

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 2: Fyzika

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

**Jan Čivrný
Pardubický kraj**

Pardubice 2025

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 2: Fyzika

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

**Passive cooling paints, the way to cool not only
houses but also the planet**

Autoři: Jan Čivrný

Škola: Gymnázium, Pardubice, Dašická 1083, Dašická 1083, 530 03
Pardubice

Kraj: Pardubický kraj

Konzultant: prof. Ing. Dr. Čestmír Drašar

Pardubice 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Pardubicích dne 25.03. 2025

Jan Čivrný

Poděkování

Především bych chtěl poděkovat mému konzultantovi **prof. Ing. Dr. Čestmíru Drašarovi** z FChT UPa. za jeho čas, trpělivost, sdílení zkušeností, obětavou pomoc a odborné konzultace. Nejvíce si však vážím našeho přátelství.

Děkuji **prof. Ing. Petře Šulcové Ph.D.** z FChT UPa za pohotové poskytnutí některých bílých pigmentů, které nám scházely.

Děkuji **Lučebním závodům Kolín, a.s.** za bezplatné poskytnutí siloxanového laku Lukosil M130.

Děkuji také všem ostatním, kteří mi pomohli a pomáhají.

Anotace

Klimatická změna představuje hrozbu pro život na Zemi tak, jak ho známe. Skleníkové plyny dusí naši atmosféru, planeta se ohřívá a dopady začínáme pociťovat na vlastní kůži. Pokud se nepodaří najít řešení, hrozí nám bouře, záplavy, požáry a s tím spojené následky. Nabízená řešení ve formě omezení emisí a přechodu k udržitelnému životnímu stylu se setkávají s odporem veřejnosti. V této práci hledáme řešení, které by mělo být přijatelné pro každého, a to formou nátěrové barvy s efektem pasivního chlazení. Barva funguje na principu tepelné bilance, kdy sama vyzáří více energie, než přijme a je tedy schopna se ochlazovat pod úroveň teploty okolního vzduchu, a tím atmosféru ochlazovat. V práci se nám podařilo nejen prokázat, že pasivní chlazení je teoreticky možné, ale i prakticky dosažitelné. Naše práce ukazuje, že další studium těchto barev může přinést významná zlepšení.

Klíčová slova

Pasivní radiální chlazení, atmosférické okno, infračervená emisivita, sluneční odrazivost, změna klimatu

Annotation

Climate change is threatening life on Earth as we know it. Greenhouse gases are choking the atmosphere, the planet is warming up and we are beginning to feel the consequences. Without solutions, we face the threat of storms, floods, fires and all the consequences that come with them. The solutions offered in the form of reducing emissions and moving towards sustainability have been met with public resistance. In this work we seek a solution that should be acceptable to everyone in the form of a paint with the passive cooling effect. The paint works on the principle of thermal equilibrium, where it itself radiates more energy than it receives and is therefore able to cool itself below the ambient air temperature. In this work we demonstrated that the passive cooling is not only theoretically possible but also practically achievable. Our work shows that further research is desired.

Keywords

Passive radiative cooling, atmospheric window, infrared emissivity, solar reflectivity, climate change

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Úvod do problému	6
2.1	Hledání řešení	7
3	Předpoklady	7
3.1	Tepelná bilance Země	7
3.2	Planckův vyzařovací zákon	8
3.3	Stefanův-Boltzmannův zákon.....	8
3.4	Nastínění řešení.....	9
3.5	Geometrické úpravy a ředění intenzity záření	9
3.6	Atmosférické okno.....	15
3.7	Výpočet tepelné bilance.....	16
4	Experiment.....	18
4.1	Výběr pigmentů	19
4.2	Popis experimentu.....	19
4.3	Měřicí aparatura	20
4.4	Příprava vzorků.....	20
4.5	Vyhodnocování dat	21
5	Výsledky	22
5.1	Zpracování a interpretace naměřených dat	22
5.2	Hledání barvy na ochranu staveb.....	27
5.3	Omezení experimentu a možné chyby.....	28
6	Závěr a diskuse	29
6.1	Shrnutí dosažených výsledků.....	29
6.2	Výhled do budoucna – diskuse	29
7	Reference	33
8	Seznam obrázků, grafů a rovnic	33
8.1	Seznam obrázků.....	33
8.2	Seznam grafů	34
8.3	Seznam rovnic.....	34
9	Přílohy.....	35

1 Úvod

Cílem této práce je ověřit, zda-li je možné vytvořit barvu s efektem pasivního chlazení. Jev pasivního chlazení je možný díky kombinaci vysoké odrazivosti slunečního záření a výrazné emisivity infračerveného záření v tzv. atmosférickém okně. Výsledkem je, že povrch efektivně vyzařuje teplo do chladného vesmíru (Pozn.¹) a současně minimalizuje absorpci tepla ze slunečních paprsků.

Doporučený přístup k [Motivaci](#) a [Technické zprávě a podpůrným informacím](#). Pro lepší pochopení informací doporučujeme čtenáři, aby měl při čtení otevřenou technickou zprávu, na kterou se v průběhu práce odkazujeme. Tento proces chápeme jako čtení knihy s poznámkovým blokem v ruce, kde jednotlivé kapitoly práce jsou doplněny vysvětlivkami a podpůrnými informacemi. Zatímco motivační text nemusí být pro každého čtenáře nezbytný – motivace vychází především z vnitřního zájmu každého z nás. Pro mě je motivace natolik důležitá, že jsem vypracoval samostatný dokument, který je volně k dispozici všem zájemcům.

Tuto práci jsem vypracoval samostatně pod odborným dohledem konzultanta. Veškeré postupy, včetně vytváření grafů, psaní kódu v Pythonu a Arduinu, míchání barev, práce se softwarem Origin, zpracování spektrofotometrických dat, výpočtů integrálů v aplikaci Mathcad a tvorby obrázků, byly provedeny mnou. Za případné chyby, nesrovnalosti či nedostatky v práci nesu plnou odpovědnost.

2 ÚVOD DO PROBLÉMU

Globální oteplování (dále jen GO) je široce diskutovaným problémem současnosti, který představuje zásadní hrozbu pro naši planetu. Tento jev je definován jako dlouhodobý nárůst průměrných teplot především v atmosféře a oceánech. Domníváme se, že jedním z důvodů je lidmi způsobené zvýšení koncentrace tzv. skleníkových plynů v atmosféře. Skleníkový efekt je jev, při kterém plyny jako oxid uhličitý, metan apod. zachycují a částečně vyzařují (odrážejí) zpět teplo vyzařované Zemí. Brání tedy jeho úniku (vyzáření) do vesmíru, a tedy ochlazování Země. Na základě zákona zachování energie lze tepelnou bilanci Země vyjádřit základní rovnicí (Pozn.²):

$$P_s(\lambda) = P_z(\lambda) \quad (1)$$

Kde:

- P_s je výkon získávaný Zemí ze Slunce
- P_z je výkon vyzařený Zemí do vesmíru
- λ označuje že obě veličiny jsou funkcí vlnových délek, ve kterých k transportu tepla dochází. Dále uvidíme, že je to velmi důležitý parametr.

¹ Pozn. Na rozdíl od běžného záření, které se odráží od skleníkových plynů.

² Pozn. Země nezískává jen energii od Slunce. Vliv radioaktivních rozpadů v jádře má, v porovnání se Sluncem, drobný vliv na povrchovou teplotu a proto ho můžeme v naší rovnici zanedbávat. V kontextu GO je také zanedbatelný.

K této rovnici se později vrátíme a podíváme se, jaké řešení GO nám nabízí. Je důležité připustit, že GO nemusí být výhradně způsobeno lidskou činností, ale bez ohledu na jeho původ je nutné jej zastavit nebo alespoň omezit (zpomalit). Níže navrhujeme jedno z možných řešení. Nejprve si ale prosím projděte shrnutí závažných problémů plynoucích z rychlého oteplování planety, které slouží jako motivace a naleznete je v příloženém souboru [Motivace](#).

2.1 Hledání řešení

Hledání řešení pro GO se setkává s neochotou obyvatelstva. Ačkoliv si mnoho lidí, ať už přímo, či nepřímo uvědomuje hrozbu, kterou GO představuje, je těžké je přesvědčit ke změně vlastního chování. Současné návrhy na řešení, jako je zákaz spalovacích motorů nebo drastické omezení emisí naráží na odpor veřejnosti. Příliš velký počet lidí nechce měnit svůj životní styl nebo se vzdát pohodlí, na které jsou zvyklí. Tato neochota je pochopitelná, ale zároveň nám brání v dosažení potřebných změn. Řešení, které předkládáme je jen malou troškou do příslovečného mlýna. Jeho výhodou však je, že nekoliduje se způsobem života současné společnosti, a může být okamžitě zavedeno.

Než se na samotné technické řešení podíváme, uvedeme si jeho teoretické základy.

3 PŘEDPOKLADY

3.1 Tepelná bilance Země

Výše jsme si uvedli rovnici tepelné bilance Země, aniž bychom se jí věnovali. Nyní se na ní podrobně podíváme.

$$P_s(\lambda) = P_z(\lambda) \quad (2)$$

Kde:

- P_s je výkon získávaný Zemí ze Sluce (W)
- P_z je výkon vyzařený Zemí do vesmíru (W)
- λ naznačuje závislost vyzařovaného výkonu na konkrétní vlnové délce vln (λ), která se v různých oblastech spektra liší a označujeme ji proto tímto písmenem. Hraje v našem řešení ústřední roli.

Z této rovnice dále vycházíme a upravujeme ji. Vycházíme z Planckova vyzařovacího zákona a z něj odvozeného Stefan-Boltzmannova zákona. Tyto zákony jsou pro absolutně černé těleso – ideální objekt, proto se může zdát, že získaná bilance není reálná. Tento problém také vyřešíme a uvedeme si rovnici bilance více odpovídající skutečnosti.

3.2 Planckův vyzařovací zákon

Tento zákon popisuje spektrální hustotu intenzity vyzařování absolutně černého tělesa v závislosti na jeho teplotě a vlnové délce. Tento zákon byl formulován Maxem Planckem na přelomu devatenáctého a dvacátého století a v podstatě vyjadřuje, že intenzita záření roste s vlnovou délkou exponenciálně pro krátké vlnové délky, zatímco pro dlouhé vlnové délky klesá s jejich pátou mocninou.

Matematicky je Planckův vyzařovací (PV) zákon vyjádřen vztahem:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (3)$$

Kde:

- $M(\lambda, T)$ je spektrální hustota intenzity vyzařování (výkon vyzářený černým tělesem z jednotkové plochy na jednotkový interval vlnových délek) [Wm^{-3}]
- $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js je Planckova konstanta
- $c = 3 \cdot 10^8$ ms^{-1} je (přibližná) rychlost světla
- $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ JK^{-1} je Boltzmannova konstanta
- λ je vlnová délka určité vlny spektra [m]
- T je termodynamická teplota [K]

3.3 Stefanův-Boltzmannův zákon

Tento zákon (dále jen S-B zákon) je vlastně integrální formou Planckova vyzařovacího zákona. Určuje závislost celkové intenzity záření vyzařovaného absolutně černým tělesem na teplotě. Tento zákon také platí pro “šedá tělesa”, jen je třeba zavést průměrnou emisivitu – ε , která vyjadřuje schopnost tělesa vyzařovat energii. Tato emisivita je vždy menší než jedna, z čehož vyplývá, že tělesa se obecně zbavují tepla zářením méně ochotně (účinně) než teoretické absolutně černé těleso. Matematicky lze tento zákon vyjádřit takto:

$$I = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

Kde:

- I je celková intenzita vyzařování [Wm^{-2}] (výkon vyzářený tělesem z jednotkové plochy)
- ε je průměrná emisivita povrchu tělesa (bezrozměrná veličina, může nabývat hodnot 0 až 1)
- σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, která má hodnotu přibližně $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
- T je termodynamická teplota [K]

3.4 Nastínění řešení

Nyní se můžeme vrhnout do nastínění našeho řešení, jedná se o myšlenkový postup, nikoliv dokonale přesné vyjádření skutečnosti.

