



Senatsverwaltung für Wirtschaft,  
Technologie und Forschung

## Závěrečná správa o výsledkoch projektu prestupových bonusov

Zlepšenie vnútornej klímy a úspora vykurovacej energie jeho používaním  
technológia termokeramickej membrány (ClimateCoating) as  
Maľovanie interiérov a/alebo exteriérov budov

### Abstraktné

Ponukou moderného softvéru na výpočet konečných prvkov je po prvýkrát možné zviditeľniť zložité fyzikálne procesy a sekvencie so všetkými zúčastnenými fyzikálnymi procesmi. Rôzne vplyvy a zdroje, ktoré spočiatku pôsobia nezávisle na celkový systém, môžu byť reprezentované vizuálne, a teda jasne vo svojom celkovom pôsobení. Cieľom prieskumov je poskytnúť podrobné informácie o tom, ako sa tepelný efekt prejavuje a ktoré parametre je možné optimalizovať.

### úvod

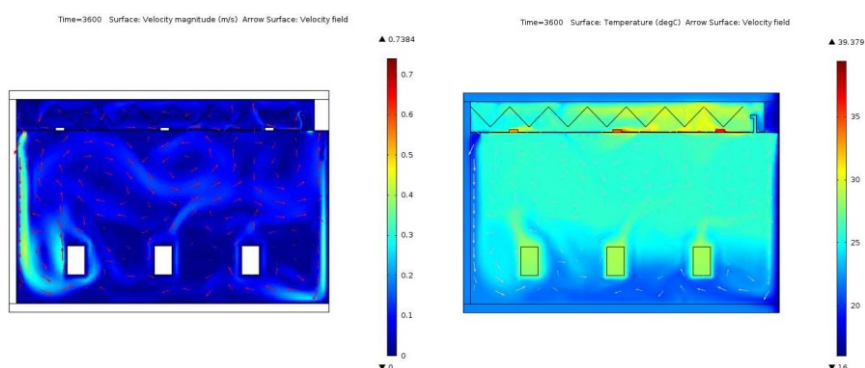
Farba „ClimateCoating“ so zložením 50 % keramických vákuových dutých guľôčok v rozsahu  $\mu\text{m}$  a spojivom na báze akrylátu pre vnútorné a vonkajšie nátery vykazuje okrem vysokej stability aj množstvo výhodných vlastností pre tepelnú izoláciu a zlepšenie interiéru. podnebie. Pochopením jednotlivých fyzikálnych procesov možno vysloviť tvrdenia o účinku. Navyše animácie o časovom priebehu pri ohreve rôznymi zdrojmi ohrevu majú vývojárovi poskytnúť podrobné znalosti a spotrebiteľovi poskytnúť aj názorné vysvetlenie efektu ohrevu.

#### 1. Simulácie (metóda konečných prvkov – MKP) pre vnútornú klímu (rozloženie teploty, prúdenie vzduchu, konvekcia, sálanie tepla, vedenie tepla) (WP 1)

Fakturovateľný krok: Návrh identického 2-rozmerného modelu podľa špecifikácií na zlepšenie vnútornej klímy s animáciou (Fakturovateľný krok za 3. týždeň projektu)

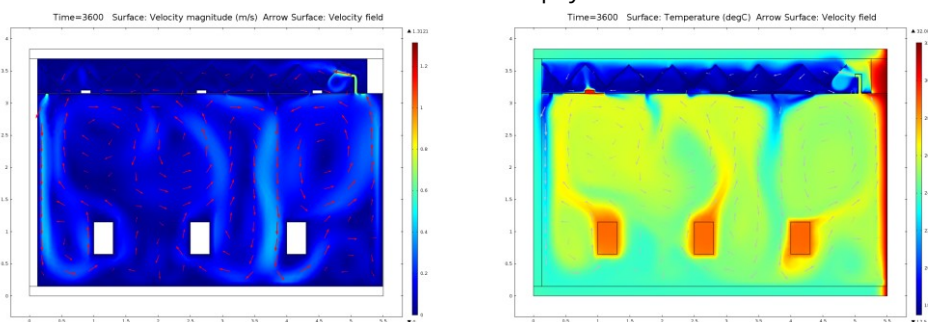
Aby sme otestovali modely izbovej klímy, najprv sme začali reprezentovať požadované fyzikálne procesy na modeli miestnosti pomocou variantov izbovej klímy. Na tento účel boli naprogramované a otestované vykurovacie puzdro pre zimnú situáciu a chladiace puzdro pre letnú situáciu:

#### Vykurovacie puzdro so stropným ohrievačom



Obr.1 Vzor prúdenia vľavo a rozloženie teploty vpravo v kancelárskej miestnosti klimatizovanej sálavým vykurovaním v podhlade a stálym vetraním. Vstup chladu vychádza z fasádneho okna na pravej strane. Tri obdĺžniky v strede miestnosti simulujú tepelné zaťaženie prístrojmi alebo ľuďmi.

