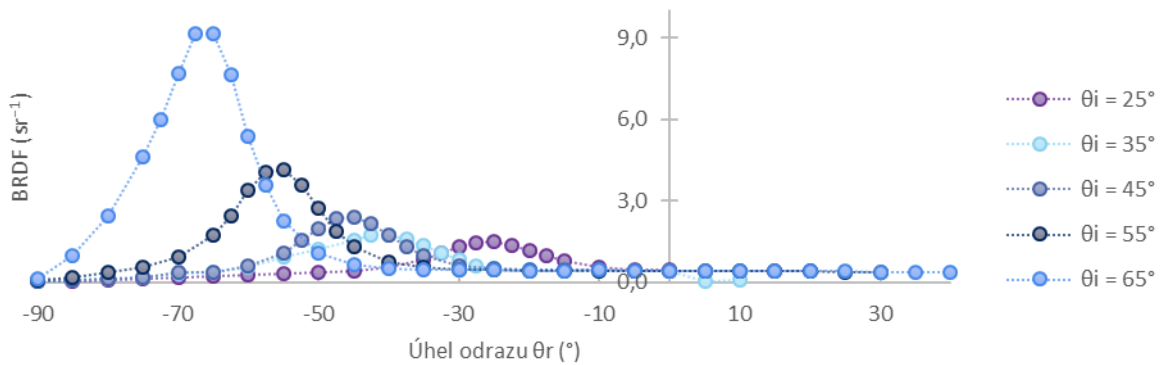


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

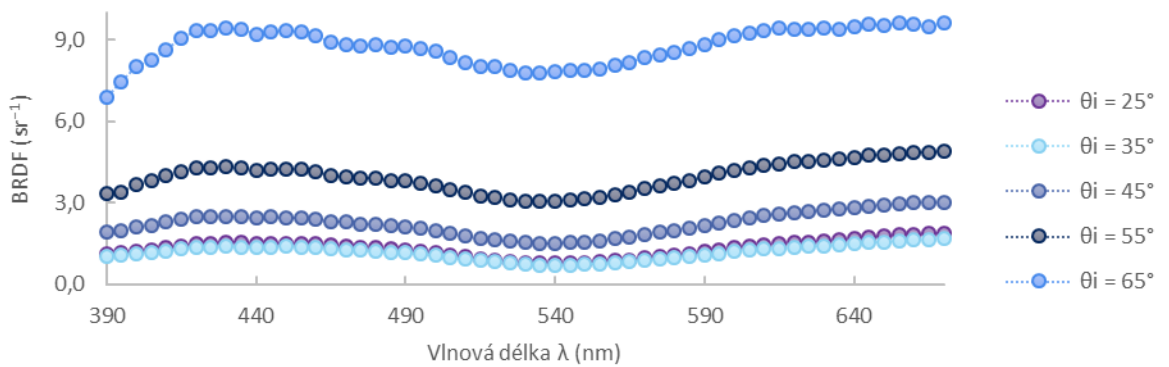


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

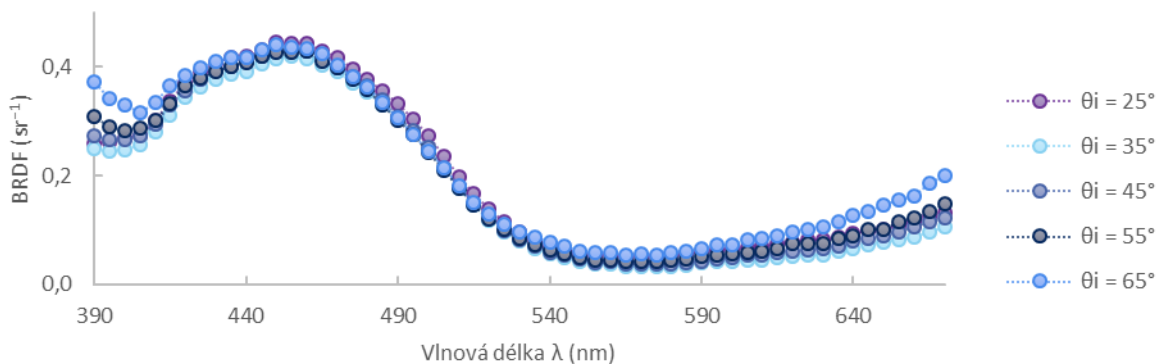
**Obrázek P. A3** Matný papír – Barva Reflex Blue



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 460 nm.*

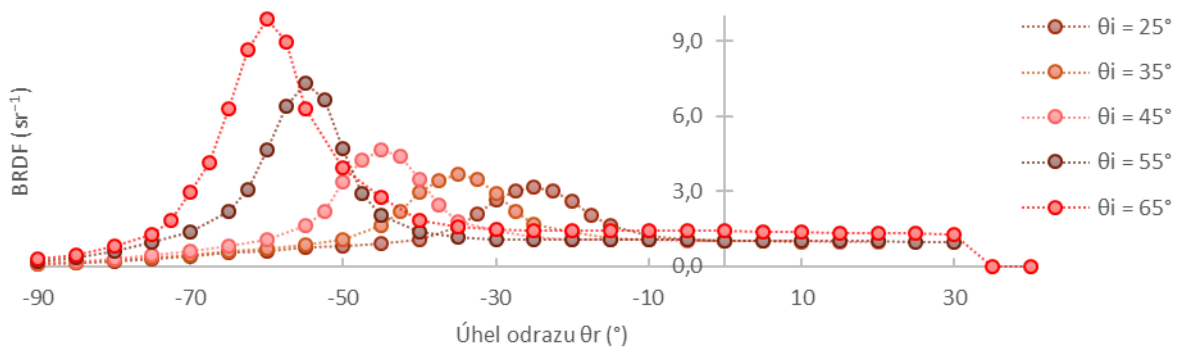


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

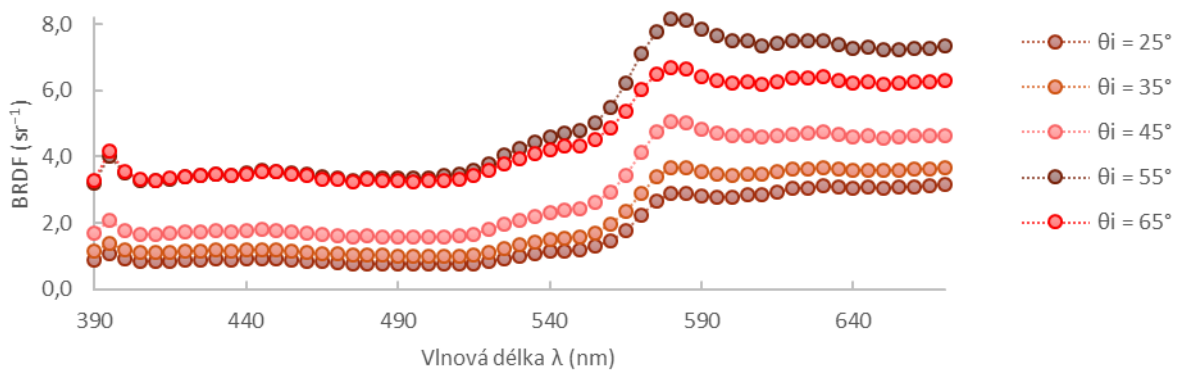


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

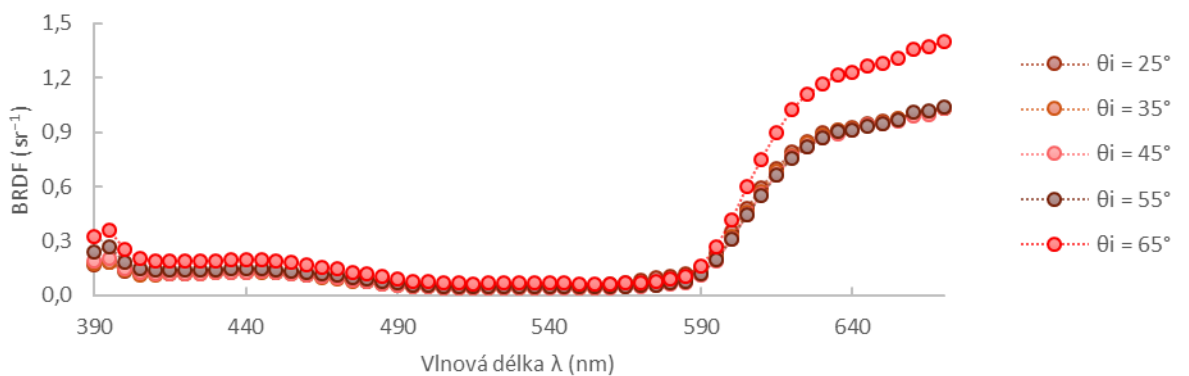
**Obrázek P. A4 Matný papír – Barva Rubine Red**