Jak již bylo naznačeno výše, takovéto použití S-B zákona není pro nás dostačující, protože emisivita, která je v něm zahrnuta, je průměrná emisivita povrchu přes všechny vlnové délky, teoreticky od 0 do nekonečna. Proto v bilanci soustavy Slunce – Země budeme muset vycházet z Planckova vyzařovacího zákona. Právě spektrální závislost emisivity je klíčovým parametrem našeho návrhu. Nejprve však musíme posoudit geometrii této soustavy, a to bude kvůli přehlednosti lépe provést se S-B zákonem. Abychom se nezapomněli vrátit k PV zákonu vložíme do vztahu symbol připomínající závislost na vlnové délce (λ).

Naše výchozí bilance soustavy Slunce-Země zněla

$$P_s(\lambda) = P_z(\lambda) \quad (5)$$

Tento vztah však neodkrývá geometrii problému. Vztah musíme rozepsat:

$$P(\lambda) = I(\lambda)S \quad (6)$$

Kde:

- P je výkon [W]
- I je intenzita záření [Wm^{-2}]
- S je efektivní plocha tělesa, na které záření dopadá, nebo je z něj vyzařováno [m^2]

Nyní můžeme rozepsat rovnici tepelné bilance Země:

$$I_s(\lambda)A = I_z(\lambda)S_z \quad (7)$$

Kde:

- I_s je intenzita záření dopadající na Zemi ze Slunce [Wm^{-2}]
- A je efektivní průřez Země, který je osvětlen Sluncem viz [obrázek 2](#) ($= \pi R_z^2$)
- I_z je intenzita záření vyzářeného Zemí [Wm^{-2}]
- S_z je plocha Země, ze které Země září do vesmíru viz [obrázek 3](#) ($= 4\pi R_z^2$) (Pozn.³)

Dosaďme nyní za intenzitu záření ze S-B zákona:

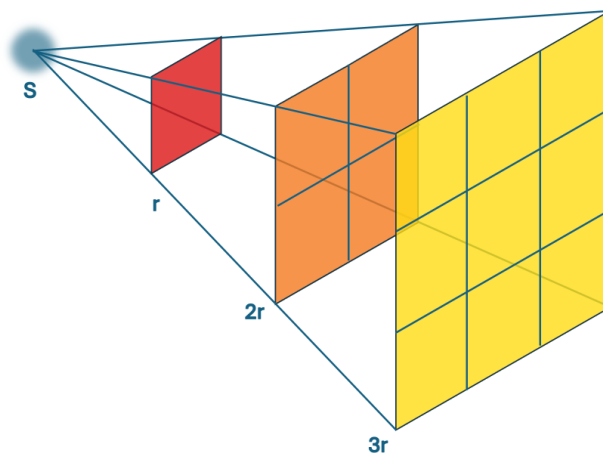
$$\varepsilon(\lambda)\sigma T_s^4 A = \varepsilon(\lambda)\sigma T_z^4 S_z \quad (8)$$

3.5 Geometrické úpravy a ředění intenzity záření

Z hlediska geometrie soustavy musíme použít správné efektivní plochy S_s a S_z . Intenzita záření Slunce se směrem k Zemi „ředí“. Děje se tak podle zákona převrácených čtverců. Celkový

³ Pozn. R_z je poloměr Země

vyzářený výkon přes uzavřenou plochu Slunce zůstává konstantní (zachování energie – Gaussova věta), ale intenzita, tedy výkon záření na jednotkovou plochu (Wm^{-2}) klesá s druhou mocninou vzdálenosti. To je způsobeno růstem povrchu pomyslné koule, jejíž poloměr odpovídá vzdálenosti Slunce-Země (Obrázek 1).



Obr. 1 Zobrazení zákona převrácených čtverců na příkladu šíření světla ze světelného zdroje (obrázek autor)

Matematicky vyjádřený zákon převrácených čtverců:

$$\frac{I_S}{I_Z} = \frac{R_{SZ}^2}{R_S^2} = \alpha \quad (9)$$

Kde:

- I_S je intenzita záření na povrchu Slunce [Wm^{-2}]
- I_Z je intenzita záření dopadajícího na Zemi [Wm^{-2}]
- R_{SZ} je vzdálenost Země od Slunce [m]
- R_S je poloměr Slunce [m]
- $\alpha \cong 46\,000$ je zředňovací faktor

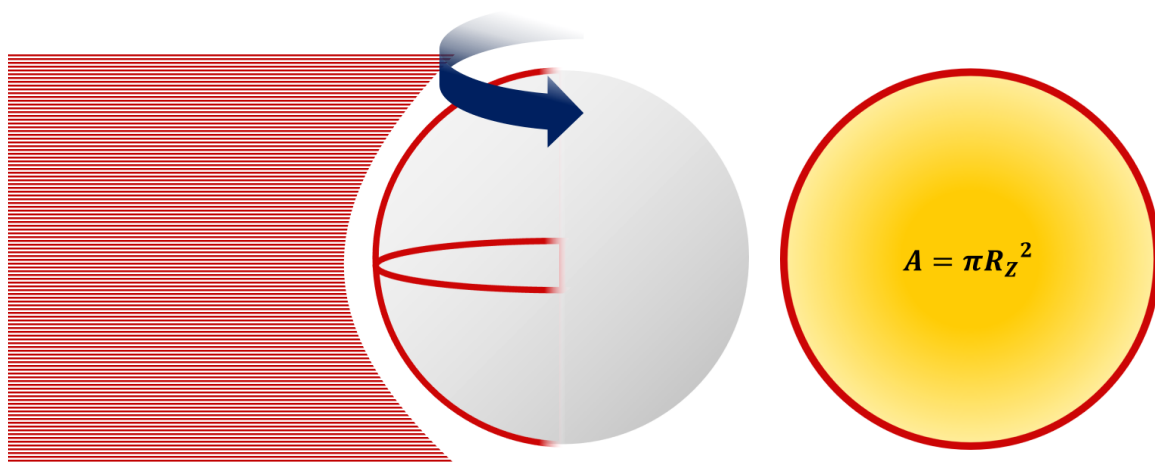
Z experimentálních měření víme, že intenzita slunečního záření dopadající na horní vrstvy atmosféry Země činí přibližně **1,5 kW/m²** (tzv. solární konstanta). Naopak intenzita záření na

povrchu Slunce podle S-B zákona dosahuje hodnoty zhruba **60 MW/m²**. To znamená, že během cesty k Zemi se sluneční záření „zředí“ přibližně **46 000 krát**.

Pro naše výpočty však postačuje hodnota **1,5 kW/m²**. Celkový výkon, který Země přijímá, pak vypočítáme jako součin této intenzity a „efektivní plochy“ Země. Tato efektivní plocha S_Z odpovídá v prvním přiblížení průřezu Země kolmo na dopadající sluneční paprsky (Pozn⁴):

$$A = \pi R_Z^2 \quad (10)$$

Kde R_Z je poloměr Země. Tento průřez představuje oblast, která „zachytává“ sluneční záření (viz Obrázek 2).



Obr. 2: Obrázek znázorňuje efektivní průřez koule - Země. Vlevo jsou kontrastní barvou znázorněny dopadající paprsky. Modrou šipkou je naznačen směr, kterým by se musela Země otočit, abychom na ni hleděli z pohledu zářiče. Vpravo je pak pohled na Zemi z pozice zářiče. (obrázek autor)

Povrch (efektivní průřez) Země, který je Sluncem ozářen, si označíme A . Tento efektivní průřez odpovídá ploše, na kterou dopadají sluneční paprsky kolmo. Dále je důležité uvést, že termodynamické teploty Slunce a Země nejsou totožné, proto zavádíme:

- T_S jako termodynamickou teplotu povrchu Slunce.
- T_Z jako termodynamickou teplotu povrchu Země.

⁴Pozn. Zanedbáváme atmosférické jevy. Absolutní hodnota pro nás není důležitá

Předpokládáme, že emisivita Slunce (ε_S) se v čase nemění a její hodnota je přibližně rovna jedné ($\varepsilon_S = 1$), což znamená, že sluneční povrch vyzařuje téměř jako ideální černé těleso. U emisivity Země (ε_Z) však nelze předpokládat její homogenní rozložení po celém zemském povrchu. Proto zavádíme:

- ε_Z jako průměrnou emisivitu zemského povrchu,
- $\varepsilon_Z(\lambda)$ jako emisivitu závislou na vlnové délce (λ) - pro připomenutí nutnosti návratu k PV zákonu.

Jelikož jsme si nyní zavedly emisivity, už se nemůžeme bavit o absolutně černém tělese je třeba upravit naše veličiny, které berou emisivitu v potaz. Doteď jsme měli intenzitu vyzařování vztaženou na jednotku plochy. Zavedením emisivity se z toho efektivně stává veličina plošné hustoty zářivého toku $= J_Z$ [Wm^{-2}]. Stejně tak výkon vyzařený Zemí závislý na emisivitě vztažený na jednotku plochy se stane intenzitou vyzařování $= M_Z$ [Wm^{-2}].

Ukažme si tuto změnu na dříve uvedené rovnici tepelné bilance a jak bude nyní vypadat po zavedení emisivity:

$$I_S(\lambda)A = I_Z(\lambda)S_Z \quad (11)$$

Se stane:

$$J_S(\lambda)A = M_Z(\lambda)S_Z$$

Kde:

- I_S je intenzita záření dopadající na Zemi ze Slunce [Wm^{-2}]
- I_Z je intenzita záření vyzařeného Zemí [Wm^{-2}]
- J_S je hustota zářivého toku ze Slunce [Wm^{-2}]
- A je efektivní průřez Země, který je osvětlen Sluncem viz [obrázek 2](#) ($= \pi R_Z^2$)
- M_Z je intenzita vyzařování Země [Wm^{-2}]
- S_Z je plocha Země, ze které Země září do vesmíru viz [obrázek 3](#) ($= 4\pi R_Z^2$)

Rovnici tepelné bilance Země můžeme zapsat takto:

$$J_Z A = \frac{1}{\alpha} \varepsilon_S \sigma T_S^4 A = S_Z \varepsilon_Z(\lambda) \sigma T_Z^4 \quad (12)$$

Kde:

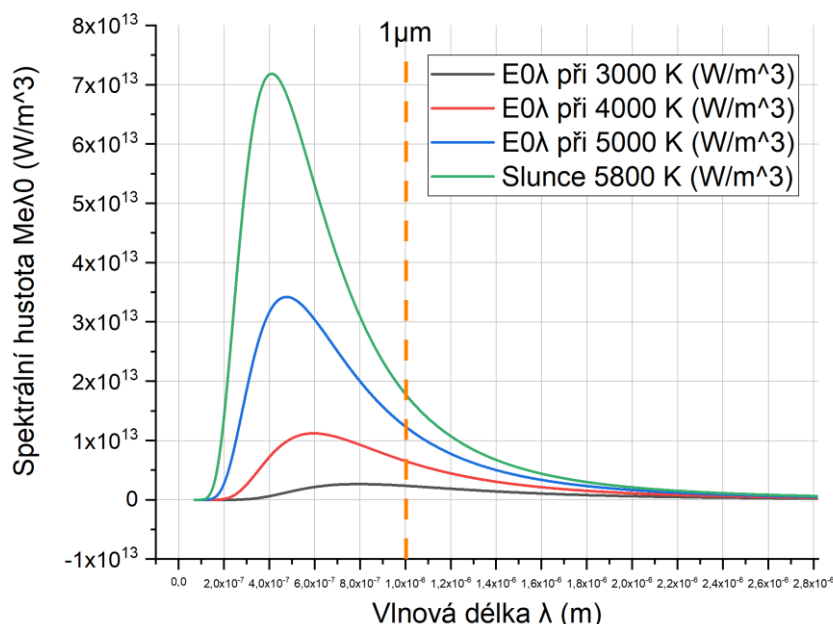
- J_Z je plošná hustota zářivého toku přijatého Zemí [Wm^{-2}], $\approx 1,5 \text{ kWm}^{-2}$.
- A je efektivní průřez Země, který je osvětlen Sluncem viz [obrázek 2](#) ($A = \pi R_Z^2$)
- $\varepsilon_S = 1$ je průměrná emisivita Slunce — schopnost slunečního povrchu emitovat infračervené záření je téměř stoprocentní. Tedy nepředpokládáme, na rozdíl od povrchu Země, že je funkcí vlnové délky, $\varepsilon_S \neq f(\lambda)$
- σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, která má hodnotu přibližně $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
- $T_S = 5800 \text{ K}$ je termodynamická teplota povrchu Slunce

- S_Z je celkový povrch Země $S_Z = 4\pi R_Z^2$ [m²]
- $\varepsilon_Z(\lambda)$ je emisivita Země – nyní funkce vyjadřující závislost emisivity na vlnové délce.
- $T_Z = 300$ K je termodynamická teplota Země
- $\frac{1}{\alpha}$ ředící faktor $\approx \frac{1}{46000} \approx 2,15 \cdot 10^{-5}$ (pro kolmý dopad slunečního záření).