#### Chladiaca skriňa so stropným chladením



Obr.2 Vzor prúdenia vľavo a distribúcia teploty vpravo v kancelárskej miestnosti klimatizovanej chladiacimi rohožami v podhlade a stálym vetraním. Teplo vychádza z fasádneho okna na pravej strane. Tri obdĺžniky v strede miestnosti simulujú tepelné zaťaženie prístrojmi alebo ľuďmi.

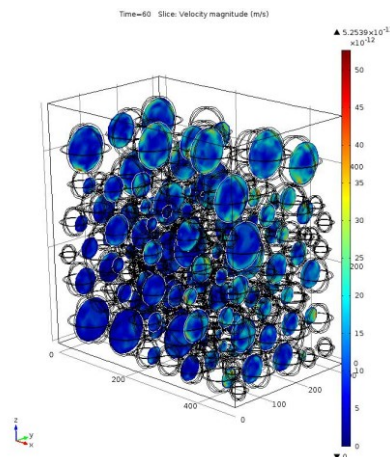
Záver : Simulácie klímy vyvinuté na testovanie modelov vnútornej klímy boli schopné reprezentovať všetky fyzikálne procesy. Vysoká prehľadnosť umožnila detailne preštudovať všetky jednotlivé procesy.

## 2.Simulácie na zlepšenie vnútornej klímy pomocou keramických dutých guľôčok v nátere (ClimateCoating) a interpretácia jednoduchého slepého efektu dutých gúľ (WP2)

Fakturovateľný krok: Návrh identického 3-rozmerného modelu podľa špecifikácií na zlepšenie vnútornej klímy pomocou farieb ClimateCoating s animáciou. (Diskusia a prezentácia prvých výsledkov). Fakturovateľný krok za 4. týždeň projektu

Aby bolo možné preskúmať procesy v nátere ClimateCoating, bolo potrebné vyvinúť takmer identický mikromodel, ktorý reprodukuje usporiadanie dutých guľôčok so štatistickým rozložením polohy a veľkosti. Na tento účel bola vyvinutá matematická metóda pre štatisticky rozložené usporiadanie týchto guľôčok v kocke s rozmermi 300 x 500 x 500, ktorá sa dala implementovať ako v programe optika (OptiCAD), tak aj v programe MKP (Comsol Multiphysics).

### Usporiadanie guľôčok pre skúšobné výpočty

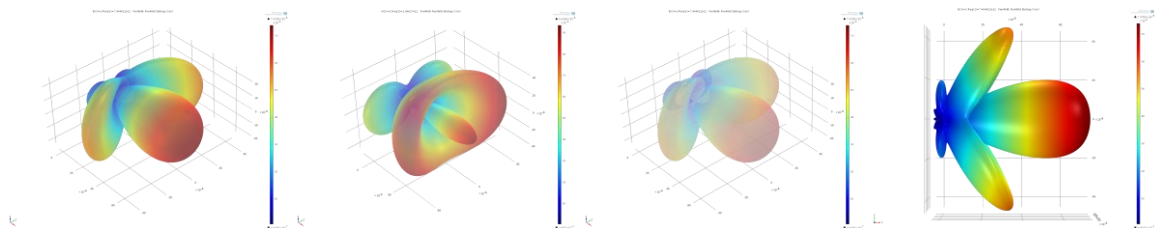


Obr.3 Štatisticky rozložené sférické usporiadanie s rôznou veľkosťou v objeme kvádra

Potom sa uskutočnil výskum rozptylu svetla na jednej dutej guľi, ako aj na tejto testovacej kocke.

