

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 2: Fyzika

**Pasivní chladicí barvy, aneb jak ochladit nejen domy
ale i celou planetu**

Technická zpráva a podpůrné informace

**Jan Čivrný
Pardubický kraj**

Pardubice 2025

Obsah

1	úvod.....	3
2	Výpočet prostorového úhlu Slunce	3
2.1	Kód python pro výpočet prostorového úhlu.....	4
3	tepelná bilance – výpočet	4
3.1	Výpočet teoretické teploty ochlazení	4
3.2	Mathcad soubor pro výpočet tepelné bilance	5
4	Seznamy pigmentů	5
4.1	Široký seznam	5
4.2	Zúžený seznam s emisními spektry dostupnými on-line	6
4.3	Seznam vybraných pigmentů s vlastními emisními spektry	6
5	Metodologie měření	7
5.1	Seznam použitého vybavení.....	7
5.2	Příprava vzorků	9
5.3	Měřicí podmínky a prostředí	12
5.4	Získávání dat	15
5.4.1	Kód arduino.....	15
6	Analýza dat.....	15
6.1.1	Kód pro analýzu dat	15

1 ÚVOD

Tato technická zpráva slouží jako doplněk k hlavní práci a obsahuje podrobné výpočty, podpůrné informace, seznamy použitých materiálů a pigmentů, popis měřicí aparatury a dokumentační fotografie. Jejím cílem je poskytnout úplný přehled o technických aspektech experimentu zaměřeného na hodnocení optických a tepelných vlastností pigmentů s potenciálem pro pasivní chlazení povrchů.

Řazení jednotlivých témat přímo odpovídá hlavní práci, proto se může jevit chaotické.

Tento dokument poskytuje čtenáři veškeré nezbytné doplňkové informace, které umožňují lepší pochopení metodiky experimentu a usnadňují případnou replikaci měření.

2 VÝPOČET PROSTOROVÉHO ÚHLU SLUNCE

Prostorový úhel, který zabírá Slunce na obloze, je úhel mezi Zemí a Sluncem. Tento úhel, označovaný jako Ω_S , se vypočítá podle vzorce pro prostorový úhel:

$$\Omega_S = \frac{R_S^2}{R_{SZ}^2}$$

Kde:

- R_S je poloměr Slunce, který je přibližně 696 340 km
- R_{SZ} je vzdálenost mezi Zemí a Sluncem, která je přibližně 149,6 milionů km

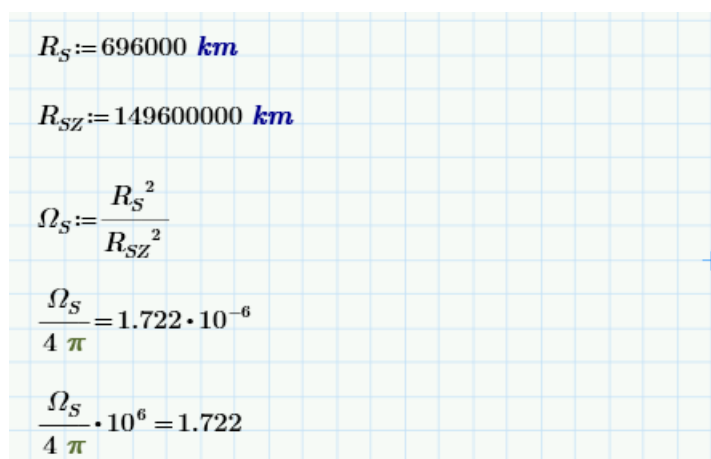
Celkový prostorový úhel kolem Země, označovaný jako Ω_T , má hodnotu 4π steradiánů, což odpovídá celé kouli. Abychom zjistili, jaký podíl celkového úhlu tvoří Slunce, použijeme vztah:

$$\frac{\Omega_S}{\Omega_T} = \frac{\Omega_S}{4\pi}$$

Tento výsledek je ve steradiánech, abychom dostali výsledek v ppm (parts per million), vynásobíme tento podíl číslem 1 milion:

$$ppm = \frac{\Omega_S}{4} 10^6$$

2.1 Mathcad soubor pro výpočet prostorového úhlu


$$R_S := 696000 \text{ km}$$
$$R_{SZ} := 149600000 \text{ km}$$
$$\Omega_S := \frac{R_S^2}{R_{SZ}^2}$$
$$\frac{\Omega_S}{4 \pi} = 1.722 \cdot 10^{-6}$$
$$\frac{\Omega_S}{4 \pi} \cdot 10^6 = 1.722$$