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

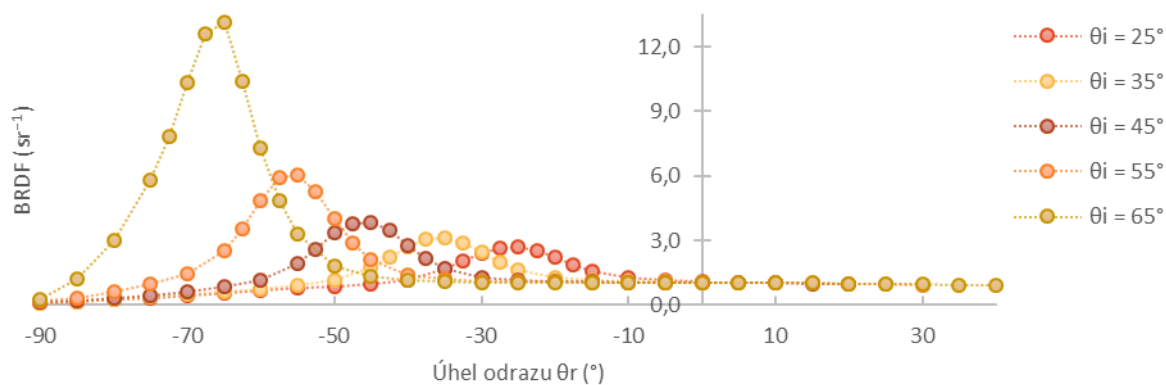


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

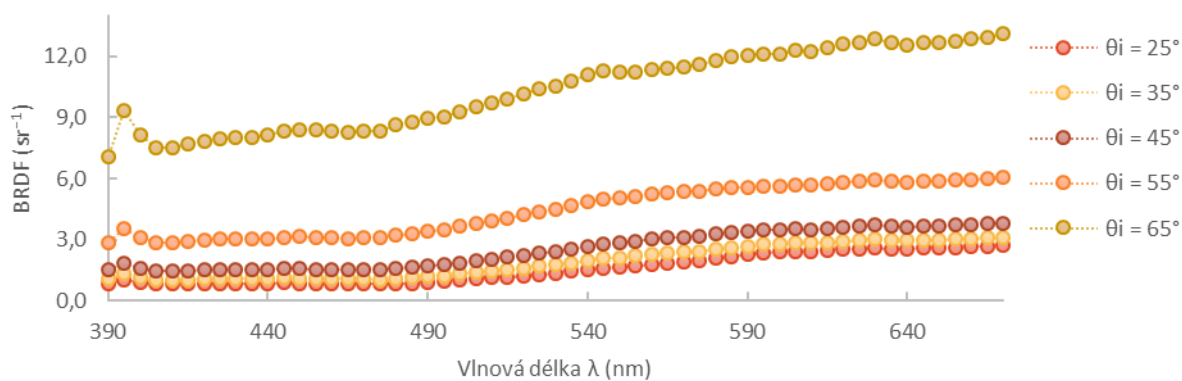


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

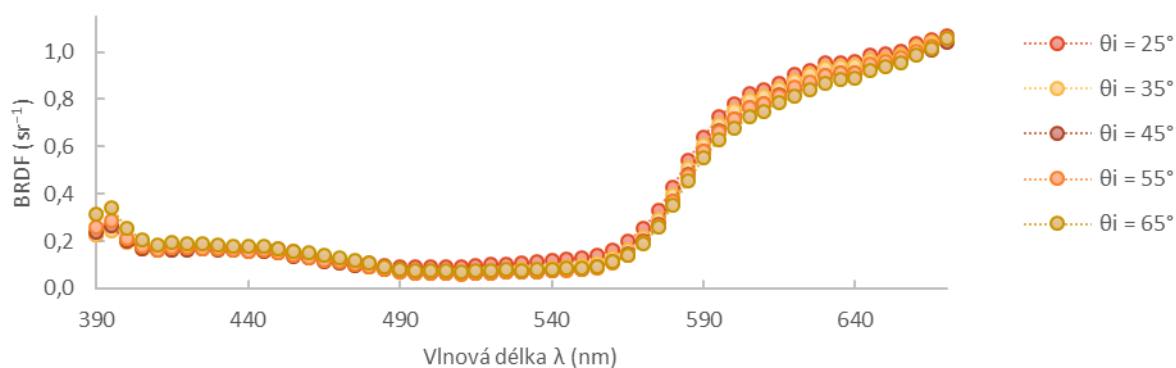
**Obrázek P. A5** Matný papír – Barva Warm Red



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

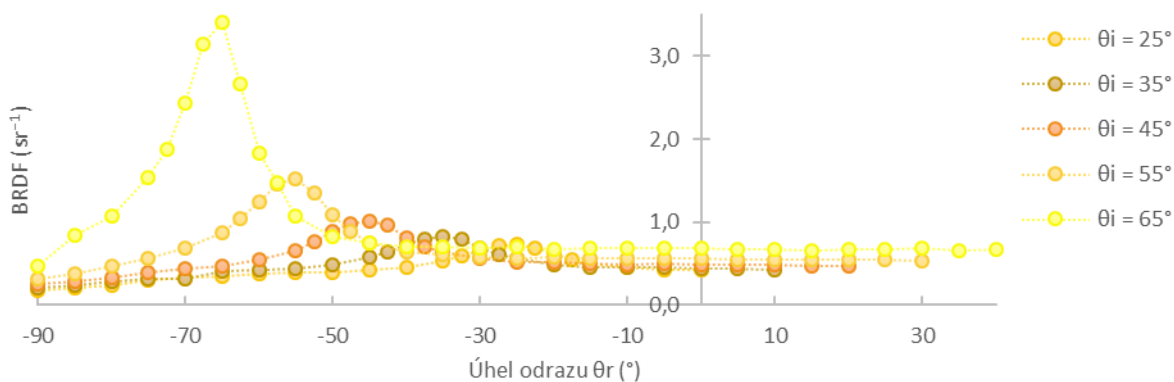


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

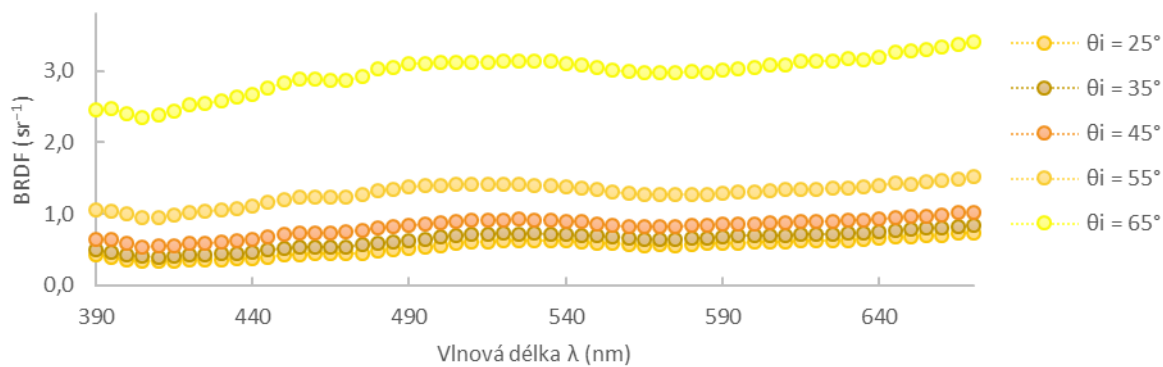


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

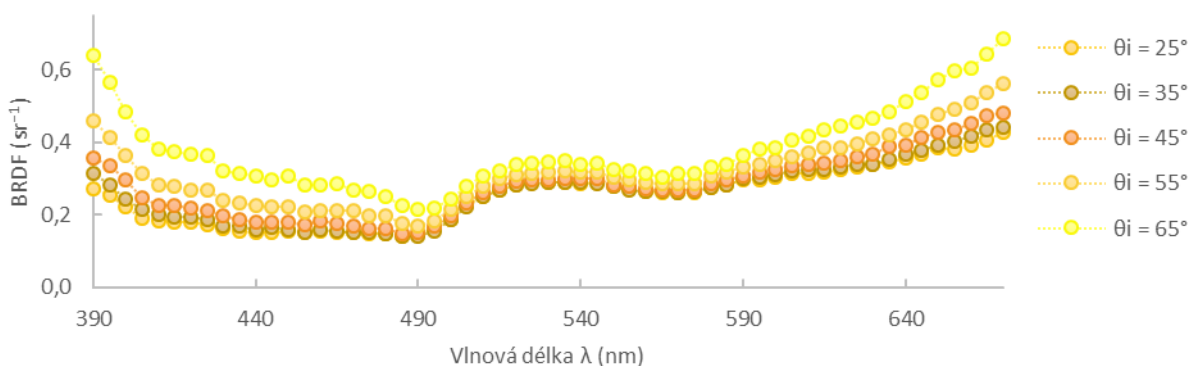
**Obrázek P. A6** Matný papír – Barva Yellow