Vo frekvenčne závislej štúdii medzi 10 a 22 THz alebo 13 a 30  $\mu\text{m}$  sa objavili nasledujúce profily žiarenia pre intenzitu elektrického poľa, keď pole žiarenia zasiahlo dutú guľu.

### Profily žiarenia na dutej guľi

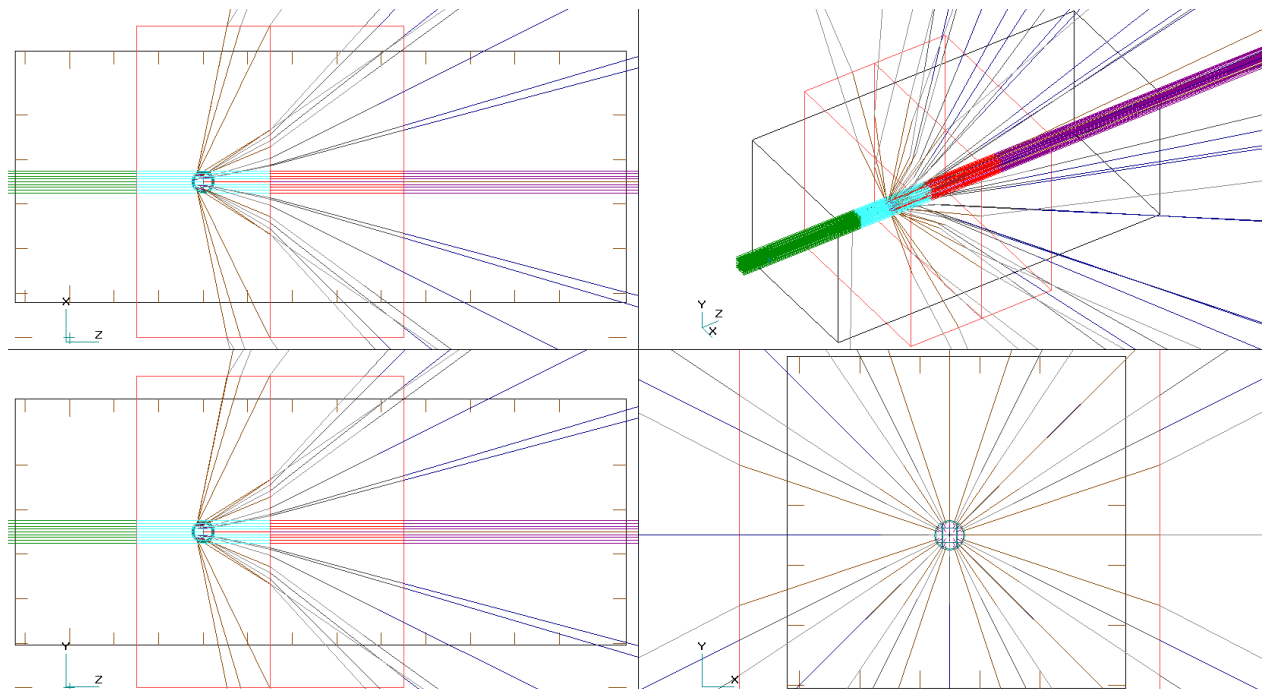


Obr.4 Profily žiarenia pre elektrické vzdialené pole, keď rovinná vlna narazí na dutú guľu pri rôznych vlnových dĺžkach. Príklady niekoľkých jednotlivých priestorových profilov sú znázornené na obrázkoch.

Táto štúdia jasne ukazuje takmer úplne doprednú intenzitu žiarenia, ktorá tvorí zanedbateľný spätný rozptyl.