Obr. 1: Mathcad soubor pro výpočet prostorového úhlu

3 TEPELNÁ BILANCE – VÝPOČET

Pro posouzení možnosti pasivního chlazení povrchu barvou využíváme Planckův vyzařovací zákon. Cílem je určit, zda výkon přijatý od Slunce je menší než výkon vyzařený do vesmíru, což by znamenalo, že se povrch ochlazuje.

Tepelná bilance barvy, $P_{\text{balance barva}}$ je určena rozdílem mezi výkonem přijatým od Slunce a výkonem vyzařeným povrchem. Výpočet ukazuje, že pokud barva efektivně vyzařuje v oblasti atmosférického okna, její tepelná bilance je záporná. To znamená, že více tepla vyzařuje, než přijímá, a dochází k jejímu pasivnímu chlazení.

Výpočet byl proveden pomocí softwaru Mathcad.

Klíčová myšlenka výpočtu:

- První integrál popisuje energii přijatou od Slunce v určitém spektrálním rozsahu ($0 - \infty$, ale pro výpočet zúžený na $8 - 12,5 \mu\text{m}$).
- Druhý integrál popisuje energii, kterou povrch vyzařuje v tomto rozsahu do vesmíru.
- Pokud je rozdíl těchto dvou hodnot záporný ($P_{\text{balance}} < 0$), znamená to, že povrch více tepla vyzařuje, než přijímá, a tím se pasivně ochlazuje.

Na základě výpočtu lze teoreticky očekávat snížení teploty.

3.1 Výpočet teoretické teploty ochlazení

Teoretická teplota, které může povrch s danou barvou dosáhnout, byla vypočítána pomocí softwaru Mathcad. Výpočet probíhal numerickou metodou, při které byly do druhého integrálu iterativně dosazovány různé teploty, dokud výsledek nedosáhl nulové hodnoty. Tento stav odpovídá rovnováze mezi absorbovaným a vyzařeným zářením.

Na základě tohoto výpočtu bylo zjištěno, že teoretická minimální teplota, na kterou se může povrch ochladit, je **150 K**.

3.2 Mathcad soubor pro výpočet tepelné (výkonové) bilance ozářené plochy

$h = (6.626 \cdot 10^{-34}) \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$ $R_S := 696000 \text{ km}$
 $c = (2.998 \cdot 10^8) \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $R_{SZ} := 149600000 \text{ km}$
 $k = (1.381 \cdot 10^{-23}) \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}}$ $q := \left(\frac{R_{SZ}^2}{R_S^2} \right) = 46200.291$ $\frac{1}{q} = 2.164 \cdot 10^{-5}$
 $T_s := 5800 \text{ K}$ $T_{\text{barva}} := 300 \text{ K}$

Poměr výkonů - vyzářený/ přijatý = 98,23.

$$\frac{\int_{0.000008}^{0.0000125} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_{\text{barva}}}} - 1} d\lambda}{\frac{1}{q} \int_{0.000008}^{0.0000125} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_s}} - 1} d\lambda} = 98.23$$

Bilance výkonu na plochu: přijatý mínus vyzářený výkon z 1 m² plochy = -133,4.

$$\frac{1}{q} \int_{0.000008}^{0.0000125} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_s}} - 1} d\lambda - \int_{0.000008}^{0.0000125} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_{\text{barva}}}} - 1} d\lambda = -133.378 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Hustota zářivého toku na 1m² plochy

$$\int_{0.000008}^{0.0000125} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_s}} - 1} d\lambda = (6.338 \cdot 10^4) \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Intezita vyzařování z 1m² plochy

$$\int_{0.000008}^{0.0000125} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_{\text{barva}}}} - 1} d\lambda = 134.75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$\frac{1}{q} \int_{0.000008}^{0.0000125} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_s}} - 1} d\lambda = 1.372 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Obr. 2 Výpočet tepelné bilance v aplikaci Mathcad (autor)

4 SEZNAMY PIGMENTŮ

4.1 Široký seznam

Tento seznam byl vytvořen pouze na základě optických vlastností pozorovatelných ve viditelném spektru. Jedná se o seznam běžně užívaných bílých barev, který není vyčerpávající.