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

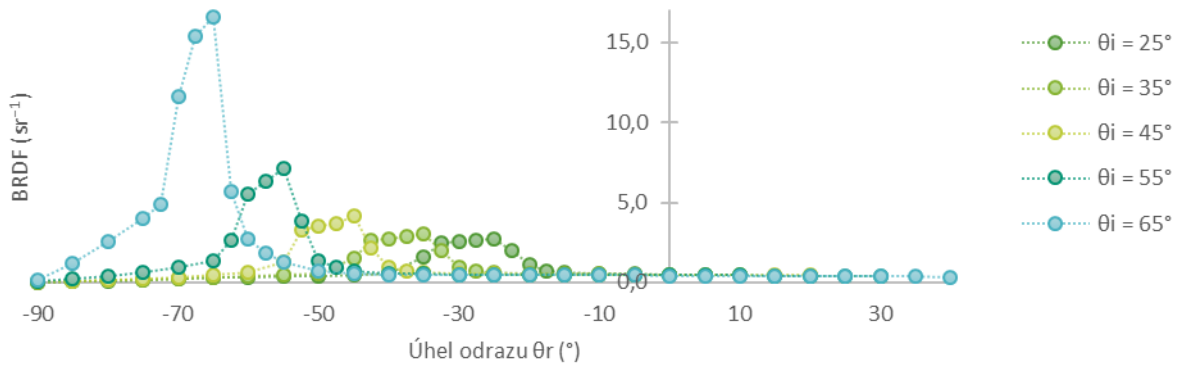


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

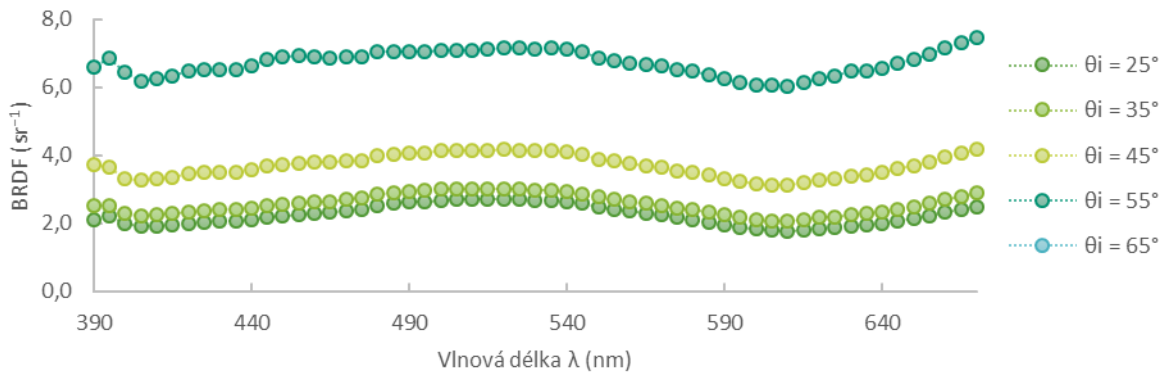


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

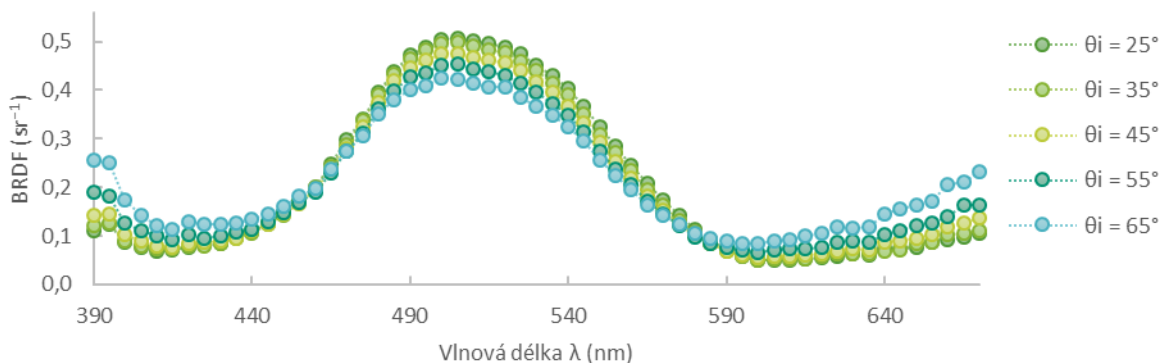
**Obrázek P. B1** Lesklý papír – Barva Green



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 500 nm.*

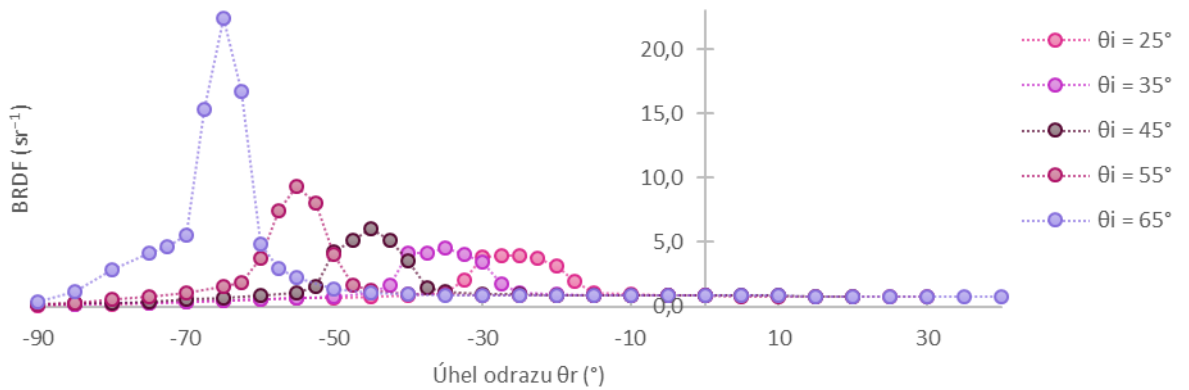


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

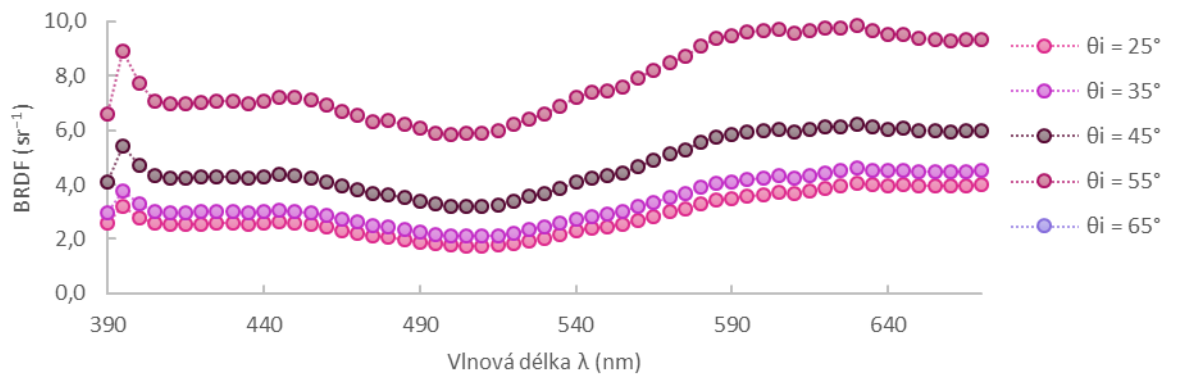


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

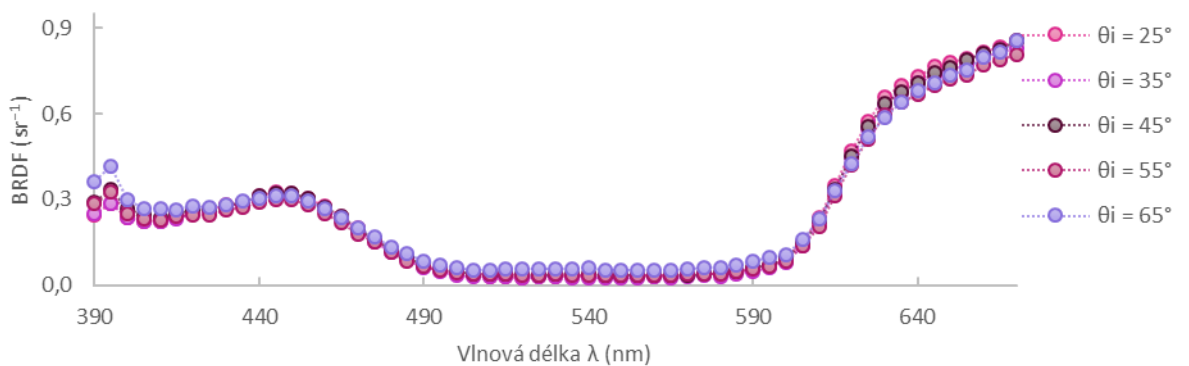
**Obrázek P. B2** Lesklý papír – Barva Purple