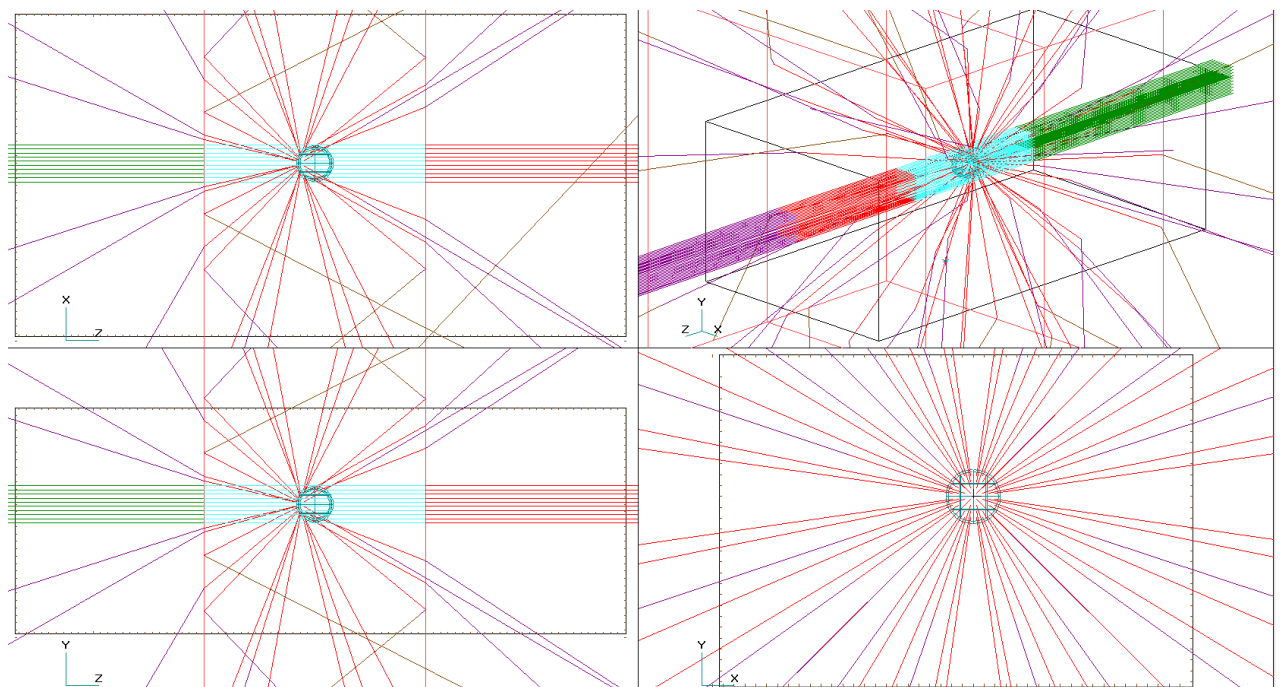
Uskutočnila sa tiež analýza lúča (sledovanie lúča) s použitím rovnakého usporiadania guľ v optickom programe. Aj tu bol na kváder vyplnený guľami nasmerovaný paralelný lúč lúčov (pozri obr. 3). Ukazuje sa, že opäť dochádza k rozptylu vpred (obr. 5), ktorý sa odráža len na stene. Až keď guľičkám na hladine priradíte úplný odraz (obr. 6), získate spätný rozptyl. Tento spätný rozptyl je však takmer úplne obsiahnutý vo farebnej vrstve ako vo svetlovode, ako je vidieť na obr. 7.

### Sledovanie lúča na jednom s SiO<sub>2</sub>Duté gule vyplnené kvádom



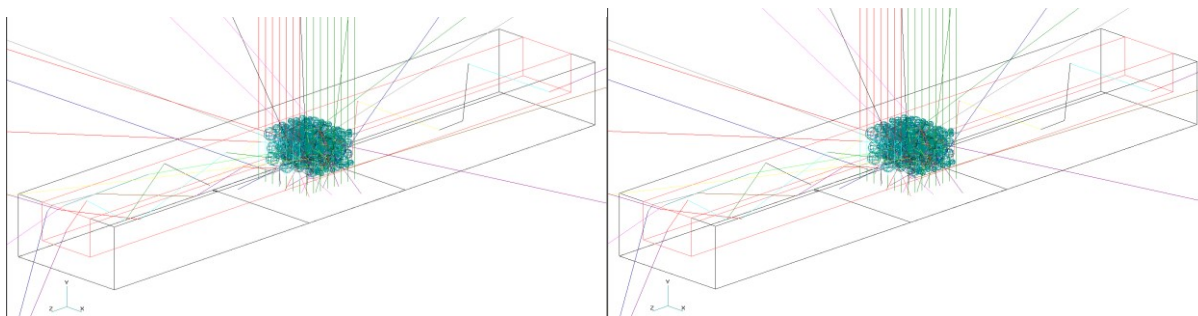
Obr.5 Model predstavuje dutú guľu vyrobenú z SiO<sub>2</sub>ktorý je zapustený do akrylovej vrstvy. Za ním je betónová stena, ktorej nebola priradená vysoká absorpcia pre lepšiu viditeľnosť. Výsledkom je výlučne dopredu smerované žiarenie, ktoré je následne absorbované. To vedie k zahrievaniu vrstvy farby.