Olovnatá běloba – jedovatá, vysoká kryvost, pojená lněným olejem ve tmě žloutne

Síranová běloba – pravděpodobně síran vápenatý - sádra

Pattinsonova běloba – nerozpustný chlorid olovnatý

Ostatní běloba na bázi olova – nic jsem nenašel

Křída – uhličitán vápenatý – nízká kryvost, stálá ke světlu

Horská křída je naředlá nebo nažloutlá - podle povahy znečišťujících příměsí

barvivo E 170 – CaCO₃

blancophon - BaSO₄·CaCO₃

Alabastr (úběl) – CaSO₄·2H₂O – sádrovec, Barva: bezbarvý, podle příměsí bílá, šedá, žlutá

Boloňská křída – CaCO₃ – z Itálie – pojivo kassein

Lipothone – směs BaSO₄ a ZnS

Síran strontnatý – bílá, bez zápachu, velmi špatně rozpustná, využití v pyrotechnice

Zinková běloba – ZnO – netoxický bílý pigment

Titanová běloba – TiO₂ – běžně používaná běloba – opalovací krémy

4.2 Zúžený seznam s emisními spektry dostupnými on-line

Tento seznam zahrnuje vybrané pigmenty, ke kterým se nám podařilo z on-line zdrojů najít emisní spektra.

CaCO₃ - <https://rruff.info/aragonite/display=default/R040078>

BaSO₄ - <https://rruff.info/chem=Ba/display=default/R050335>

SrSO₄ - <https://rruff.info/chem=Sr/display=default/R040007>

MgCO₃ - <https://rruff.info/chem=Mg/display=default/R040114>

ZrO₂ - <https://rruff.info/chem=Zr/display=default/R060016>

ZrSiO₄ - <https://rruff.info/chem=Zr/display=default/R050034>

CaWO₄ - <https://rruff.info/chem=Ca,%20W,%20O/display=default/R040172>

SrCO₃ - <https://rruff.info/chem=Sr/display=default/R040037>

ZnO - <https://rruff.info/chem=Zn,%20O/display=default/R060027>

TiO₂ - <https://rruff.info/chem=Ti,%20O/display=default/R120013>

4.3 Seznam vybraných pigmentů s vlastními emisními spektry

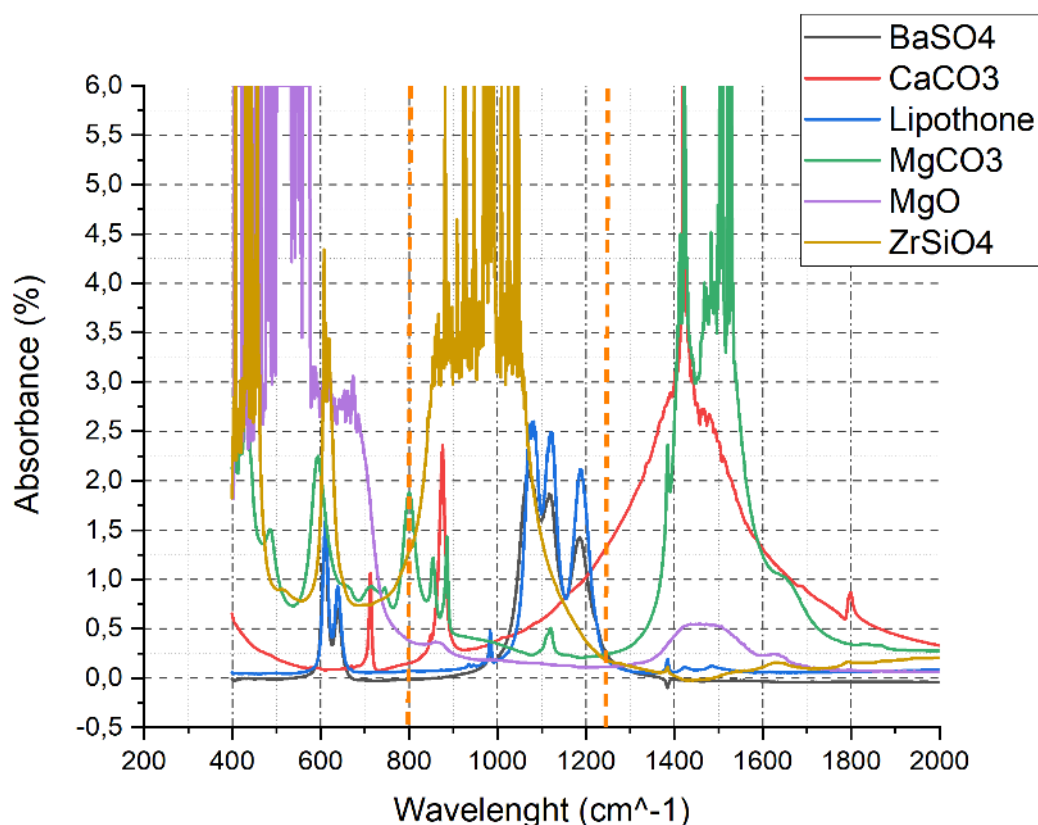
Díky znalosti vybraných spekter byly vytipovány pigmenty, u nichž došlo k ověření online grafů (viz 4.2). Jednotlivé pigmenty jsme rozpustili v KBr tabletách a standartním způsobem jsme změřili data na spektrofotometru. Data byla poté zpracována v počítačovém programu Origin. Seznam není vyčerpávající.