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

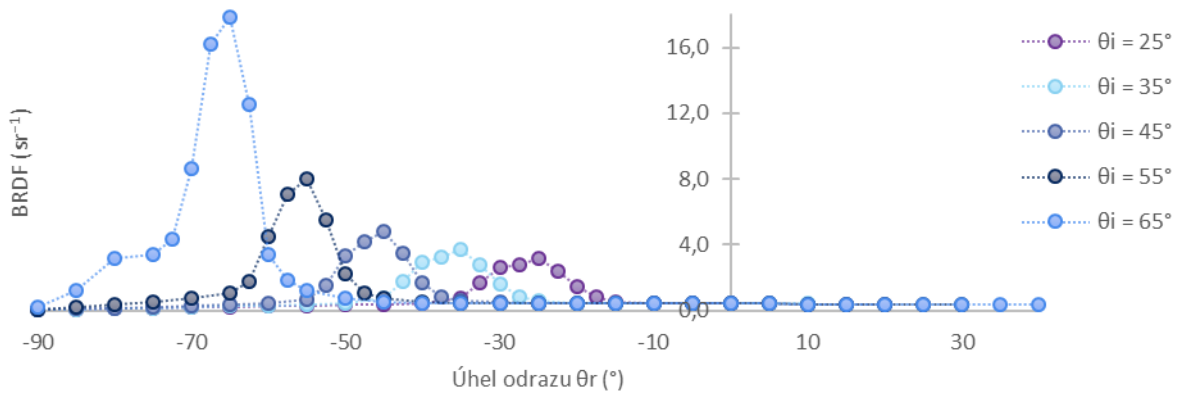


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

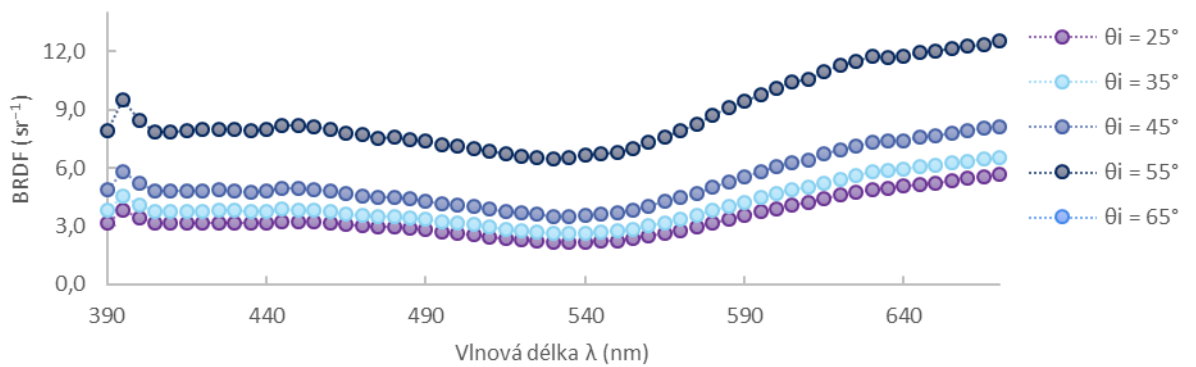


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

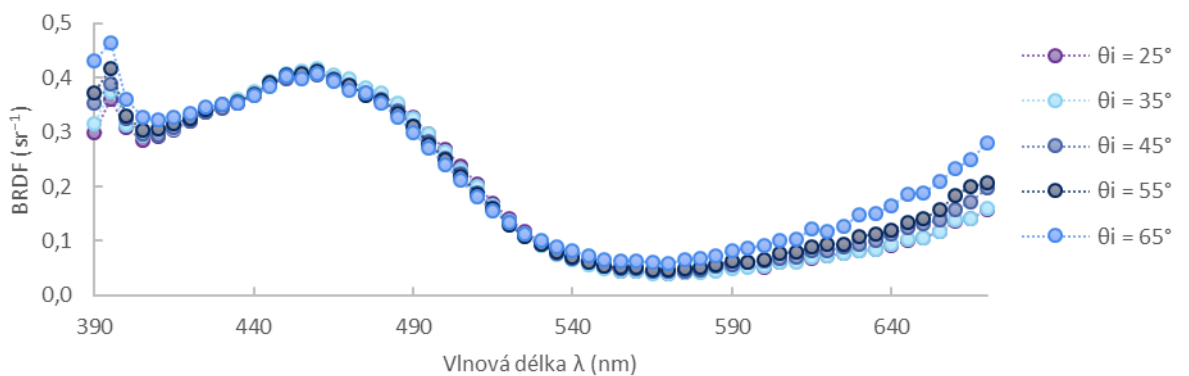
**Obrázek P. B3** Lesklý papír – Barva Reflex Blue



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 460 nm.*



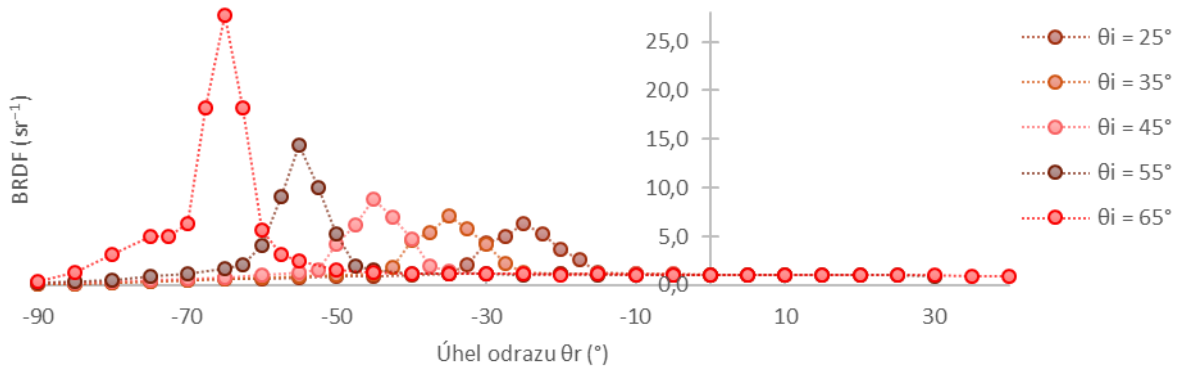
*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*



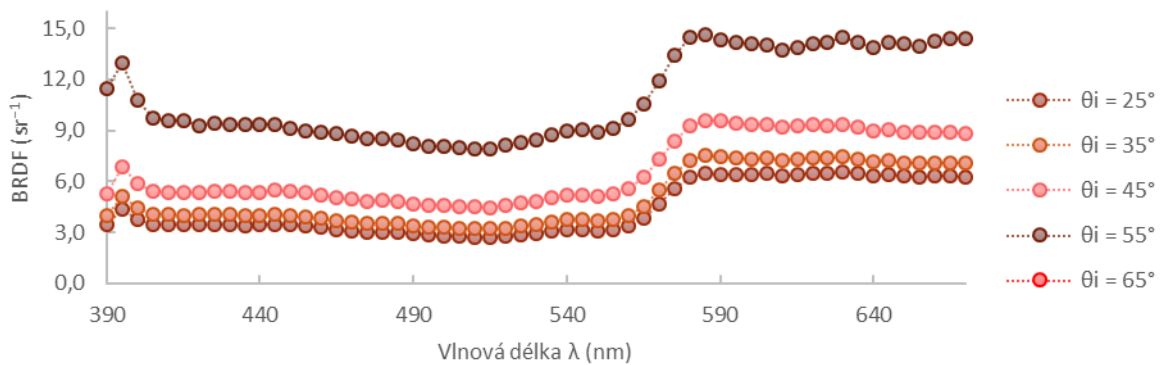
*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*



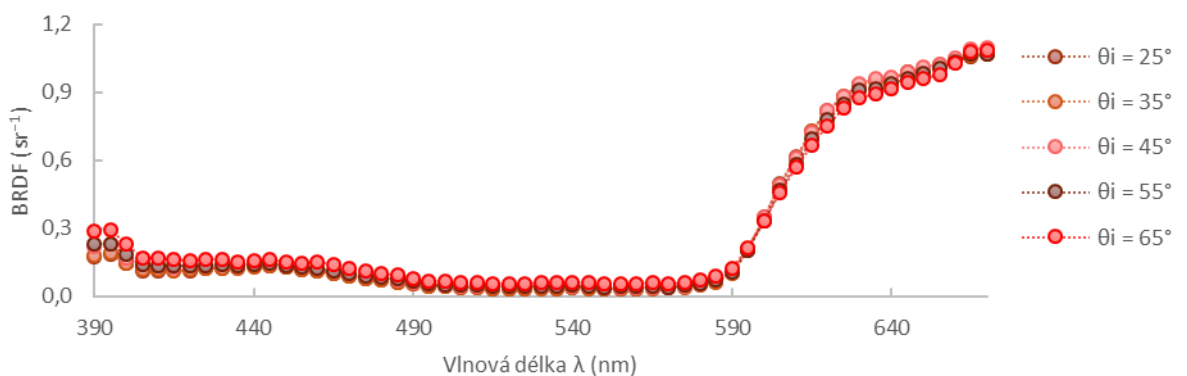
**Obrázek P. B4** Lesklý papír – Barva Rubine Red