### Sledovanie lúča na zrkadlovom SiO<sub>2</sub>Duté gule vyplnené kvádom



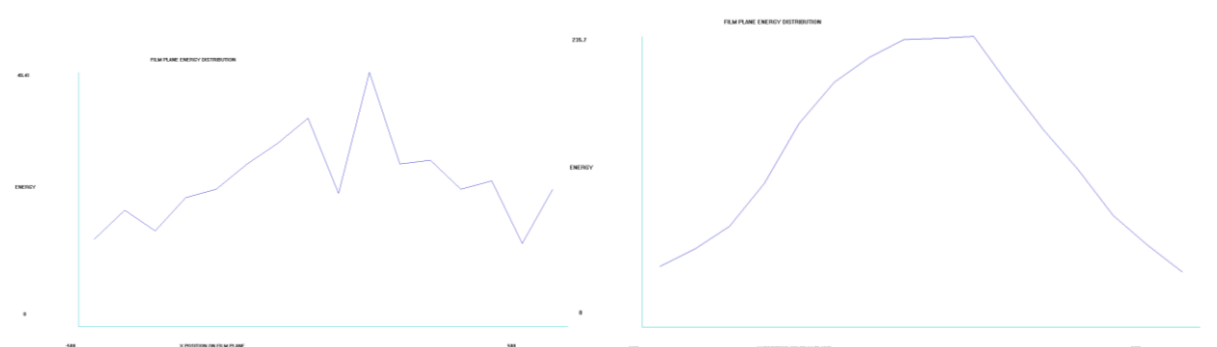
Obr.6 Model je identický s obr. 5, ale guľa tu má faktor odrazu jeden. Aj tu sú takmer všetky lúče obsiahnuté v akrylovej farbe a už nevychádzajú. To však vedie k zahrievaniu vrstvy atramentu.

Sledovanie lúča na jednom s SiO<sub>2</sub>Kváder vyplnený dutou guľou s predĺženou vrstvou farby



Obr.7 Model gule je identický s obr. 5. Gule majú prirodzený povrch vľavo a faktor odrazu jeden vpravo. V oboch prípadoch je výsledkom podobný obraz, všetky lúče sú držané v akrylovej farbe, ktorá tu bola predĺžená, a už nevystupujú. V oboch prípadoch to vedie k zahrievaniu vrstvy atramentu.

Sledovanie lúča na jednom s SiO<sub>2</sub>Kváder vyplnený dutou guľou s predĺženou vrstvou farby



Obr.8 Dva rozptylové diagramy boli prijaté na plošnom detektore, ktorý je možné vidieť ako obdĺžnik pod guľovým kvádrom na obr. V ľavom prípade s prírodnými guľami je spätný rozptyl cca 10% ožiarených lúčov, v pravom prípade spätný rozptyl cca 35%.

**Záver :** V tomto kroku sa v 3D modeloch skúmalo správanie rozptylu a odrazu v mikropriestore. Bolo jasne preukázané, že dôležitou vlastnosťou farby je jej rozptyl a absorpcia v tenkej vrstve farby. Na rozdiel od predchádzajúcich predpokladov je odraz nízky. Ako optimalizáciu je potrebné v ďalších vývojových projektoch preskúmať vplyv diskutovanej povrchovej úpravy kovovou reflexnou vrstvou (napr. hliník). To si však vyžaduje aj špeciálne meracie štúdie na poskytnutie údajov pre simuláciu.

### 3. Interpretácia existujúcich výsledkov meraní prostredníctvom simulácií, berúc do úvahy výsledky z Pankowa, Mníchova a Pergula Group (AP 3)