Celkový výkon přijatý od Slunce ($P_Z S_Z$) se musí rovnat celkovému výkonu, který Země vyzáří zpět do vesmíru. Levá strana rovnice (12) popisuje, jak intenzita slunečního záření ve vzdálenosti Země klesá a jak se přijatý výkon vztahuje k vlastnostem Slunce. Pravá strana ukazuje, že výkon vyzářený Zemí závisí na jejích vlastnostech (celkový povrch, emisivita a teplota).

Tato úvaha s využitím S-B zákona nám pomůže pochopit toky energií v závislosti na geometrii soustavy. Nelze ji však použít k přísnému zhodnocení proveditelnosti projektu. Zde budeme muset použít PV zákon.

Pojďme si nyní konečně vysvětlit, proč musíme uvažovat závislost emisivity na vlnové délce, kterou těleso vyzařuje nebo pohlcuje. Pokud se podíváme na graf, který reprezentuje PV zákon uvidíme, že intenzita záření absolutně černého (ani šedého) tělesa není ve všech vlnových délkách stejná. Jako příklad si ukážeme spektrum hustot vyzařování pro různé teploty černého tělesa:



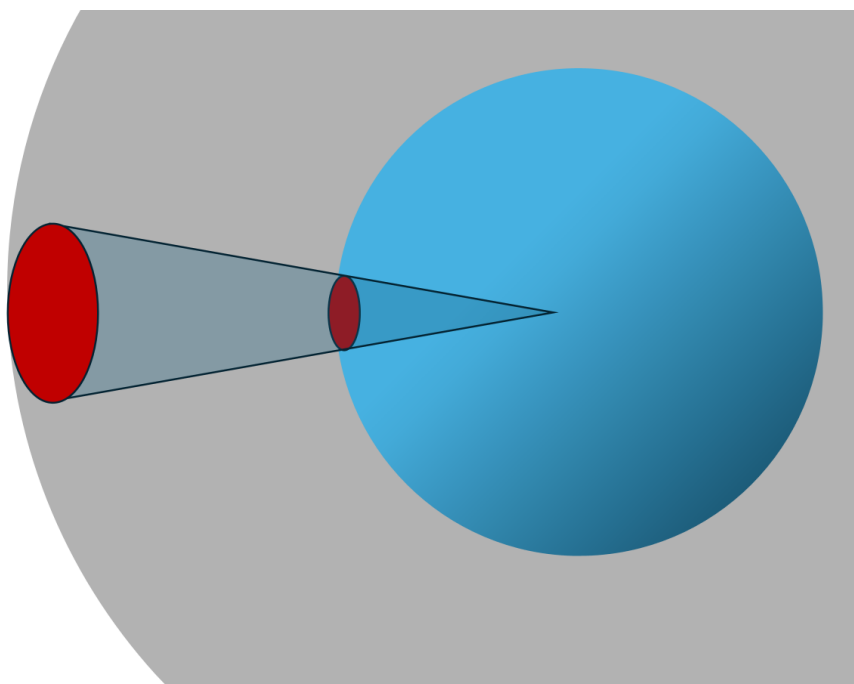
Graf G1: Graf zobrazuje závislost spektrální hustoty vyzařování pro různé teploty na vlnové délce (graf autor)

Tento [graf G1](#) má na ose x vlnovou délku emitovaného záření a předpokládá, že těleso je absolutně černé, tedy $\varepsilon = 1$ pro všechny vlnové délky. To však přísně neplatí ani pro Slunce samotné, a už vůbec ne pro chladnější tělesa zde na Zemi. Každé těleso má své charakteristické

rozsahy vlnových délek, ve kterých vyzařuje výrazně, a naopak v určitých rozsazích vlnových délek nevyzařuje téměř vůbec. **Nyní je důležité si uvědomit, že emisivita v dané oblasti vlnových délek neřídí jen vyzařování (emisi) záření, ale stejným způsobem i pohlcování (absorpci) záření.** To je výchozí myšlenka našeho projektu. Pojdme si vysvětlit proč je tak důležité vědět, ve které oblasti vlnových délek se emise/absorpce toho kterého povrchu vyskytuje. Energie, kterou Slunce dodává Zemi není rozložena ve spektru rovnoměrně. Na první pohled je vidět, že maximum energie je dodáváno ve viditelné oblasti , kolem 500 nm. Proto máme v létě oblíbené světlé oblečení. Ono tolik „nehřeje“. To znamená, že naše cílová barva by měla odrážet co nejvíce viditelného záření – měla by být bílá. Pokud budeme chtít ale barvu, která se bude navíc vyzařováním chladit, musíme se podívat, které vlnové délky lze snadno vyzářit do vesmíru. Země totiž čerpá energii z malého prostorového úhlu daného průřezem a vzdáleností Slunce, ale vyzařuje do celého zbytku prostoru. Jedinou překážkou ve vyzařování může být *atmosféra*.

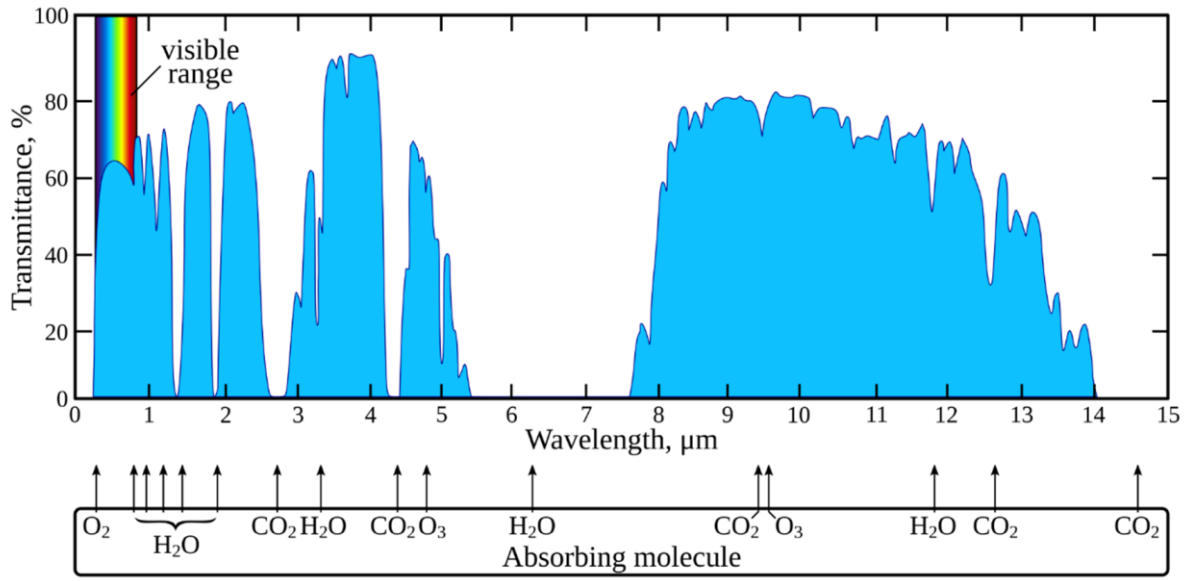
3.6 Atmosférické okno

Řekněme, že se naše bílá barva ohřívá méně než jiné povrchy. Pokud by však dokázala navíc vyzařovat v nějaké oblasti vlnových délek přímo do vesmíru a ne “do atmosféry”, byla by ještě chladnější. Důležité je si uvědomit, že naprostá většina okolního vesmíru je prázdná – prakticky na Zemi nezáří a tedy ji neohřívá. Termodynamická teplota vesmíru je asi 2,7 K! Tedy výjimkou je pouze ploška obsazená Sluncem, tam Země vyzařovat nemůže, naopak odtamtud čerpá. To je ale jen $\approx 1,72$ ppm ze 4π sr celkového prostorového úhlu (Obrázek 3). Výpočet je uveden v [technické zprávě](#).



Obr. 3: Obrázek zobrazuje prostorový úhel Země (označena modře), na kterém je kontrastně vyznačena ploška obsazená Sluncem, kam Země nemůže vyzařovat. Šedivě je označena oblast kam Země vyzařovat může. Plocha obsazená Sluncem je pro názornost vyobrazena mnohonásobně větší, než ve skutečnosti. (obrázek autor)

Tedy, ve které oblasti vlnových délek lze dobře (bez absorpce) vyzařovat přímo do vesmíru? Na to nám dají odpověď optické vlastnosti atmosféry, konkrétně její optická propustnost. A skutečně existuje oblast vlnových délek, ve kterých atmosféra prakticky neabsorbuje – tzv. atmosférické okno. Pokud tedy najdeme látku, která bude dostatečně vyzařovat (bude mít velkou emisivitu v oblasti atmosférického okna, bude se navíc chladit tímto způsobem. Jedno významné atmosférické okno pokrývá oblast asi $\lambda = 8 - 12,5 \mu\text{m}$ (Graf G2) Jedná se o dostatečně širokou oblast elektromagnetického záření, v níž má bezoblačná atmosféra velkou propustnost (nízkou absorpci některé z hlavních absorbujících látek – především vodní páry (EMS, 2025), oxidu uhličitého (EMS, 2025) nebo ozonu (EMS, 2025)). Tedy propustnost je v oblasti vlností $\nu = 1250 - 800 \text{ cm}^{-1}$; $\nu = 1/\lambda$. Tyto jednotky jsou nejčastěji používanými v IČ spektroskopii (viz technická zpráva Graf 1). Pro zajímavost, meteorologickými družicemi jsou pro monitorování zemského povrchu a oblačnosti v tepelném záření využívána především atmosférická okna v pásmech $3,5 - 4 \mu\text{m}$, $8 - 9 \mu\text{m}$ a $10 - 12,5 \mu\text{m}$.



Graf G2: Graf zobrazuje atmosférické okno prostřednictvím závislosti transmittance (Transmittance) v procentech, na vlnové délce (Wavelength) v mikrometrech, s označením oblasti viditelného světla (visible range) (Raster, 2021)

3.7 Výpočet tepelné bilance

Nyní si vezmeme na pomoc PV (Planckův vyzařovací) zákon. Aby se barva skutečně pasivně chladila, musí být výkon barvou přijatý od Slunce menší než výkon vyzářený barvou do vesmíru. To nám dá tepelnou bilanci plošné hustoty přijatého zářivého toku ze Slunce a intenzity vyzařování ze Země [Wm⁻²]: $I_{balance\ barva}$. To je naše základní číselné kritérium. Bohužel neznáme závislost emisivity na vlnové délce v celém rozsahu elektromagnetického záření. Zkontrolujeme si tedy naše kritérium nejprve pro *kritický úsek* vlnových délek **8 – 12 μm**. Pokud nebude záporná v tomto úseku, naše barva nemůže nikdy dosáhnout pasivního chlazení, i kdyby měla při všech ostatních vlnových délkách emisivitu (absorbci) 0. Vztah, který dokonale popisuje náš případ pro intenzitu vyzařování

$$I_{balance\ barva} = \frac{1}{\alpha} \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T_s}} - 1} \cdot T_{atm}(\lambda) \cdot \varepsilon_s(\lambda) d\lambda - \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T_{barva}}} - 1} \cdot T_{atm}(\lambda) \cdot \varepsilon_{barva}(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

si tedy musíme upravit. Zde $T_{atm}(\lambda) \in (0 - 1)$ vyjadřuje propustnost (transmitanci) atmosféry závislou na vlnové délce a emisivita Slunce $\varepsilon_s = 1$.