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

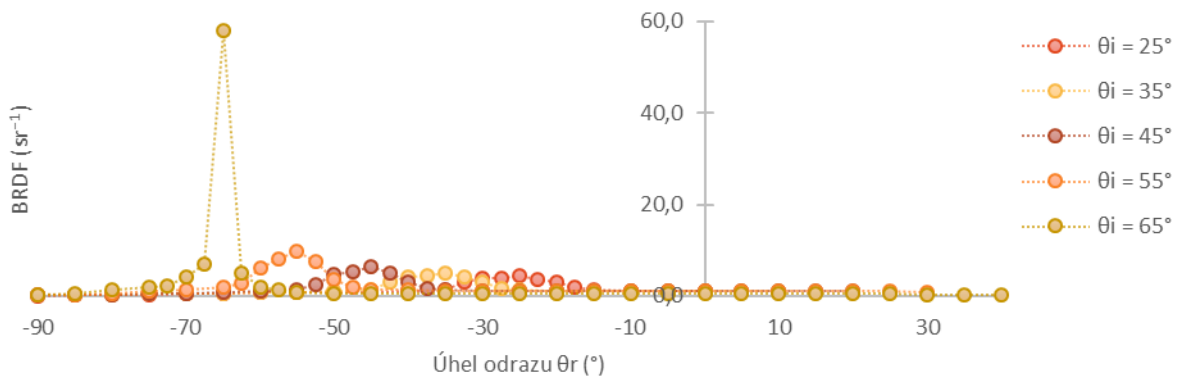


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

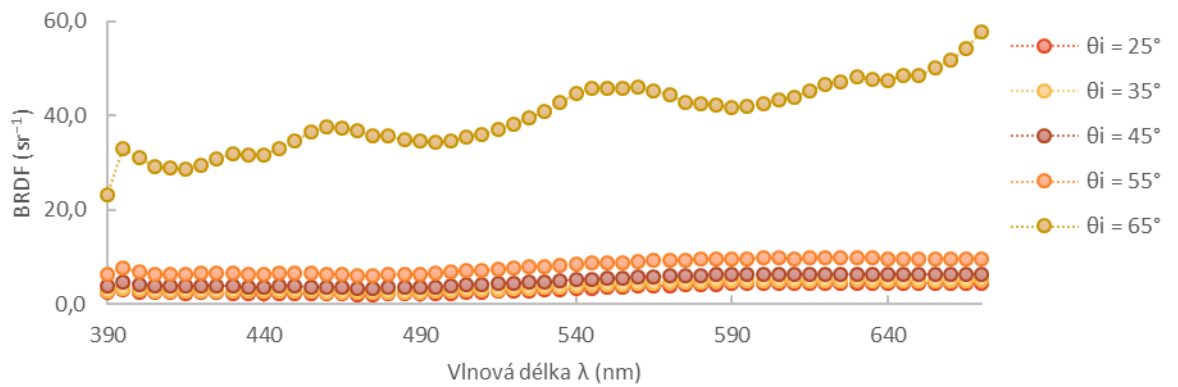


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

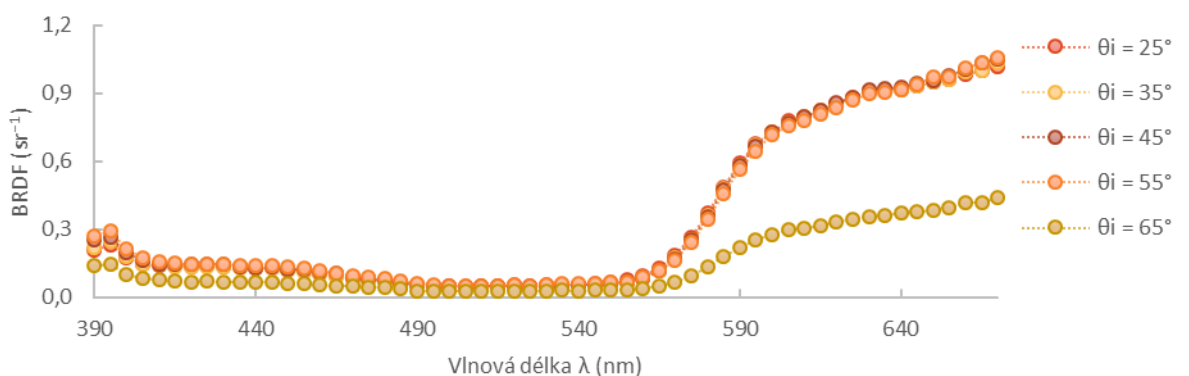
**Obrázek P. B5** Lesklý papír – Barva Warm Red



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

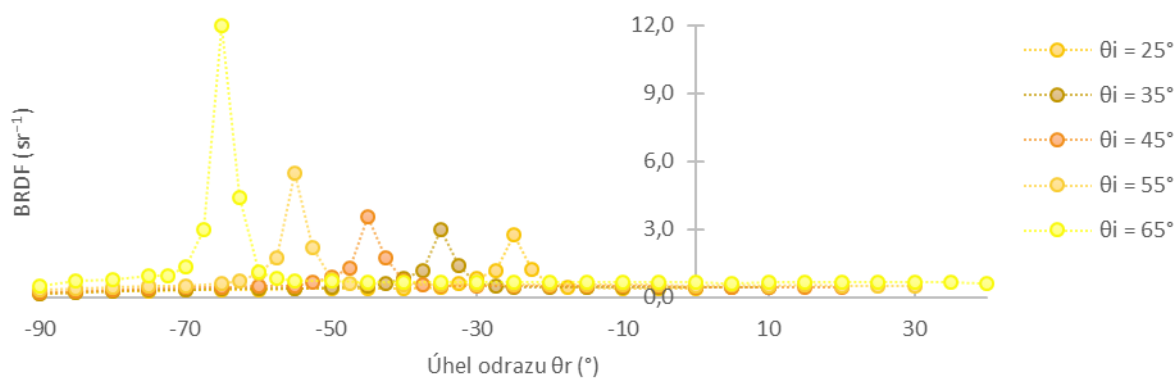


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

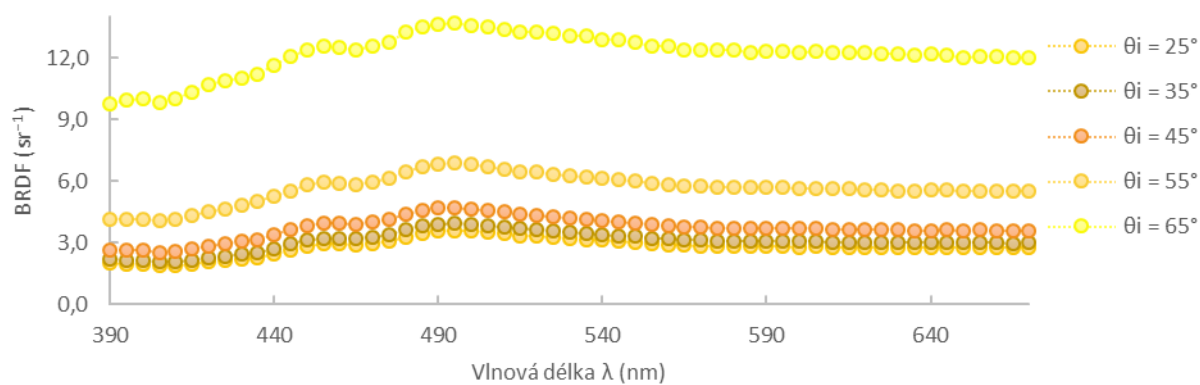


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

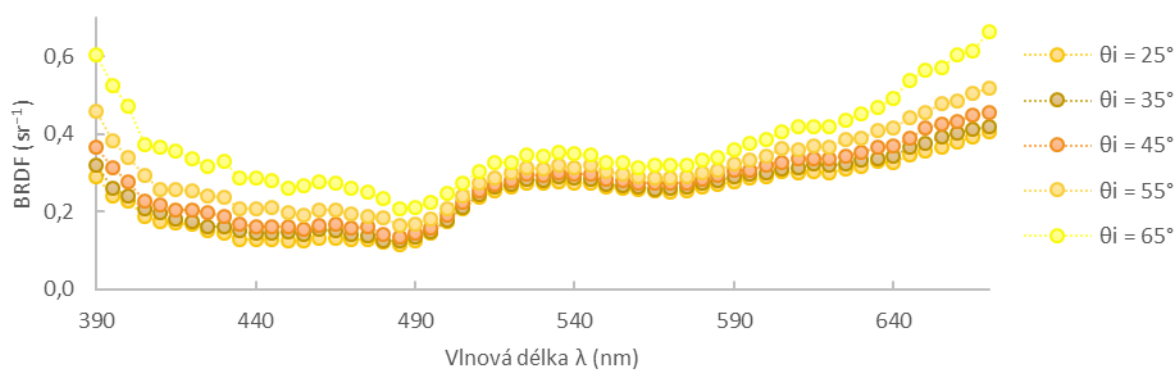
**Obrázek P. B6** Lesklý papír – Barva Yellow