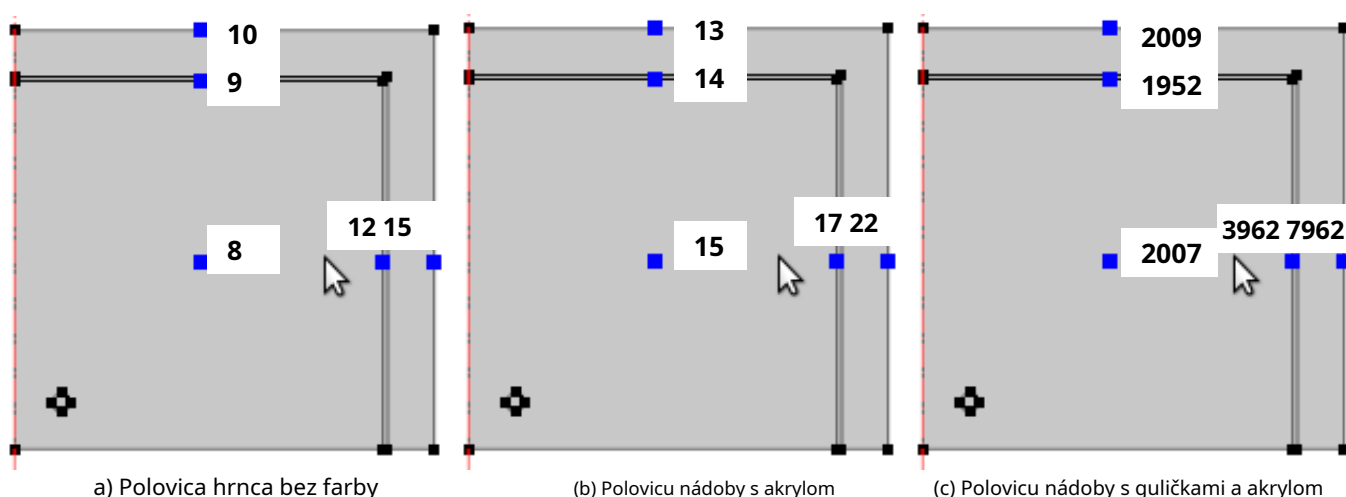
Fakturovateľný krok: Interpretácia existujúcich výsledkov meraní prostredníctvom simulácií, berúc do úvahy výsledky z Pankow, Mníchova a Pergula Group. (Účtovateľný krok za 7. projektový týždeň)

Na simuláciu Pankowovho experimentu boli vypočítané tri modely:

- Polovica hrnca s neupraveným hlineným hrncom a zdrojom tepla v ľavom rohu rotačne symetrického disku
- Polovica hrnca s hlineným hrncom potiahnutým zvnútra akrylom a zdrojom ohrevu v ľavom rohu rotačne symetrického disku
- Polovica hrnca s hlineným hrncom potiahnutým zvnútra akrylom a dutými mikrogulôčkami asi na 50 % a zdrojom ohrevu v ľavom rohu rotačne symetrického disku.



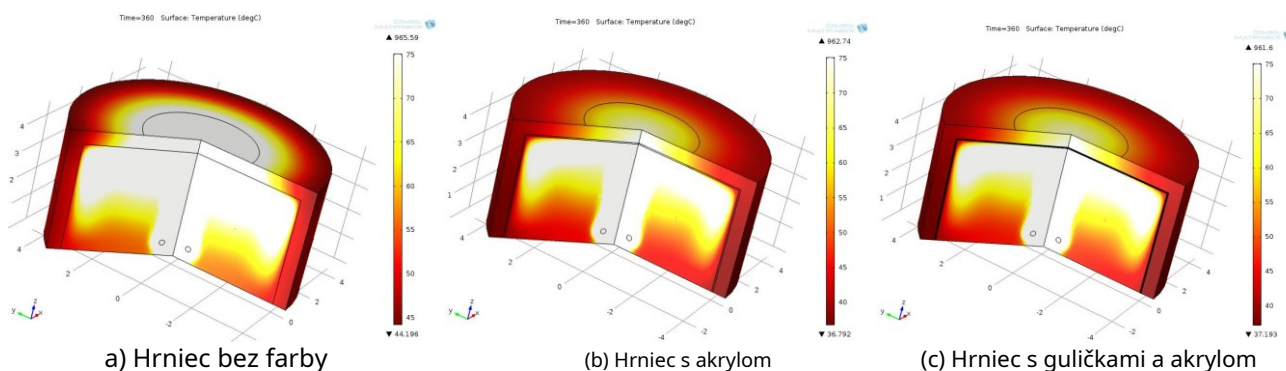
Meracie body pre nasledujúcu grafiku s ich príslušným číslovaním



Obr.9 Na výpočet Pankowovho experimentu boli namodelované tri vesmírne disky, ktoré pri podmienke symetrie vedú k rotačne symetrickému usporiadaniu s geometriou podobnou kvetináču. Na určenie otepľovania boli definované meracie body na vytvorenie grafiky, ktoré znázorňujú ich polohy očíslované v tomto znázornení.