První integrál (13) opět představuje výkon, který přichází ze Slunce. Od něj je odečten druhý integrál představující výkon vyzářený Zemí. My budeme předpokládat ideální případ, kde pro atmosférické okno 8 – 12,5 μm platí $T_{atm} \cong 1$, $\varepsilon_{barva} \cong 1$. Dále budeme předpokládat zředovací faktor $\frac{1}{\alpha} = 2,15 \cdot 10^{-5}$, $T_S = 5800 \text{ K}$ a $T_{barva} = 300 \text{ K}$.

$$I_{balance\ barva} = \frac{1}{\alpha} \int_{0,000008}^{0,0000125} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T_S}} - 1} \cdot 1 \cdot 1 \, d\lambda \quad (14)$$

$$- \int_{0,000008}^{0,0000125} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T_{barva}}} - 1} \cdot 1 \cdot 1 \, d\lambda$$

$$=$$

Rovnice (14) je vyjádření rovnice (13), s dosazenými hodnotami pro vybrané rozmezí vlnových délek. To lze po výpočtu zapsat:

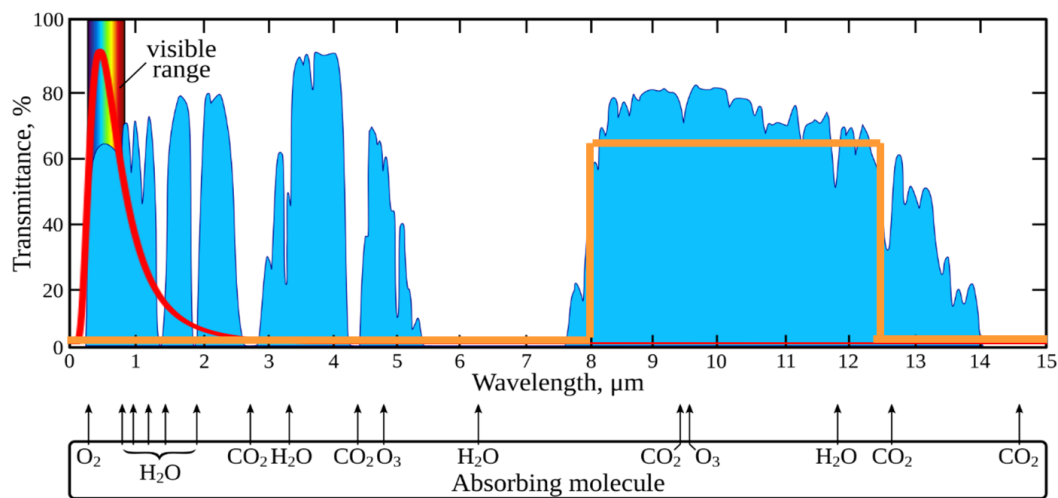
$$I_{balance\ barva} = \frac{1}{\alpha} A - B = 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot 6,338 \cdot 10^4 - 134,750 = \quad (15)$$

$$= 1.372 - 134,750 = -133,378 \text{ Wm}^{-2}$$

Výpočet a doplňkové informace jsou uvedeny v [technické zprávě](#).

To je velmi dobrý výsledek. V tomto intervalu vlnových délek bude barva více tepla vyzařovat než pohlcovat. Teoreticky by tedy barva za daných podmínek vyzářila z 1 m^2 o **130 Wm^{-2}** víc do vesmíru než by přijala od sluníčka při přímém (kolmém) osvitu. Lze spočítat, že by se teoreticky mohla ochladit až na asi **150 K**, kdy by se bilance hustoty zářivého toku a intenzity vyzařování vyrovnala. To však neodpovídá realitě. Teoreticky sice nelze vyloučit existenci pigmentu/barvy, která bude mít celkovou bilanci (přes všechny vlnové délky) zápornou, ale je to spíš nepravděpodobné. Potřebovali bychom najít pigment s ideální emisivitou ([Obrázek 4](#)) (Pozn.⁵).

⁵ Pozn. V této bilanci hraje pozitivní roli ještě jeden faktor, který jsme zatím neuvažovali. Zatímco efektivní plocha, kterou barva vyzařuje je stále stejná – průmět natřené plochy do vodorovné roviny (směr vesmír), přijímaný výkon ze Slunce je závislý na úhlu osvitu (denní době). Výsledná bilance teoretického výkonu -42 Wm^{-2} je tedy nejnižší možná, při přímém osvitu a bude lepší pro osvit pod úhlem.



Obr. 4: Obrázek zobrazuje graf transmittance ideálního pigmentu (označen oranžově). Modře je označena oblast, kde je atmosférické okno, červeně je označena závislost spektrální hustoty na vlnové délce pro teplotu 5 800 K – v grafu je bez jednotek. (obrázek autor)

Naopak je pravděpodobné, že bilance přes ostatní vlnové délky bude kladná a zřejmě v naprosté většině případů převýší zápornou bilanci v oblasti atmosférického okna (Pozn.⁶). Bohužel neznáme závislost emisivity na vlnové délce v celém rozsahu elektromagnetického záření. Ta je a bude nedostupná a tím i konečný verdikt. V praktickém případě tedy zřejmě nepůjde o chlazení, ale o co nejlepší bilanci tepelných toků. To nic nemění na všech ostatních závěrech a taková barva bude stále velmi prospěšná. To nám ukazuje, že je třeba experimentálně porovnávat jednotlivé barvy/pigmenty z hlediska jejich účinnosti „chlazení“. Na to je zaměřena naše experimentální část.

4 EXPERIMENT

V rámci tohoto experimentu se zaměřujeme na hledání ideálního pigmentu, který by co nejlépe splňoval požadavky na vysokou emisivitu v oblasti atmosférického okna a zároveň zachovával nízkou absorpci (emisivitu) ve viditelném spektru. I když je jasné, že nalezení *perfektního* pigmentu je nepravděpodobné, naším cílem je identifikovat materiál, který se této ideální vlastnosti co nejvíce přiblíží.

I pokud bychom teoreticky našli *ideální pigment*, jeho praktické využití může narazit na několik překážek. Mezi klíčové faktory patří například dopad na životní prostředí, chemická stabilita a odolnost pigmentu vůči vnějším vlivům. Kromě samotných optických vlastností, na

⁶ Pozn. K absolutnímu důkazu, že barva „chladí“ nám chybí spousta informací. Především kompletní ($\lambda \in (0 - \infty)$) emisivita barvy.

které se budeme nyní primárně soustředit, je důležité i to, jakým způsobem lze pigment aplikovat na povrch – některé materiály mohou vyžadovat specifická pojiva nebo technologicky náročné nanášení, což by mohlo omezit jejich praktickou využitelnost.

4.1 Výběr pigmentů

Při výběru pigmentů jsme vycházeli z dostupných „historických“ bílých pigmentů a následně jejich vlastnosti porovnávali se známými emisními spektry.

Nejprve byl sestaven široký seznam potenciálních bílých pigmentů, který zahrnoval jak tradiční, tak moderní materiály. Tento seznam obsahoval olovnaté běloby, křidu, síranové a uhličitánové sloučeniny různých kovů, případně další méně známé bílé pigmenty. Během dalšího zkoumání byly jednotlivé pigmenty posouzeny z hlediska jejich infračervených spekter (IČ) (emisivity), dostupnosti a bezpečnosti použití. Z tohoto širšího výběru byl nakonec sestaven užší seznam pigmentů vhodných k experimentálnímu testování, který zahrnuje:

- Síran barnatý (BaSO_4)
- Uhličitán vápenatý (CaCO_3)
- Oxid zinečnatý – zinková běloba (ZnO)
- Oxid titaničitý – titanová běloba (TiO_2)
- Křemičitan zirkoničitý (ZrSiO_4)

Kompletní seznamy včetně IČ spekter jsou k dispozici v [technické zprávě](#).

4.2 Popis experimentu

V experimentu měříme teplotu povrchů, na které byly aplikovány různé pigmenty. Každý pigment je nanesen na samostatný měděný plech opatřený termočlánkem, což nám umožňuje sledovat, jak se jednotlivé barvy chovají v čase při vystavení přirozeným povětrnostním podmínkám – během dne na slunci i v noci pod otevřenou oblohou. Cílem je zjistit, zda a jak se tyto pigmenty ochlazují, a ověřit tak naše teoretické předpoklady. Jako pojivo byl použit siloxanový lak Lukosil M130 z Lučebních závodů Kolín, a.s. Důvodem pro tuto volbu je odolnost tohoto pojiva na povětrnosti (UV, déšť, apod.).

Jako podkladový materiál jsme použili měď, a to kvůli její vysoké tepelné vodivosti. Tento materiál pomáhá zajistit, aby měření bylo co nejpřesnější, a aby teplota pigmentu odpovídala skutečnému chování materiálu, nikoliv lokálním výkyvům způsobeným například nerovnoměrnou distribucí tepla. Pigmenty byly přímo aplikovány na měděné destičky, na které jsme následně připojili termočlánky. Zvolili jsme silnější měděný plech, čímž jsme dosáhli vyšší tepelné kapacity systému. To pomáhá minimalizovat vliv krátkodobých změn, jako jsou poryvy větru nebo rychlé přechody mezi slunečním svitem a zastíněním od mraků. Bez této stabilizace by se tyto výkyvy projevíly v naměřených datech a mohly by zkreslit celkové hodnocení vlastností pigmentů.

Měření probíhá venku v reálných podmínkách od listopadu 2024 do současnosti. I když sledujeme chování pigmentů v různých situacích, klíčová pro vyhodnocení jsou data získaná během jasných dní a nocí, kdy se očekává, že se chladicí efekt pigmentu projeví nejvýrazněji.

Cílem experimentu je podpořit naše teoretické výpočty a dále nalézt pigment, který skutečně umožní ochlazování povrchu.

4.3 Měřicí aparatura

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 termočláнку, který je dále propojen se zesilovačem. Tento zesilovač umožňuje přesné měření napětí na termočláнку pomocí jednodeskového mikropočítače Arduino.

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

Detailní specifikace aparatury, včetně typu použitých termočláneků, způsobu zapojení a použitého kódu, jsou uvedeny v [technické zprávě](#).

4.4 Příprava vzorků

Vzorky byly připraveny podle následujícího postupu. Nejprve jsme na základě dostupných údajů o hustotě jednotlivých pigmentů vypočítali potřebné hmotnosti tak, abychom získali přesně objem 1,5 cm³ od každého pigmentu pro přípravu barvy. Cílem bylo dosáhnout vždy stejné objemové koncentrace pigmentů. Pigmenty jsme vybírali z běžně dostupných zdrojů – buď laboratorních chemikálií, nebo malířských potřeb.

Síran barnatý (BaSO₄) a uhličitan vápenatý (CaCO₃) jsme použili ve formě dostupné pro laboratorní využití. Oxid zinečnatý (ZnO) a oxid titaničitý (TiO₂) pocházely z pigmentů běžně prodávaných v obchodech s malířskými potřebami. Křemičitan zirkoničitý (ZrSiO₄) byl zakoupen ve formě jemně mletého prášku prostřednictvím on-line prodejce.

Po navážení odpovídajících hmotností jednotlivých pigmentů jsme je rozpustili ve směsi 3 ml Lukosilu M130 a 3 ml xylenu. K dosažení homogenní disperze jsme použili ultrazvukový homogenizátor.