BaSO₄

CaCO₃

Lipothone

MgCO₃



Graf G 1: Ukazuje závislost absorpce (Absorbance) na vlnové délce (Wavelength). Ilustračně je vyznačeno atmosférické okno přerušovanými oranžovými čarami 800 – 125 cm⁻¹. (Graf včetně měření dat autor)

5 METODOLOGIE MĚŘENÍ

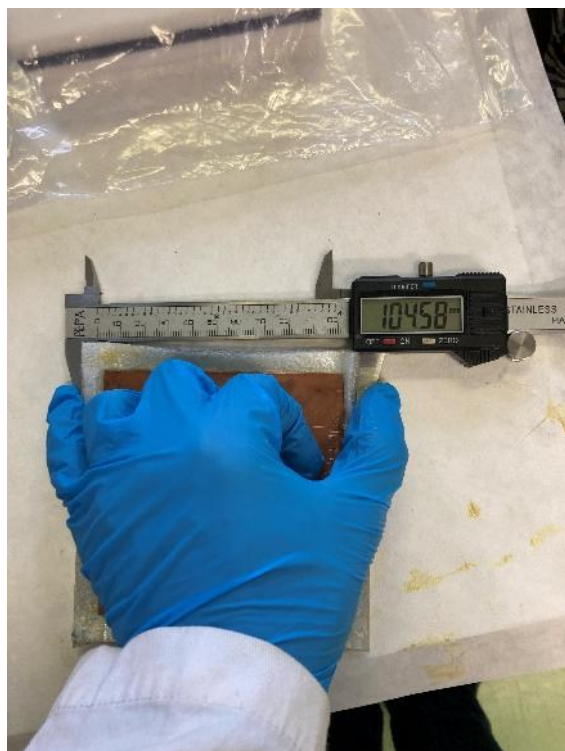
Pro zajištění měření byla sestavena měřicí aparatura skládající se z měděných destiček, na které byly aplikovány vzorky pigmentů s pojivem – chladicí barva. Každá destička je připojena k termočlátku, který je dále propojen se zesilovačem. Termočlánky jsou kalibrované výrobcem. Zesilovač umožňuje přesné měření napětí na termočlátku pomocí jednodeskového mikropočítače Arduino.

Získaná data jsou zaznamenávána každých 30 sekund, přičemž systém ukládá hodnoty napětí jednotlivých termočládků spolu s časovým údajem. Tento postup umožňuje kontinuální sledování teplotních změn vzorků v reálných podmínkách.