Podmienky experimentu v kvetináči boli simulované pomocou modelov znázornených na obr. Horný a pravý okraj boli priradené k hlinenému materiálu, nasledujúca tenká vrstva bola priradená každému bez farby (a), v strede akrylovej farbe (b) a vpravo farbe Thermoshield (c), hoci pravidelná boli skonštruované duté gule, ktoré boli navzájom posunuté. Interiér bol naprogramovaný ako vzduch. Vľavo dole bol použitý zdroj vykurovania po 15 W. Vypočítané doby zahrievania boli 6 minút.

Teplotné profily po 5 minútach zahrievania



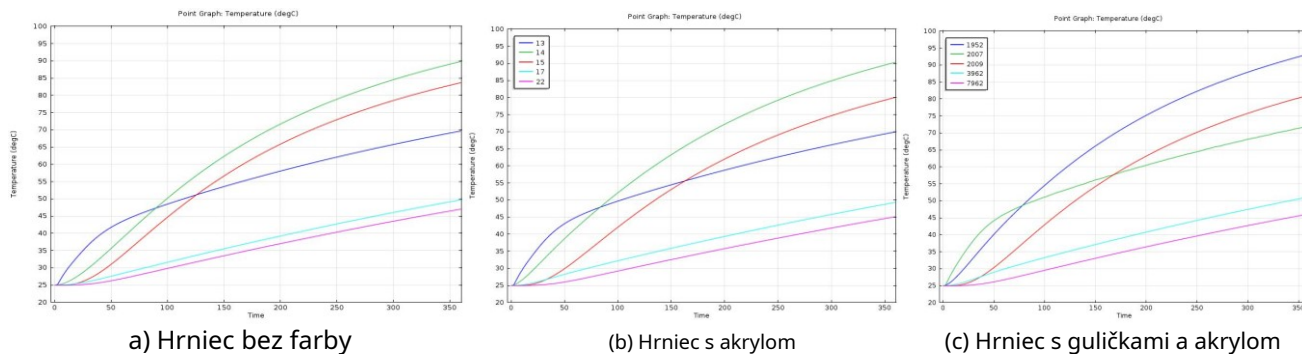
Obr.10 Výsledky výpočtu rozloženia teplôt pri ohreve tepelným zdrojom s výkonom 15 W. Zo záberov vyplýva, že v prípade (a) dochádza k výrazne vyššiemu ohrevu vrchnej časti hrnca, ktorý klesá v prípadoch (b) a (c). ). Nárast teploty je zreteľnejšie vidieť na grafoch nižšie.

Pomocou meracích bodov znázornených na obr. 9 je teraz možné graficky určiť teplotné krivky. Analogicky k experimentu Pankow ukázali zvýšenie teploty a priaznivé rozloženie teploty v prípade (c).

Záver : V tomto kroku sa skúmalo správanie rozptylu a odrazu s mikrogulôčkami v 3D modeloch. Takmer rovnomerné rozloženie teploty v interiéri, ktoré prispieva k blahu človeka, je možné dosiahnuť iba pomocou mikrogulôčok v akryle.

V troch simulovaných testovacích sériách, rovnako ako v Pankowovom experimente, je zreteľný nárast teploty vidieť iba v pravom grafe v porovnaní s dvoma ľavými grafmi. O niečo väčší je aj teplotný rozdiel medzi vnútornými a vonkajšími stenami. To viedlo k veľmi podobným výsledkom v tejto simulácii.