Hmotnosti jednotlivých pigmentů, jak byly zapsány v laboratorním deníku dne 18. října 2024:

- Síran barnatý (BaSO₄): 6,735 g
- Uhličitan vápenatý (CaCO₃): 4,069 g
- Oxid zinečnatý (ZnO): 8,410 g
- Oxid titaničitý (TiO₂): 6,345 g
- Křemičitan zirkoničitý (ZrSiO₄): 6,841 g
 - 3 ml Lukosilu M130 a 3 ml xylenu

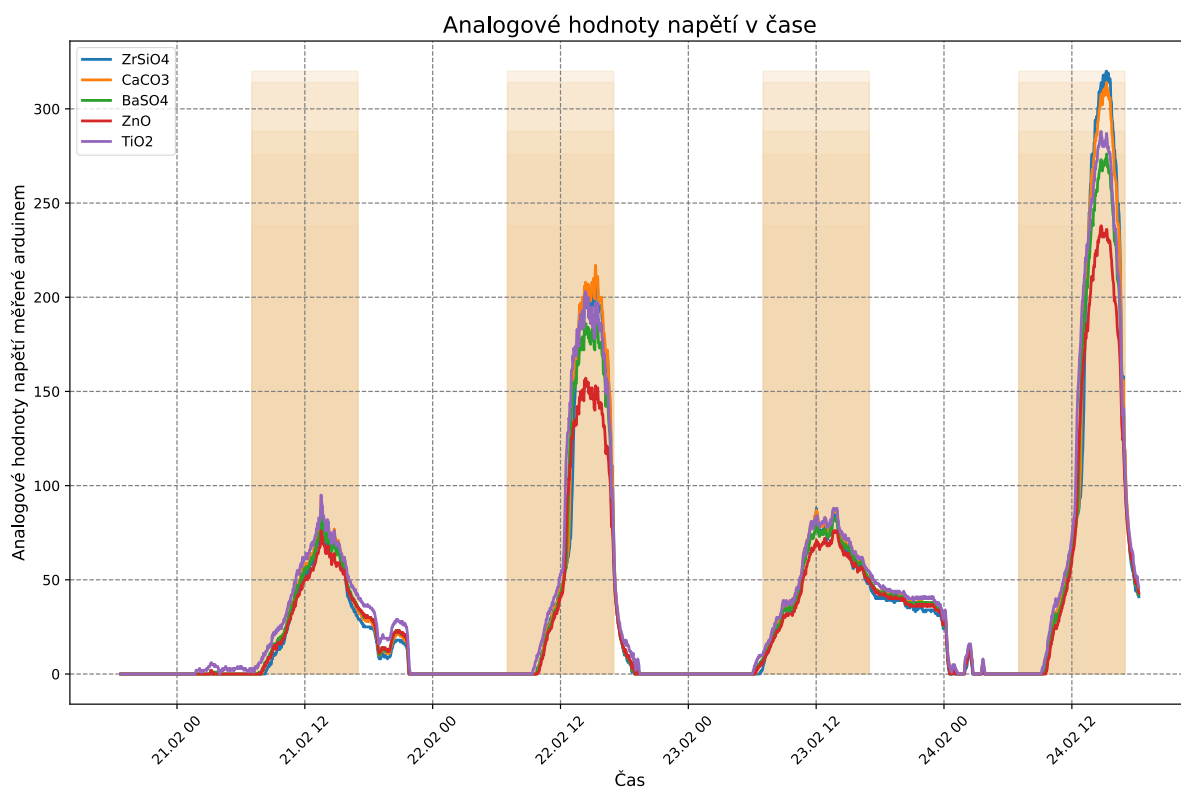
Tato kompozice byla zvolena na základě opakovaných experimentů jako taková, která má maximální plnění pigmentem a zároveň si podrží omyvatelnost. Případné znečištění barvy má negativní vliv na její účinnost.

4.5 Vyhodnocování dat

Pro usnadnění analýzy naměřených dat a jejich přehledné vizualizace jsme vytvořili automatizovaný systém pro zpracování a vyhodnocení výsledků. K tomu jsme využili programovací jazyk Python, který umožňuje efektivní práci s datovými soubory a jejich následnou interpretaci. Naměřené hodnoty jsou průběžně ukládány ve formátu CSV, což usnadňuje jejich další zpracování a umožňuje snadnou integraci s automatizovanými skripty. Díky tomu bylo možné vytvořit systém, který nejen graficky znázorňuje naměřené teploty v čase, ale také umožňuje rychlé porovnání mezi jednotlivými vzorky. Kompletní kód je uveden v [technické zprávě](#).

5 VÝSLEDKY

5.1 Zpracování a interpretace naměřených dat

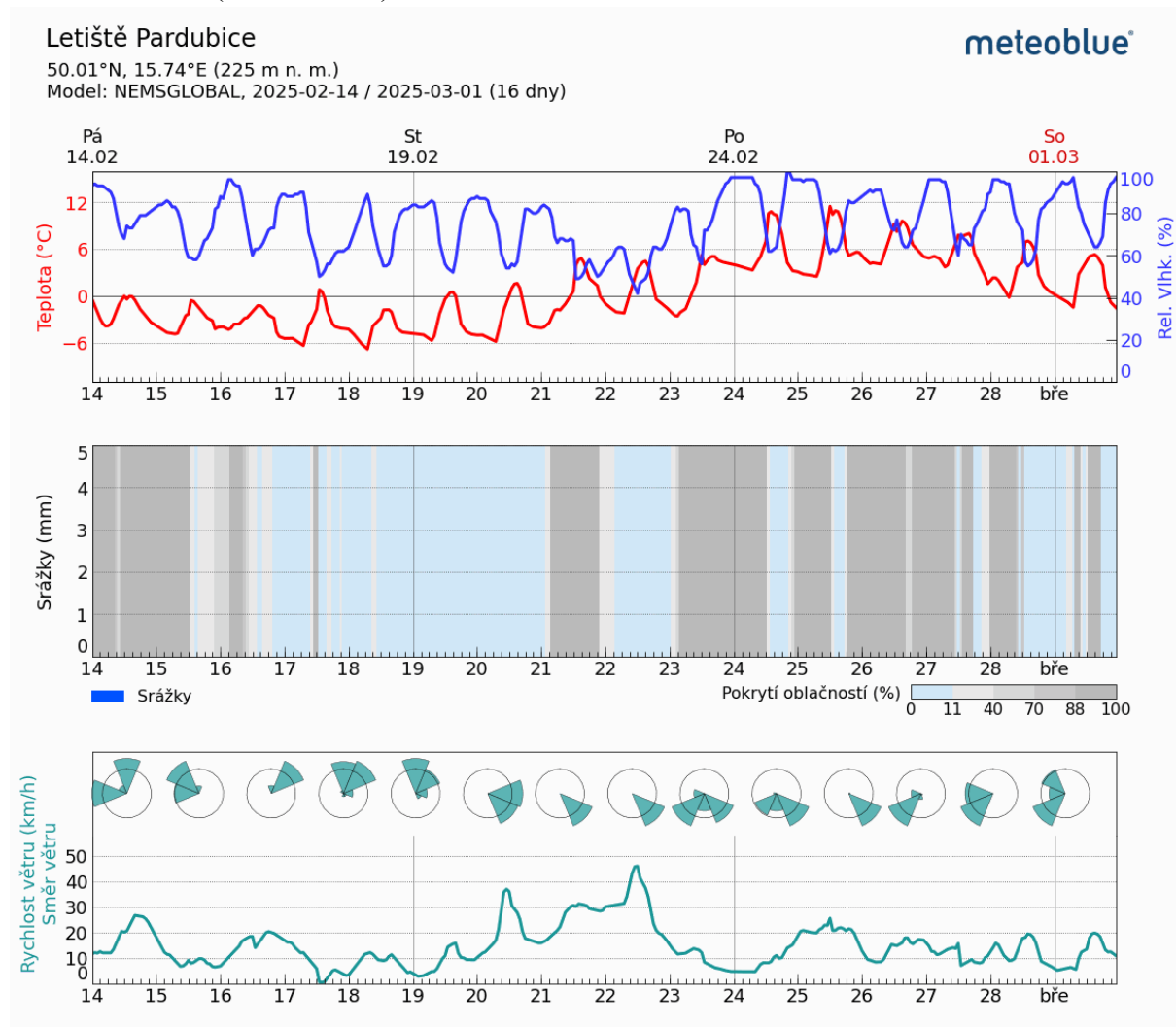


Graf G3: Graf zobrazuje arduinem naměřené analogové hodnoty napětí, které jsou přímo úměrné teplotě barvy, v závislosti na čase v období od večerních hodin 21. 02. do večerních hodin 24. 02. 2025. Hodnoty jsou barevně odděleny pro jednotlivé pigmenty – legenda je vlevo nahoře. Oranžovým podkresem je naznačena denní doba. Vzhledem k orientaci experimentu vůči světovým stranám začíná osvit po 12:00 – druhá půlka denní doby (graf autor)

Měření bylo prováděno dlouhodobě v období od listopadu 2024 do března 2025. Veškeré měření probíhalo „Za oknem“ tedy přímo vystaveno povětrnostním podmínkám, které dále uvádíme. Podrobné umístění experimentu je uvedeno v [technické zprávě](#). Graf G4, který je zde uveden byl vybrán pro svoji názornost. Jediné, co mu chybí, jsou hodnoty v nočních hodinách, což je omezení způsobené nastavením měřicí aparatury, ale to nám nepřekáží v demonstraci a ověření naší hypotézy, že jednotlivé pigmenty se budou velmi lišit v parametru *I_{balance barva}* diskutovaném výše. Nočním teplotám se budeme věnovat později.

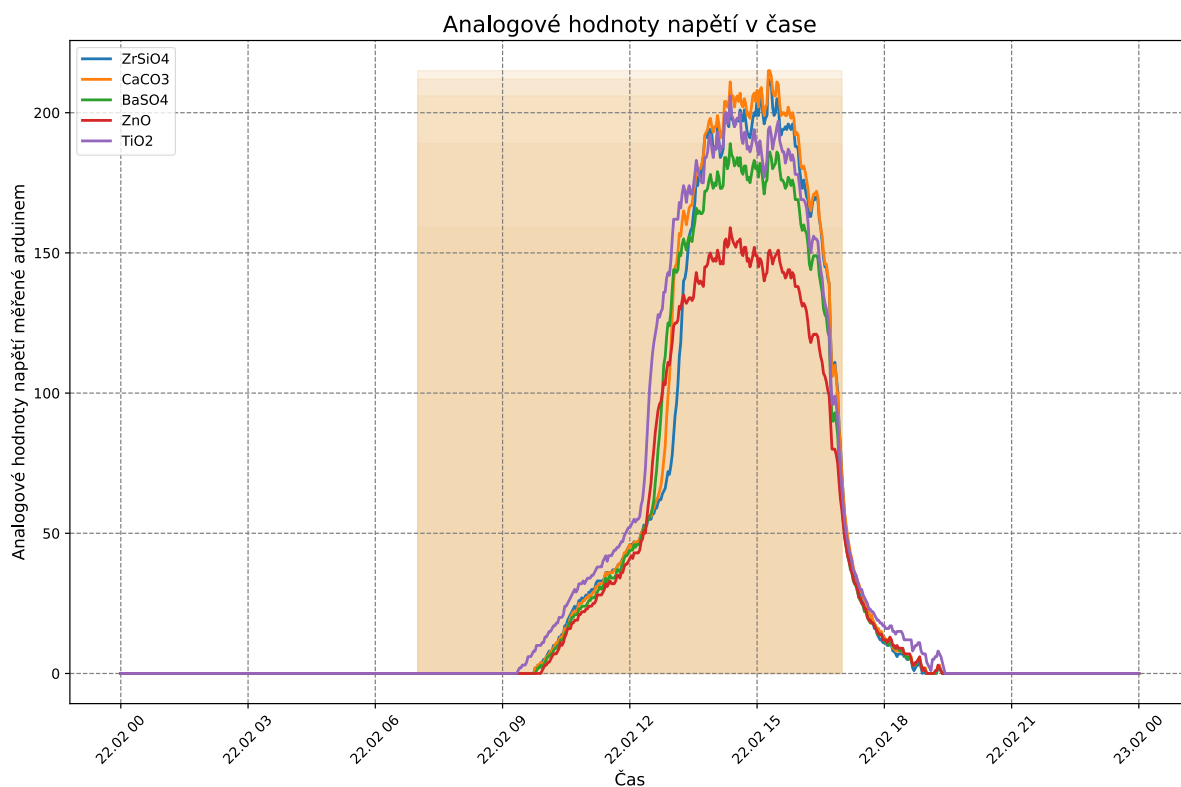
Graf G4 je názorný, neboť se nám podařilo v krátkém sledu dní zaznamenat různé podmínky, způsobené počasím. První den výběru bylo zataženo, druhý den jasno, třetí den opět zataženo a čtvrtý den bylo opět jasno půl dne, ale s intenzivnějším slunečním svitem.