5.1 Seznam použitého vybavení

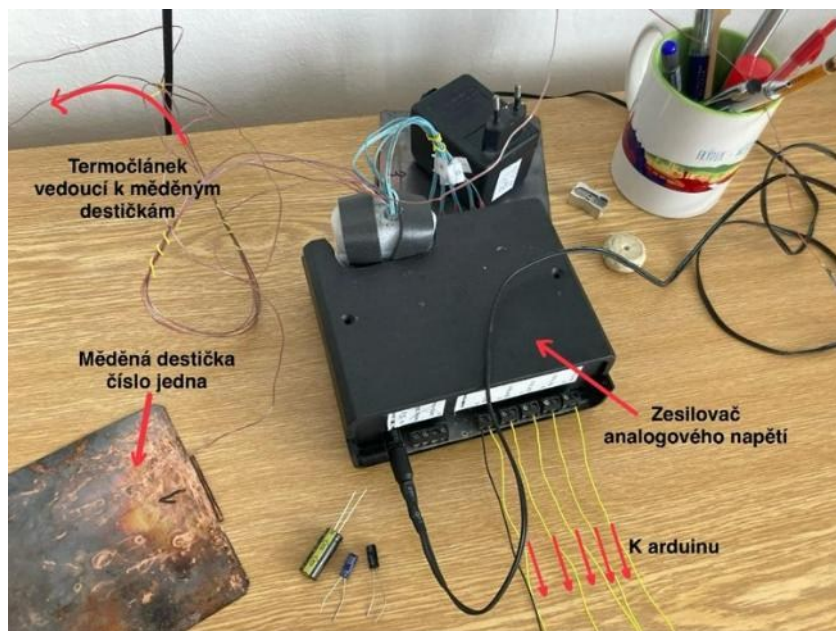
- Měděné destičky 10x10 cm (5 ks)
- Termočlánky typu T společnosti Omega
- Multikanálový zesilovač napětí (5 kanálů, 1 ks)
- Arduino Uno (1 ks)
- Modul pro SD kartu pro Arduino Uno (1 ks)

Měděné destičky byly před aplikací barvy očištěny a zabaleny do dvouvrstvého izolačního obalu tvořeného izolační folií a umístěny do plastových ochranných krabiček.



Obr. 3 Obrázek ukazuje měření měděné destičky, pod destičkou je vidět izolační folie.

(foto autor)



Obr. 4 Obrázek ukazuje zesilovač napětí a měděnou destičku číslo 1. Šipkami je naznačeno, kde jsou ostatní měděné destičky a kde je připojeno arduino

(foto autor)

5.2 Příprava vzorků

Vzorky byly nejprve naváženy tak, aby měly objem 1,5 cm³. Následně byly homogenizovány ve směsi 3 ml Lukosil M130 a 3 ml xylenu. Na závěr byly homogenizovány.



Obr. 5 Obrázek ukazuje hmotnost vzorku BaSO₄ na přesné váze. Vpravo je vidět laboratorní deník

(foto autor)



Obr. 6 Obrázek ukazuje nehomogenizovanou směs ZrSiO₄ a Lukosilu M130 a xylenu. Vzadu je plechovka Lukosilu M130 a vpravo je vzorek označen číslem 2 - suchý vzorek před přidáním Lukosilu M130 a xylenu

(foto autor)



Obr. 7 Obrázek ukazuje měřicí destičku, která vysychá. Je uložena ve vodorovné poloze a umístěna do ochranné krabičky. Vzorek je popsán a umístěn poblíž.

(foto autor)



Obr. 8 Obrázek ukazuje jednotlivé vzorky před homogenizací, umístěny jsou ve skleněné nádobě, aby nedocházelo k odpařování xylenu - čekáme na zbylé vzorky pro homogenizaci.

(foto autor)



Obr. 9 Obrázek ukazuje povrch měřené destičky v ochranné krabičce před zavedením termočlánku - detail.