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

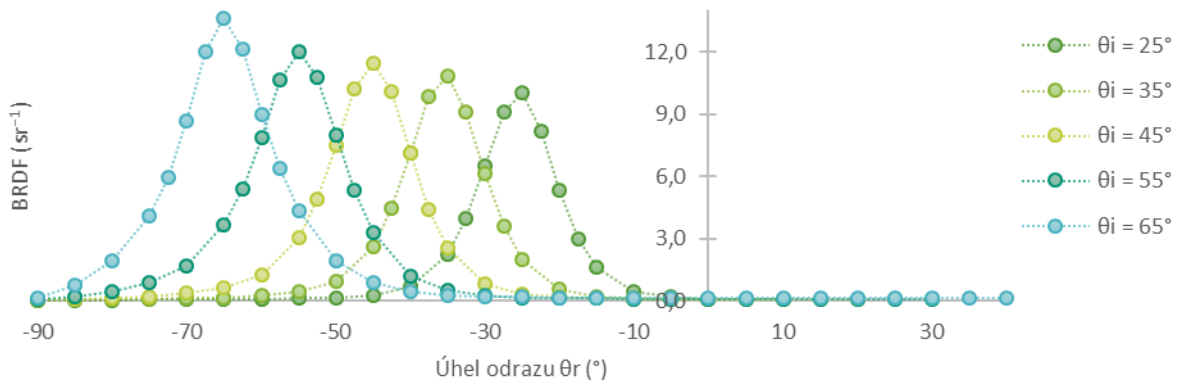


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

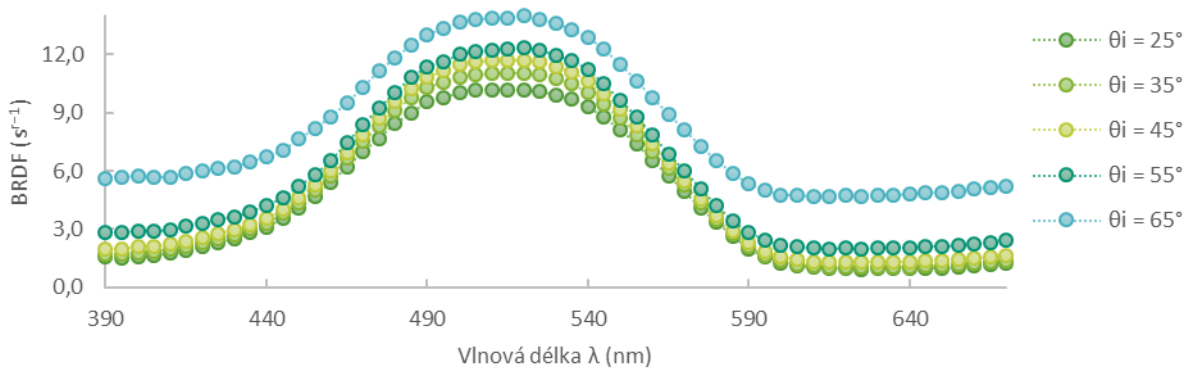


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

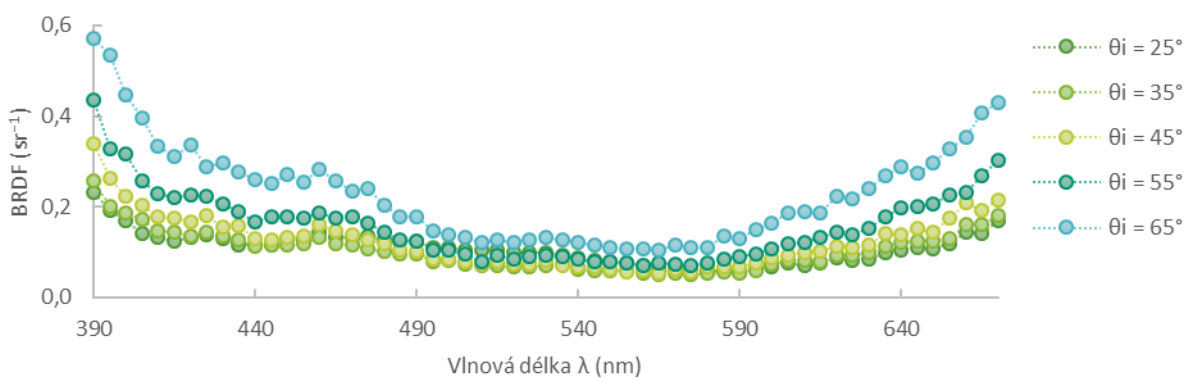
**Obrázek P. C1** Metalický papír – Barva Green



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 500 nm.*

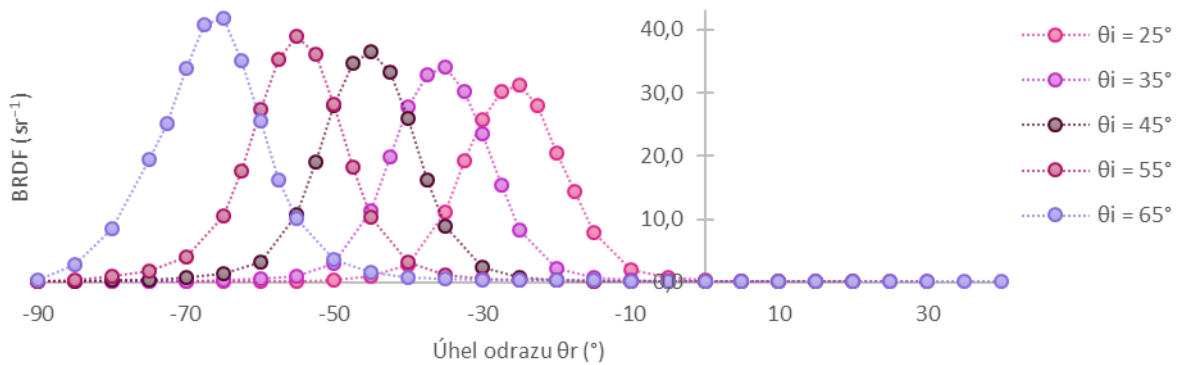


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

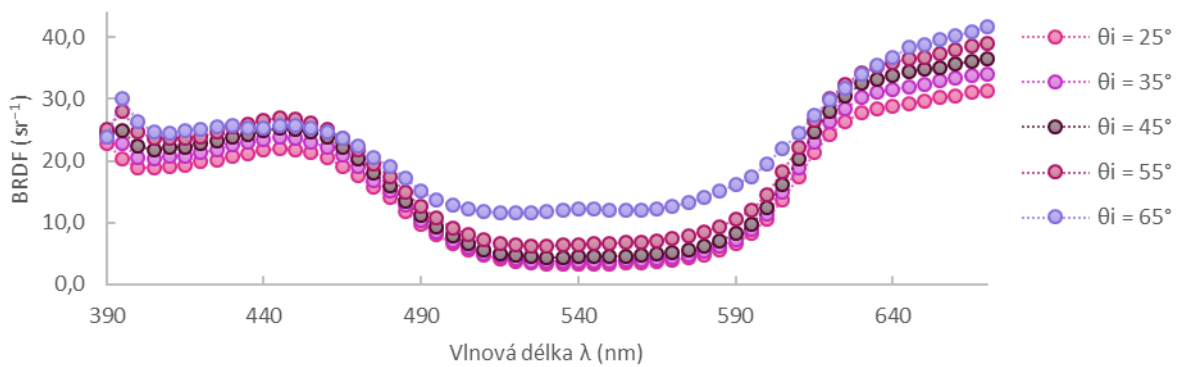


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

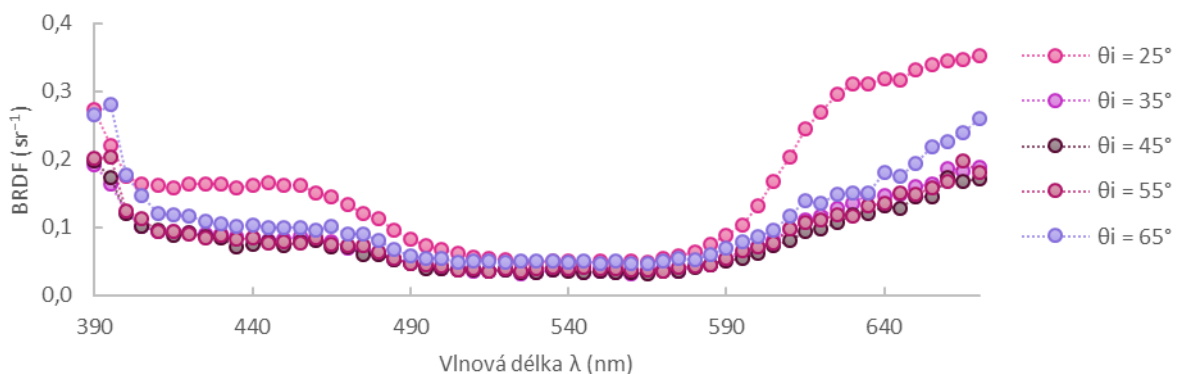
**Obrázek P. C2 Metalický papír – Barva Purple**