Pro porovnání přikládáme graf počasí naměřený letištěm v Pardubicích, data jsou dostupná zdarma on-line. (Raster, 2021)



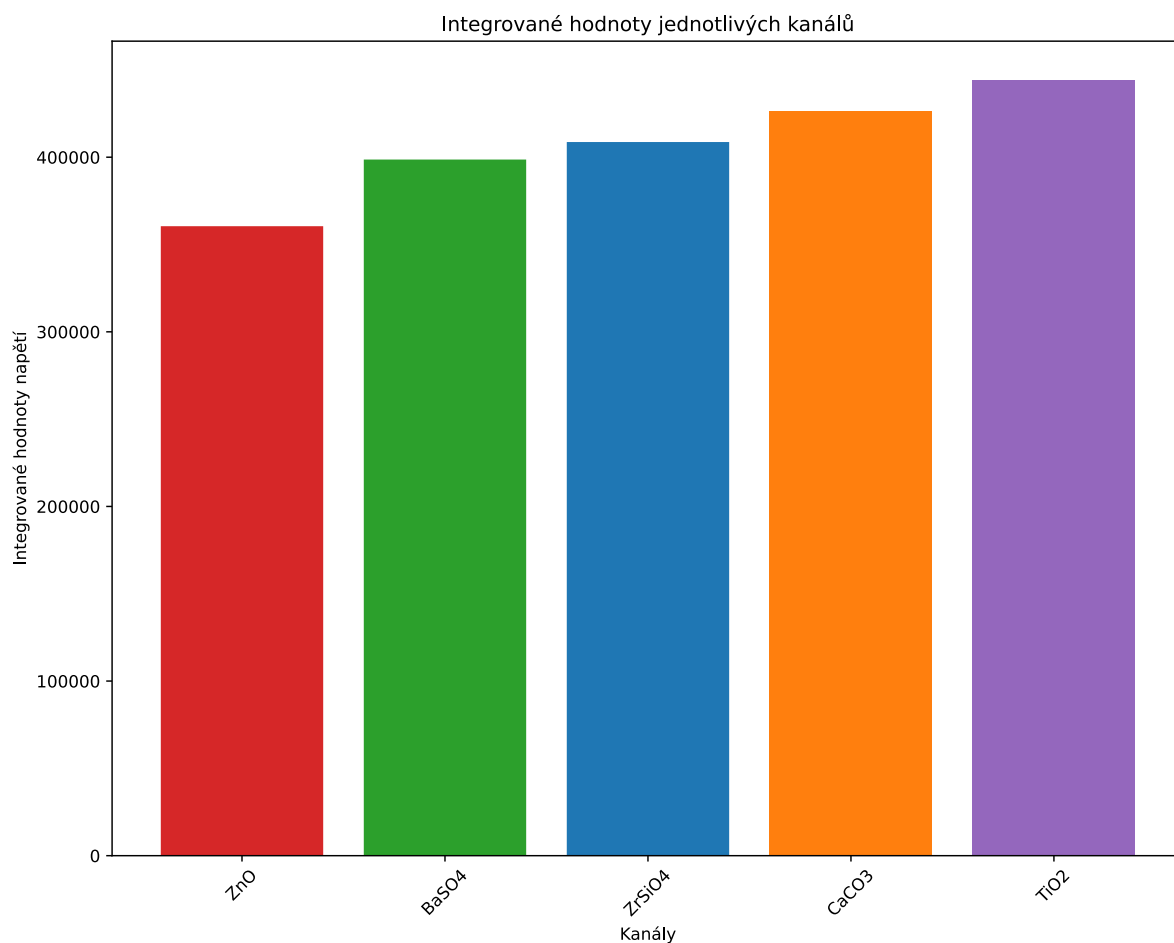
Graf G4: Graf zobrazuje nezávisle změřená data z meteostanice umístěné na pardubickém letišti. Náš experiment se nachází v dostatečné blízkosti letiště, abychom počasí letiště mohli považovat za shodné s experimentem. (Meteoblue, 2025)

Hned při prvním pohledu na [graf G4](#) je zřejmé, že jeden pigment je chladnější než ostatní. Nejpatrnější je to v sobotu 22. února. Podívejme se nyní na tento den detailněji.



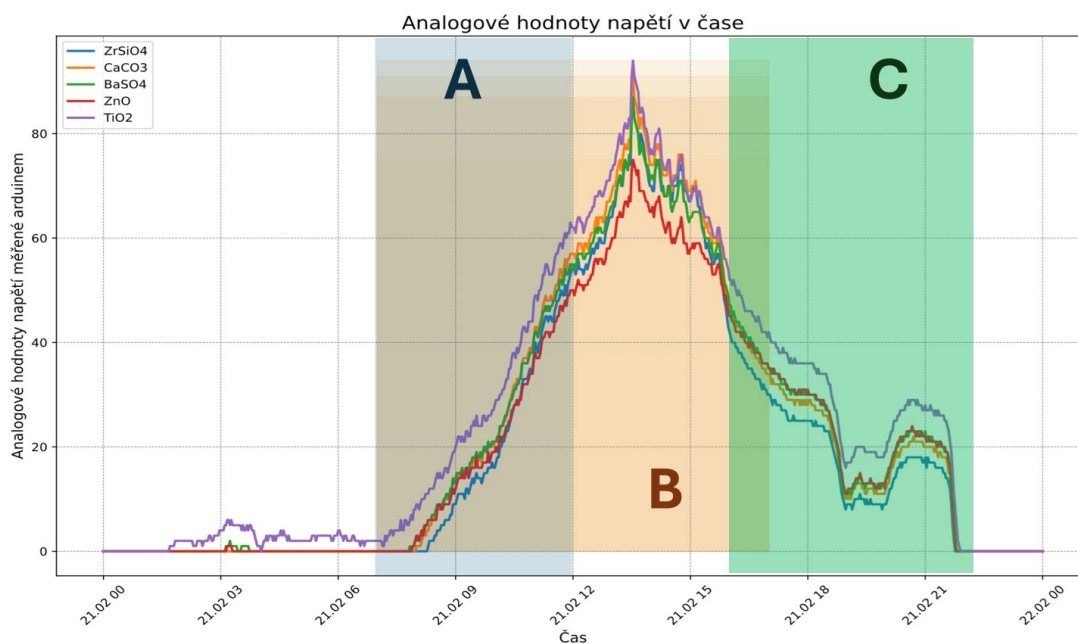
Graf G5: Graf zobrazuje naměřené analogové hodnoty napětí (přímo úměrné teplotě barvy) v čase od 21. 02. (00:00) do 22. 02. 2025 (00:00) (graf autor)

Na [grafu G6](#) je zřejmé, že ZnO má výrazně nižší teplotu, než ostatní měřené barvy. Oranžové pozadí vyznačuje čas od 7:00 od 17:00 pro snadnou orientaci v grafu. Vzhledem k tomu, že aparatura byla umístěna v 7. patře budovy, její přímý osvit sluncem začíná kolem 12:00, což je jasně patrné jako prudký nárůst teploty. Umožňuje nám to pozorovat, jak se barva chová na nepřímém světle. Dne 22. 02. bylo dle dat meteostanice celý den slunečno a proto můžeme pozorovat rozložení teploty barev na přímém slunci a krásně vyniká, že červeně uvedený ZnO je nejstudenější na přímém slunečním světle. Chladicí efekt je méně výrazný při nepřímém osvitu (7:00 – 12:00), ale i zde je zřejmé, že ZnO zůstává nejchladnější. Pro jistotu jsme ještě vytvořili [graf G7](#) integrovaných hodnot za měřené období od 21. 02. do 24. 02. 2025. Tato integrace by měla odlišit, která barva je celkově nejchladnější přes den. Pak se podíváme na další zajímavé dny v detailu.



Graf G6: Zobrazení integrovaných hodnot napětí měřené arduinem pro jednotlivé pigmenty v období od 21. 02. do 24. 02 2025. Nejnižší hodnotu má ZnO: 360487, ale přesná hodnota není podstatná, důležité je porovnání s ostatními pigmenty. (graf autor)

Z tohoto grafu jasně vyplývá, že je ZnO celkově nejstudenější. Nejteplejší je TiO₂. Nyní se podívejme na zajímavý den 21. 02. (Obrázek 5) Zajímavý je proto, že ačkoliv bylo zataženo, pigmenty se ohřály a můžeme pozorovat tři zajímavé sektory:

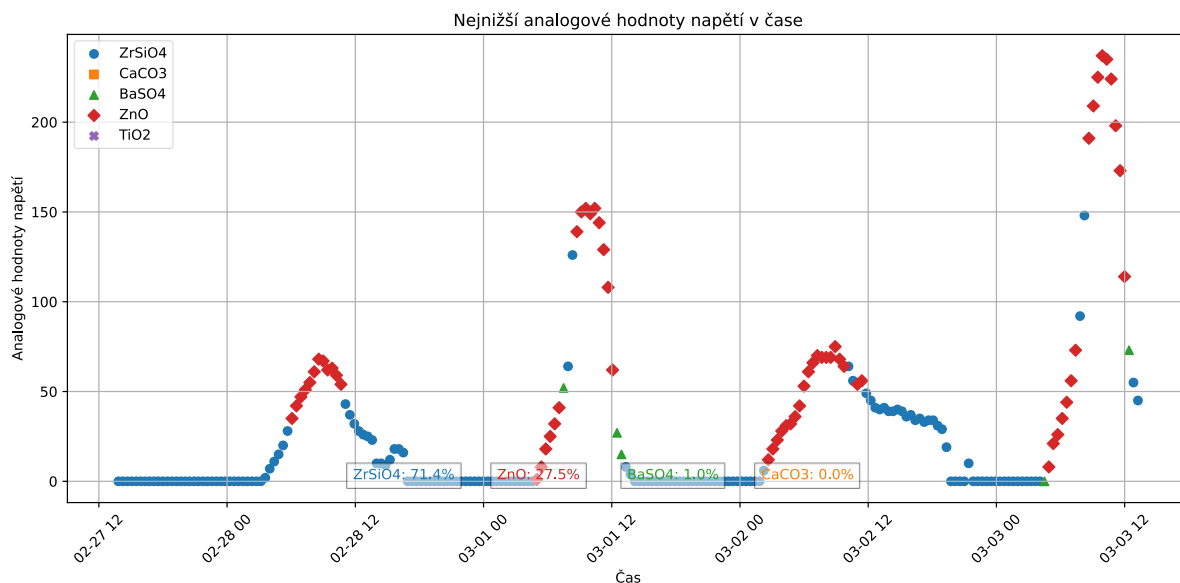


Obr. 5: Obrázek zobrazuje graf ze dne 21. 02. 2025 s naměřenými analogovými hodnotami. Jsou v něm odlišeny modře oblast **A**, oranžově oblast **B** a zeleně oblast **C**. (obrázek autor)

Podívejme se nejprve na oblast **A**. V této části, jak jsme již řekli není světlo přímé, ale pigmenty se ohřívají od vzduchu a nepřímého záření. V této oblasti si nejlépe vede ZrSiO₄. Nejhůře TiO₂.