(foto autor)



Obr. 10 Obrázek ukazuje ochranné krabičky, měřicí destičky s barvami a popis jednotlivých vzorků (pigmentů)

(foto autor)

5.3 Měřicí podmínky a prostředí

Pro měření byl vyhotoven držák, aby se mohlo měřit venku. Na fotografiích je vyobrazen předběžný test na kartonovém měřáku „pod sklem“ a uložení venkovního držáku pro samotné měření „za oknem.“



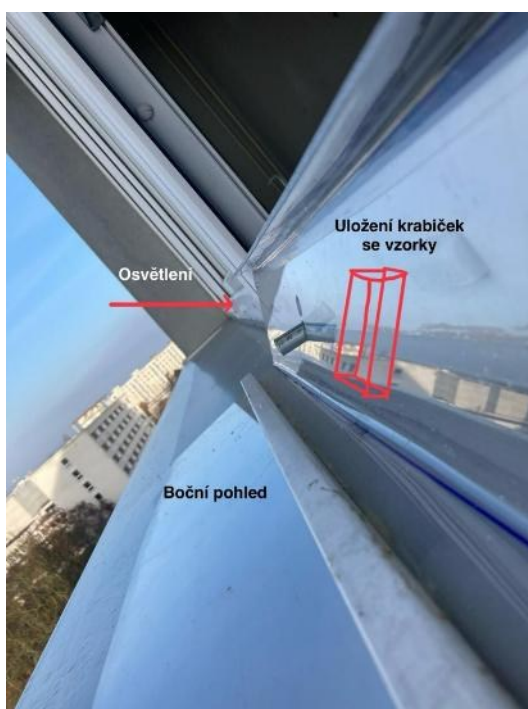
Obr. 11 Obrázek ukazuje venkovní držák na měřicí destičky opatřené termočlánky

(foto autor)



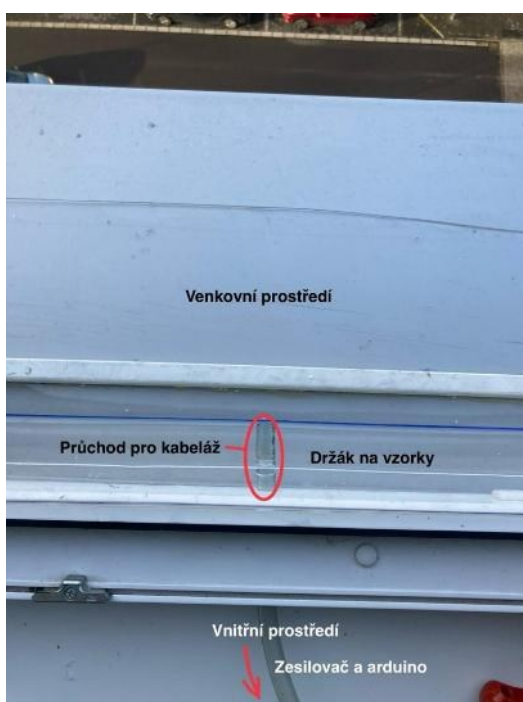
Obr. 12 Obrázek ukazuje boční pohled na držák. V bočním pohledu je nejlépe vidět sklonění držáku, abychom dosáhli optimálního osvětlení - kolmo ke Slunci.

(foto autor)



Obr. 13 Obrázek ukazuje umístění držáku za oknem. Naznačeno je umístění vzorků a osvětlení.

(foto autor)



Obr. 14 Obrázek ukazuje umístění průchodky pro vedení kabeláže z vnějšího prostředí do vnitřního. Vzorky musí být vystaveny Slunci bez obstrukcí. Zesilovač a arduino musí být připojeny ke zdroji energie a navíc chráněny před nepřízní počasí. Řešením je propojení venkovní a vnitřní části kabeláží.

(foto autor)



Obr. 15 Obrázek ukazuje umístění držáku pro samotné měření v přirozených podmínkách "za oknem"

(foto autor)



Obr. 16 Obrázek ukazuje jednotlivé součástky měřicí aparatury: termočlánky, stojánek, arduino, kabely (šipkou) a zesilovač při testu "pod sklem." Test „pod sklem“ byl proveden pouze pro posouzení měřicí aparatury, nikoliv vzorků. Veškerá data uváděná v hlavní zprávě jsou z měření „za oknem“ (Obr. 15)

(foto autor)

5.4 Získávání dat

Data byla získávána pomocí mikropočítače Arduino.

5.4.1 Kód arduino



soc-barva-mereni-kod-1_5.ino

(Objekt vložený ve Wordu)

6 ANALÝZA DAT

Data byla analyzována pomocí programovacího jazyka Python

6.1.1 Kód pro analýzu dat



Atomat.ipynb

(Objekt vložený ve Wordu)