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

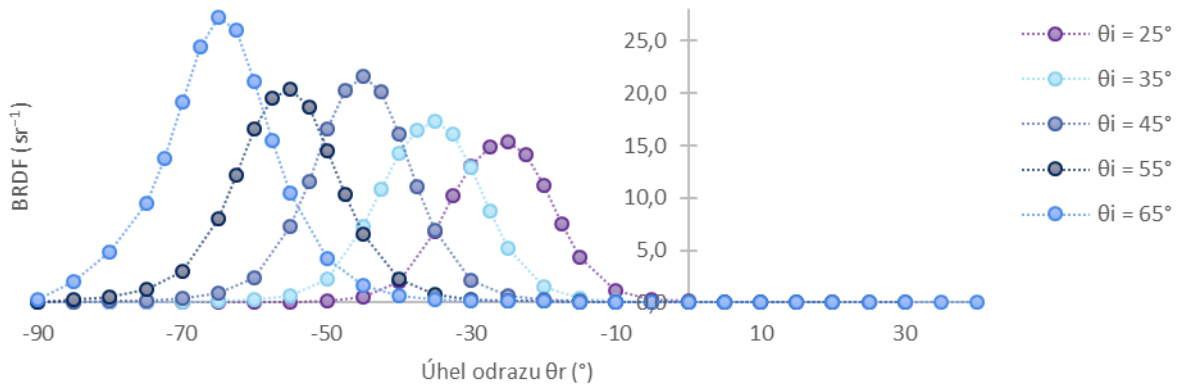


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

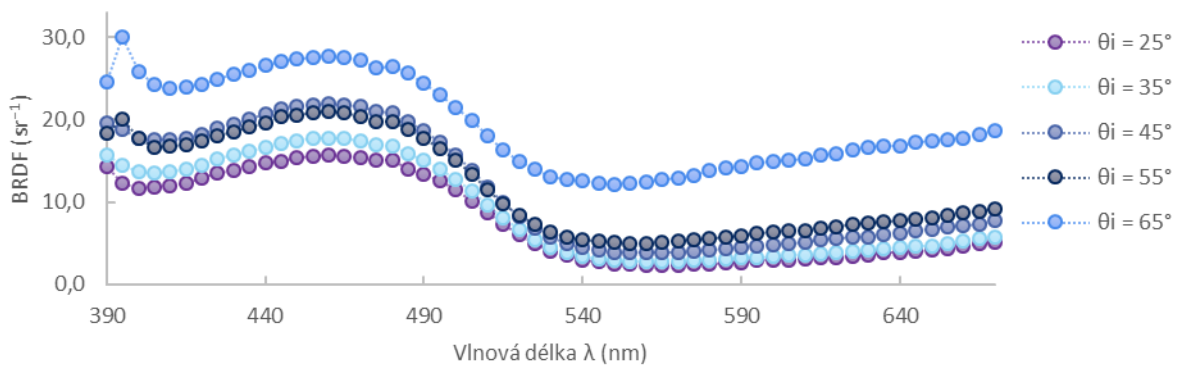


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

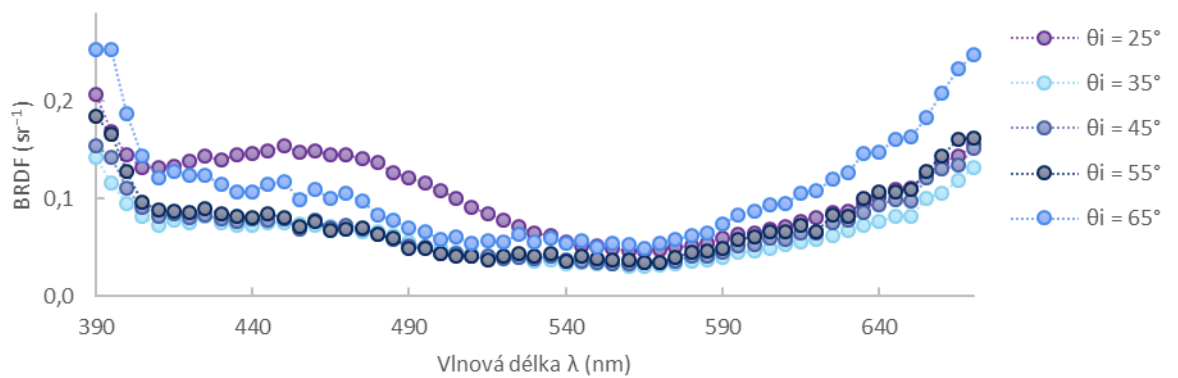
**Obrázek P. C3 Metalický papír – Barva Reflex Blue**



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 470 nm.*

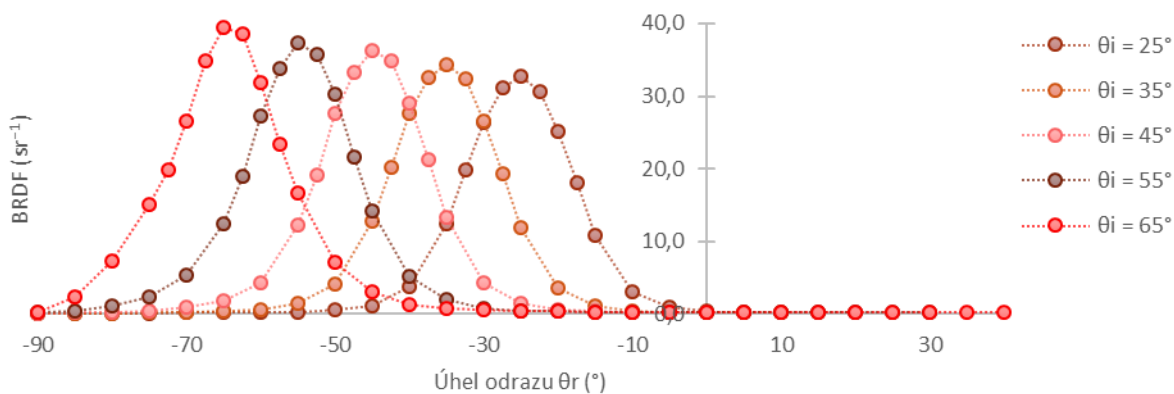


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

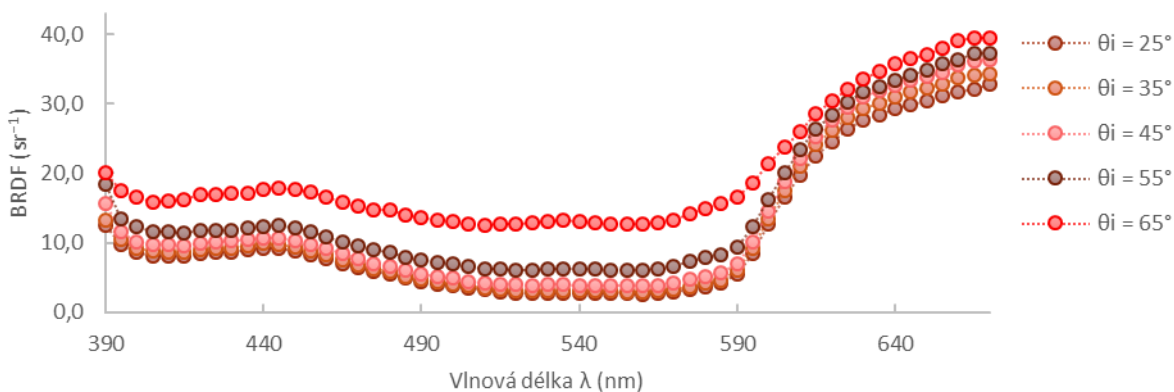


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

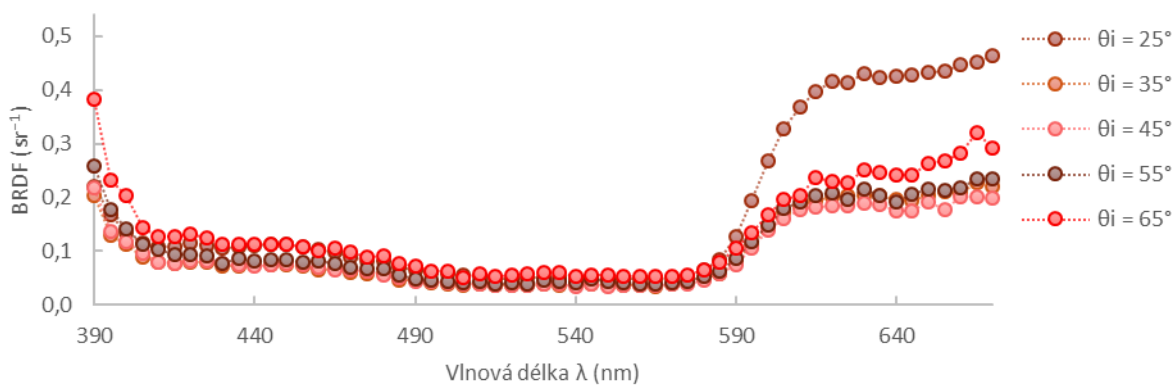
**Obrázek P. C4 Metalický papír – Barva Rubine Red**