V oblasti **B** dochází k přímému osvětlení skrze oblačnost a trend se obrací. Zde si nejlépe vede ZnO. Takto sama o sobě není oblast **B** dostatečně zajímavá, ale podíváme-li se na další dny (**G5**), vidíme trend, při kterém se teplota ZnO více a více vzdaluje od ostatních pigmentů. To je velmi pozitivní zpráva, protože měření probíhalo v zimním období. Pokud totiž budeme předpokládat, že je tento trend pravdivý (ostatně tak to vyplývá z celého měření), pak s rostoucí teplotou je efektivita chladicího efektu větší. *Zjednodušeně v zimě barva zbytečně nechladí tolik, jako v létě, kdy to nejvíce potřebujeme.*

V oblasti **C** pozorujeme zajímavý jev. Po západu slunce stejně jako před začátkem přímého osvětlení je nejchladnější opět ZrSiO₄, jako v oblasti **A**. Pro větší názornost byl vyhotoven [graf G8](#) nejnižších hodnot teploty barev v závislosti na denním čase.

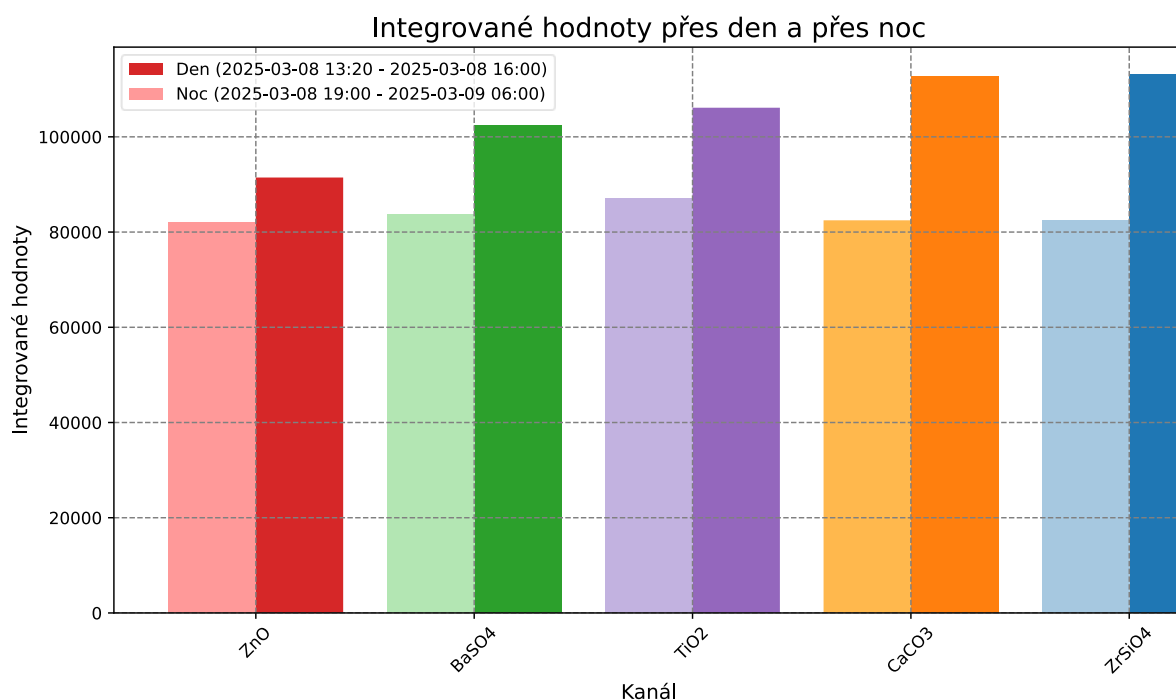


Graf G7: Graf zobrazuje nejvyšší analogové hodnoty napětí měřené arduinem mezi sledovanými pigmenty v daný čas. Ve spodní části je vidět procentuální zastoupení nejvyšších hodnot v čase. Graf je v podstatě modročervený, tedy nejchladnějšími barvami v různých časech jsou ZnO a ZrSiO4. (graf autor)

Z tohoto grafu, je názorně vidět, že ZnO je nejchladnějším pigmentem, pokud na něj svítí slunce (i přes oblačnost), ale pokud nejsou barvy vystaveny přímému slunečnímu světlu, pak je obvykle nejchladnější ZrSiO4. Z tohoto můžeme vyvodit závěr, že ZnO má nejvýhodnější tepelnou bilanci pokud jde o příjem záření, ale ZrSiO4 má nejlepší ochlazovací schopnosti. Celková bilance přes celý den však vychází nejlépe pro ZnO. To je dáno tím, že ZrSiO4 se více ohřívá při osvitlu sluncem i přes oblačnost. To potvrzuje i porovnání v grafu G4 z 21. 02. a 22. 02., kdy bylo pod mrakem a ZrSiO4 nebylo nejteplejší, na rozdíl od 22. 02.

5.2 Hledání barvy na ochranu staveb

V motivaci poukazujeme na problém, kterým je přílišná změna teploty mezi dnem a nocí, která představuje zátěž pro stavební projekty. Nyní se pokusíme na základě získaných dat přes den a noc určit, jestli by některý pigment nemohl tuto zátěž zmírnit. Pokud by se přes den příliš neohříval a v noci příliš nechladil. Vyhotoven byl graf G9, který byl vytvořen na základě získaných dat. Jedná se o integrované hodnoty přes den a přes noc. Noc je označena světlejší barvou



Graf G8: Sloupkový graf zobrazuje integrované hodnoty (osa y) pro jednotlivé pigmenty (osa x). Pigmenty jsou zleva doprava srovnány od nejmenšího rozdílu teplot přes den a noc. Světlejší sloupec představuje integrované hodnoty přes noc a tmavě jsou označeny integrované hodnoty přes den. V legendě je vyznačeno, kdy byly hodnoty změřeny (graf autor)

Výsledkem nejlepší barvy pro stavební užití na základě dat, která jsme získali je ZnO.

5.3 Omezení experimentu a možné chyby

Každý experiment má svá omezení a potenciální zdroje chyb, které mohou ovlivnit z něj vyvozené závěry. V našem případě je jedním z hlavních faktorů znečištění vzorků. Jelikož experiment probíhá ve venkovních podmínkách, vzorky mohly být časem znečištěny. Tento efekt je očekávaný, protože měření bylo prováděno v reálném prostředí, ale není výrazný. Data se znatelně nezměnila po očištění barev isopropanolem. Prachové částice přesto mohou například změnit emisivitu povrchu nebo snížit jeho schopnost odrážet sluneční záření.

Dalším bodem, který bylo nutné zohlednit, je variabilita samotných pigmentů. Pigmenty se liší nejen chemickým složením, ale také velikostí a tvarem částic. Tyto rozdíly mohou ovlivnit jejich schopnost odrážet a vyzařovat teplo. Obecně platí, že čím drobnější jsou částice pigmentu, tím více lomových ploch světlo zasáhne, což zvyšuje jeho rozptyl a tím i celkovou odrazivost. Tento efekt lze přirovnat ke sněhu, který působí velmi bíle, protože jeho struktura umožňuje opakované odrazy světla na nespočtu jednotlivých ledových krystalků. Pokud by pigmenty měly větší částice, mohlo by dojít ke snížení účinnosti jejich odrazivosti, což by ovlivnilo celkové výsledky experimentu. Tento závěr je však v rozporu s faktem, že nejjemnější částice má TiO₂, který vychází z porovnání nejhůře.

Dalším možným zdrojem nepřesností je samotná měřicí aparatura. Přestože termočlánky byly umístěny přímo na povrch vzorků a opatřeny měděným podkladem pro zajištění tepelné uniformity, je možné, že některé jemné teplotní fluktuace vznikaly v důsledku kolísání vnějších podmínek, jako jsou náhlé poryvy větru či přechodné zastínění slunečního záření například pohybem mraků. To by mohlo vést k drobným nesrovnalostem v naměřených hodnotách, které však odpovídají reálným podmínkám, ve kterých by se dané materiály mohly běžně vyskytovat. Tyto nesrovnalosti však nemohou zásadně ovlivnit učiněné závěry.

I přes tato omezení se domníváme, že získaná data jsou dostatečně reprezentativní a poskytují věrohodný přehled o chování jednotlivých pigmentů v reálných podmínkách. Identifikované možné chyby a nepřesnosti jsou v rámci očekávaných odchylek a neovlivňují základní závěry experimentu.

6 ZÁVĚR A DISKUSE

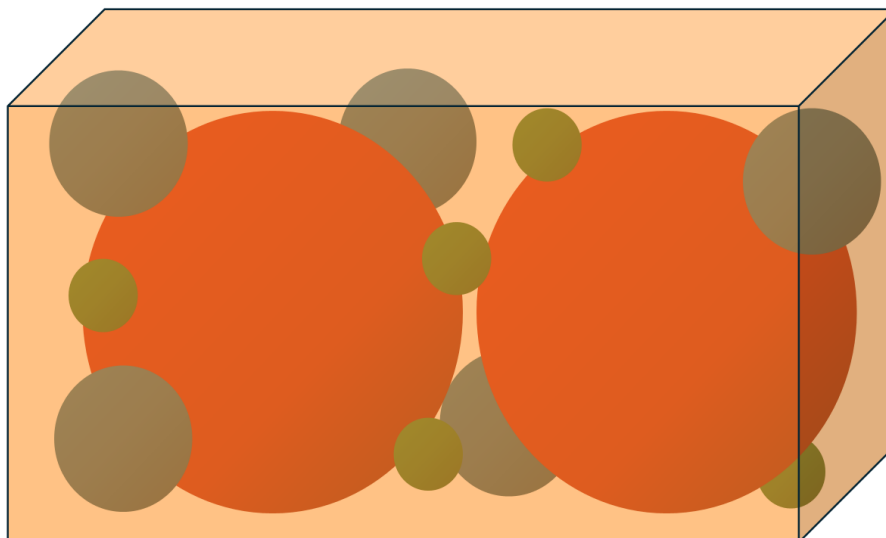
6.1 Shrnutí dosažených výsledků

- Na základě teoretický výpočtů i experimentálních výsledků lze potvrdit, že **vývoj barev s efektem pasivního chlazení je smysluplný**.
- Z experimentálně testovaných pigmentů je to **oxid zinečnatý (ZnO)**, který má největší schopnost odrážet záření o vlnových délkách (viditelné a IČ), ve kterých na zem dopadá největší výkon. Na druhé straně **křemičitan zirkoničitý (ZrSiO₄)** se chová nejlépe při nepřímém osvětlení, kde prokazuje vynikající schopnost vyzařovat teplo v atmosférickém okně – pasivně se chladit. Jeho nedostatečná odrazivost ho v této roli znevýhodňuje.
- Z experimentálně testovaných pigmentů je **oxid zinečnatý (ZnO)** výhodný pro ochranu staveb a budov před přílišnými teplotními rozdíly. Protože se nejméně ohřívá a nejméně ochlazuje, což vede k nejmenším teplotním rozdílům mezi dnem a nocí.

6.2 Výhled do budoucna – diskuse

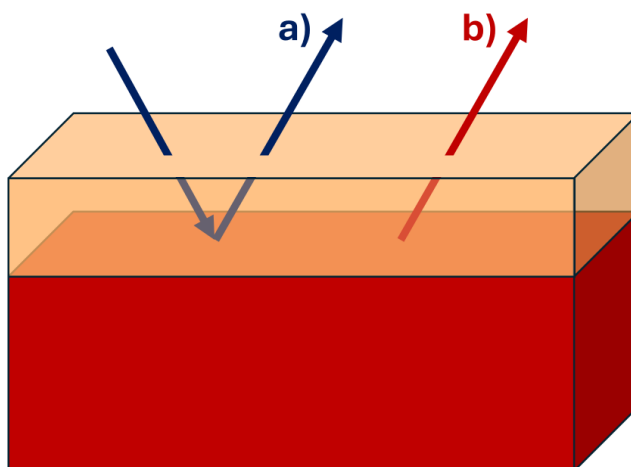
Do budoucna vidíme několik směrů, jak dále optimalizovat vlastnosti pigmentů pro efektivní pasivní chlazení. Jedním z klíčových aspektů je úprava struktury pigmentů – a) loužení, které umožní odstranit potenciálně absorbující nečistoty (například ze ZrSiO₄) a b) jemné mletí, které umožní dosáhnout jemnější a homogennější frakce. Tím se především zvýší odrazivost pigmentu, ale možná také jeho schopnost vyzařovat teplo v požadovaném spektrálním rozsahu (atmosférickém okně). Jemnější částice poskytují větší počet refrakčních hran, což vede k lepším optickým vlastnostem, podobně jako u čerstvě napadaného sněhu.

Dalším klíčovým faktorem je velikostní distribuce částic. Předpokládáme, že optimální struktura pigmentu nebude spočívat pouze v dosažení co nejmenších částic, ale v jejich vhodné disperzi – tedy v rovnoměrném rozložení více velikostních frakcí (**viz obrázek 6**). To by mohlo zlepšit plnivost barvy, tedy obsah pigmentu a tím i jeho výsledné optické a tepelné vlastnosti. Pojivo je „opticky nežádoucí“ součástí barvy.



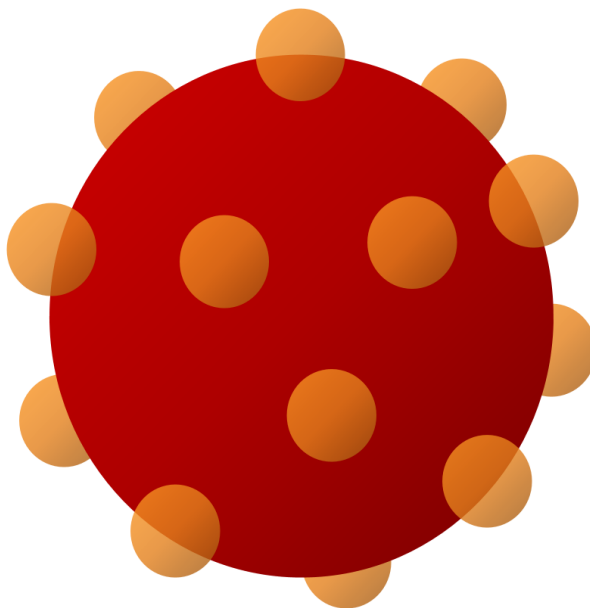
Obr. 6: Obrázek zobrazuje hypotetický pigment, který je naplněn různou velikostí částic. Červeně jsou částice největší, modře středně velké a zeleně nejmenší. (obrázek autor)

Jedním z hlavních směrů budoucího výzkumu by mohlo být také testování směsí různých pigmentů. Ačkoli samotný TiO_2 vykazoval v našich měřeních nejhorší výsledek, je možné, že to bylo způsobeno jeho vysokou odrazivostí a nízkou emisivitou. Pokud by byl smíchán s pigmentem, který má dobré vyzařovací vlastnosti, ale sám není příliš odrazivý (např. ZrSiO_4), mohla by výsledná směs nabídnout lepší kombinaci optických a tepelných vlastností. Je tedy otázkou, zda vhodně namíchané pigmenty mohou dosáhnout lepších vlastností než jednotlivé složky samostatně (viz obrázek 7).



Obr. 7: Obrázek zobrazuje hypotetickou barvu tvořenou dvěma pigmenty. Oranžový pigment je „průhledný“ z hlediska vyzařování (chlazení) červeného pigmentu, ale má vysokou odrazivost pro přicházející viditelné světlo. Červený pigment má vysokou schopnost vyzařovat v atmosférických oknech (oranžový pigment mu nebrání ve vyzařování). Písmenem **a** je uvedeno dopadající sluneční záření a písmenem **b** je uvedeno „chladičí“ IČ záření v rámci atmosférického okna. (obrázek autor)

Pokud by se podařilo najít kombinaci pigmentů, kde jeden efektivně vyzařuje teplo a druhý odráží sluneční záření, bylo by vhodné optimalizovat velikost jejich částic tak, aby částice vyzařujícího pigmentu byly obaleny částicemi odrazivého pigmentu (viz obrázek 8), nebo lépe, připravit sendvičovou strukturu jako je na obrázku 7.



Obr. 8: Obrázek zobrazuje částici hypotetického pigmentu, který je optimalizován pro univerzální užití. Oranžově jsou vyvedeny částice, které dobře odrážejí, ale jsou průhledné pro záření červené částice. (obrázek autor)

Během analýzy jsme také zjistili, že infračervená spektra neobsahují celý obraz. Ačkoliv jsme na základě spektrálních dat očekávali, že nejchladnější bude jiný pigment než ZnO, naše experimenty ukázaly odlišný výsledek. To naznačuje, že samotná spektrální data nemusí být vždy dostačující k přesnému predikování chladicí schopnosti pigmentů a že experimentální ověření je zásadní.

V budoucím výzkumu by proto bylo vhodné experimentálně ověřit efektivitu jednotlivých pigmentů i jejich směsí a podrobněji prozkoumat vliv mletí, chemické čistoty a optimální distribuce velikostí částic. Míchání pigmentů a tvorba sendvičových struktur se jeví jako slibná cesta, která by mohla vést k vývoji materiálů s ještě lepšími vlastnostmi pro pasivní chlazení.

7 REFERENCE

- EMS. (2025). *Elektronický meteorologický slovník*. Retrieved from <http://slovník.cmes.cz/heslo/2537>
- EMS. (2025). *Elektronický meteorologický slovník*. Retrieved from <http://slovník.cmes.cz/heslo/2501>
- EMS. (2025). *Elektronický meteorologický slovník*. Retrieved from <http://slovník.cmes.cz/heslo/24468>
- Meteoblue. (2025, 02). *Archiv počasí - pardubické letiště*. Retrieved from https://www.meteoblue.com/cs/po%C4%8Das%C3%AD/historyclimate/weatherarchive/leti%C5%a1t%C4%9b-pardubice_%C4%8cesko_7668321?fcstlength=1m&year=2025&month=2
- Raster, B. (. (2021, May 8). *Wikipedia*. Retrieved from File:Atmosfaerisk_spredning-ru.svg: https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Atmosfaerisk_spredning-en.svg

8 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A ROVNIC

8.1 Seznam obrázků

- Obr. 1 Zobrazení zákona převrácených čtverců na příkladu šíření světla ze světelného zdroje (obrázek autor).....10
- Obr. 2: Obrázek znázorňuje efektivní průřez koule - Země. Vlevo jsou kontrastní barvou znázorněny dopadající paprsky. Modrou šipkou je naznačen směr, kterým by se musela Země otočit, abychom na ni hleděli z pohledu zářiče. Vpravo je pak pohled na Zemi z pozice zářiče. (obrázek autor).....11
- Obr. 3: Obrázek zobrazuje prostorový úhel Země (označena modře), na kterém je kontrastně vyznačena plocha obsazená Sluncem, kam Země nemůže vyzařovat. Šedivě je označena oblast kam Země vyzařovat může. Plocha obsazená Sluncem je pro názornost vyobrazena mnohonásobně větší, než ve skutečnosti. (obrázek autor).....15
- Obr. 4: Obrázek zobrazuje graf transmitance ideálního pigmentu (označen oranžově). Modře je označena oblast, kde je atmosférické okno, červeně je označena závislost spektrální hustoty na vlnové délce pro teplotu 5 800 K – v grafu je bez jednotek. (obrázek autor).....18
- Obr. 5: Obrázek zobrazuje graf ze dne 21. 02. 2025 s naměřenými analogovými hodnotami. Jsou v něm odlišeny modře oblast **A**, oranžově oblast **B** a zeleně oblast **C**. (obrázek autor) ..26
- Obr. 6: Obrázek zobrazuje hypotetický pigment, který je naplněn různou velikostí částic. Červeně jsou částice největší, modře středně velké a zeleně nejmenší. (obrázek autor).....30
- Obr. 7: Obrázek zobrazuje hypotetickou barvu tvořenou dvěma pigmenty. Oranžový pigment je „průhledný“ z hlediska vyzařování (chlazení) červeného pigmentu, ale má vysokou

odrazivost pro přicházející viditelné světlo. Červený pigment má vysokou schopnost vyzařovat v atmosférických oknech (oranžový pigment mu nebrání ve vyzařování). Písmenem **a** je uvedeno dopadající sluneční záření a písmenem **b** je uvedeno „chladící“ IČ záření v rámci atmosférického okna. (obrázek autor)31

Obr. 8: Obrázek zobrazuje částici hypotetického pigmentu, který je optimalizován pro univerzální užití. Oranžově jsou vyvedeny částice, které dobře odrážejí, ale jsou průhledné pro záření červené částice. (obrázek autor).....32

8.2 Seznam grafů

Graf G1: Graf zobrazuje závislost spektrální hustoty vyzařování pro různé teploty na vlnové délce (graf autor) -----	13
Graf G2: Graf zobrazuje atmosférické okno prostřednictvím závislost transmitance (Transmittance) v procentech, na vlnové délce (Wavelength) v mikrometrech, s označením oblasti viditelného světla (visible range) (Raster, 2021)-----	16
Graf G3: Graf zobrazuje arduinem naměřené analogové hodnoty napětí, které jsou přímo úměrné teplotě barvy, v závislosti na čase v období od večerních hodin 21. 02. do večerních hodin 24. 02. 2025. Hodnoty jsou barevně odděleny pro jednotlivé pigmenty – legenda je vlevo nahoře. Oranžovým podkresem je naznačena denní doba. Vzhledem k orientaci experimentu vůči světovým stranám začíná osvit po 12:00 – druhá půlka denní doby (graf autor) -----	22
Graf G4: Graf zobrazuje nezávisle změřená data z meteostanice umístěné na pardubickém letišti. Náš experiment se nachází v dostatečné blízkosti letiště, abychom počasí letiště mohli považovat za shodné s experimentem. (Meteoblue, 2025) -----	23
Graf G5: Graf zobrazuje naměřené analogové hodnoty napětí (přímo úměrné teplotě barvy) v čase od 21. 02. (00:00) do 22. 02. 2025 (00:00) (graf autor) -----	24
Graf G6: Zobrazení integrovaných hodnot napětí měřené arduinem pro jednotlivé pigmenty v období od 21. 02. do 24. 02 2025. Nejnižší hodnotu má ZnO: 360487, ale přesná hodnota není podstatná, důležité je porovnání s ostatními pigmenty. (graf autor) -----	25
Graf G7: Graf zobrazuje nejvyšší analogové hodnoty napětí měřené arduinem mezi sledovanými pigmenty v daný čas. Ve spodní části je vidět procentuální zastoupení nejvyšších hodnot v čase. Graf je v podstatě modročervený, tedy nejchladnějšími barvami v různých časech jsou ZnO a ZrSiO4. (graf autor)-----	27
Graf G8: Sloupcový graf zobrazuje integrované hodnoty (osa y) pro jednotlivé pigmenty (osa x). Pigmenty jsou zleva doprava srovnány od nejmenšího rozdílu teplot přes den a noc. Světlejší sloupec představuje integrované hodnoty přes noc a tmavě jsou označeny integrované hodnoty přes den. V legendě je vyznačeno, kdy byly hodnoty změřeny (graf autor) -----	28

8.3 Seznam rovnic

(1)-----	6
(2)-----	7
(3)-----	8
(4)-----	8
(5)-----	9
(6)-----	9
(7)-----	9

(8)-----	9
(9)-----	10
(10)-----	11
(11)-----	12
(12)-----	12
(13)-----	16
(14)-----	17
(15)-----	17

9 PŘÍLOHY

[1] Motivace

[2] Technická zpráva a podpůrné informace