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*

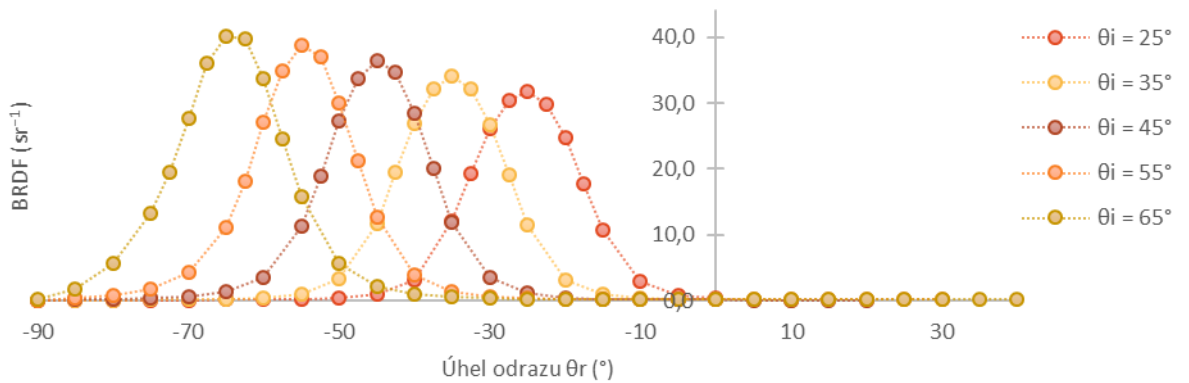


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*

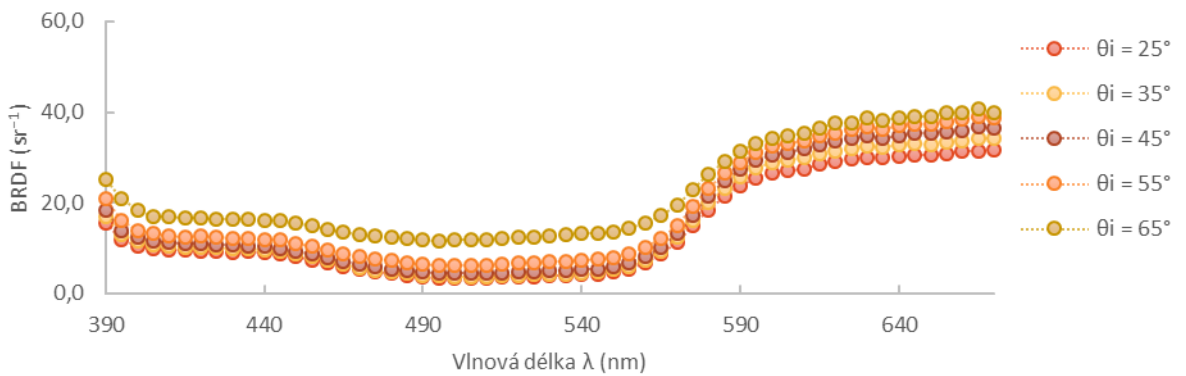


*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*

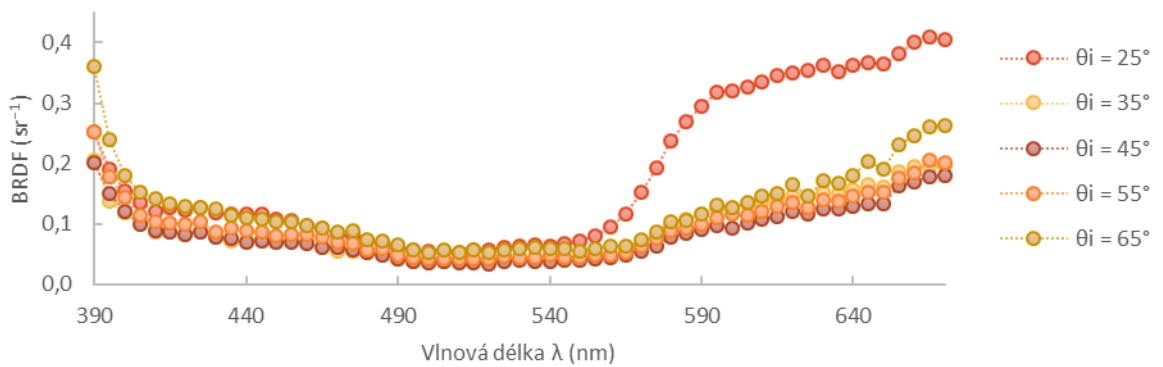
**Obrázek P. C5 Metalický papír – Barva Warm Red**



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*



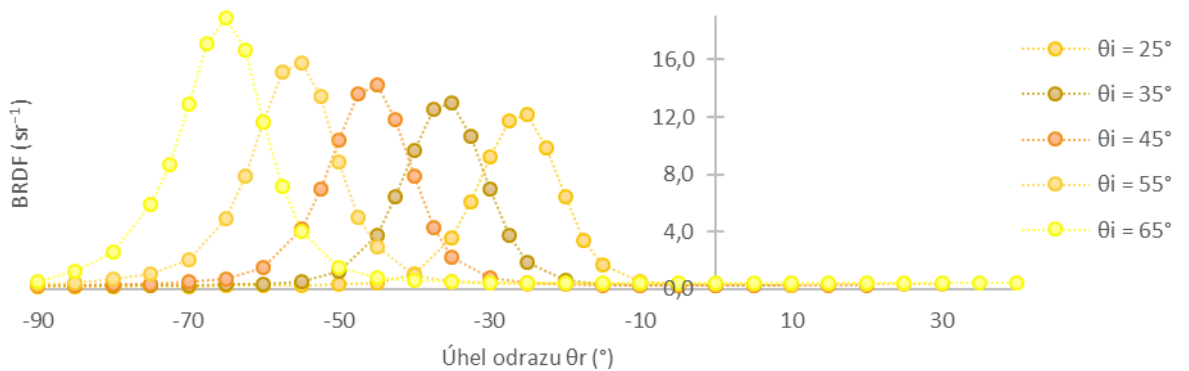
*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*



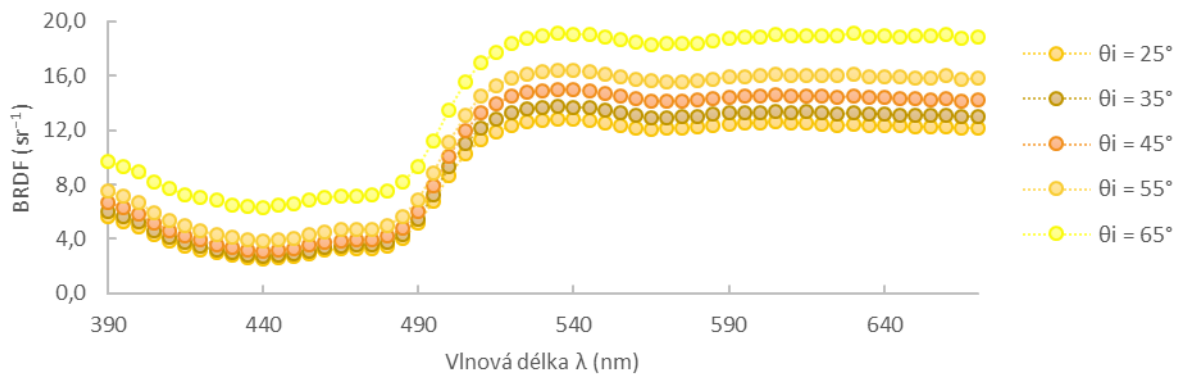
*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*



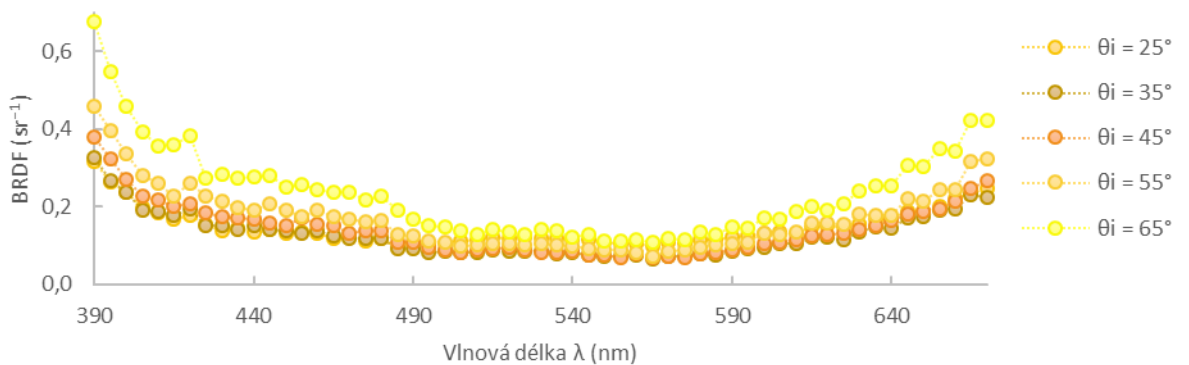
**Obrázek P. C6 Metalický papír – Barva Yellow**



*Závislost hodnot BRDF na úhlu odrazu, pro všechny měřené úhly dopadu, při vlnové délce 670 nm.*



*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při spekulárních úhlech odrazu.*



*Závislost hodnot BRDF na vlnové délce, pro všechny měřené úhly dopadu, při úhlu odrazu  $\theta_r = 0^\circ$ .*