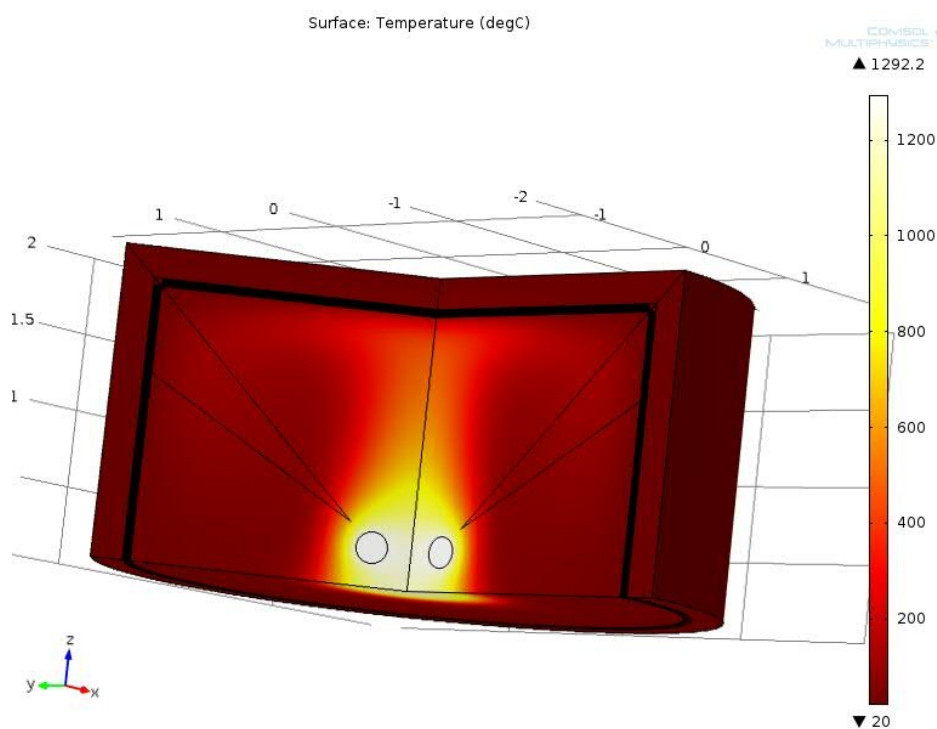
#### Teplotné profily po 5 minútach zahrievania



Obr.11 Výsledky výpočtu teplôt v uvedených meracích bodoch v troch vyššie popísaných prípadoch pri ohreve 15W vykurovacím zdrojom. Grafika ukazuje výrazné zvýšenie vnútorných teplôt za 6 minút zľava doprava a tiež menšie oteplenie vonkajšie meracie body zľava doprava.

Okrem dynamických výpočtov v priebehu 6 minút bol pre tri prípady vykonaný aj statický výpočet, ktorý určil konečný stav.

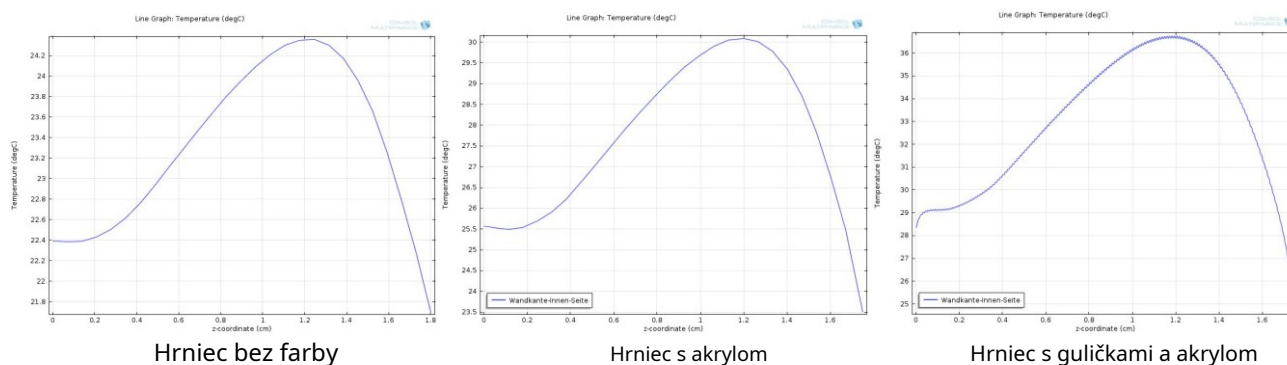
#### Statický výpočet ohrevu „kvetináča“



Obr.12 Reprezentatívny výsledok statického výpočtu teplôt so zobrazením diagonálnych čiar, pozdĺž ktorých bola určená výsledná teplota pre tri prípady.

Ako výsledok týchto výpočtov boli stanovené teplotné rozdiely stanovené v experimente aj pre tri prípady:

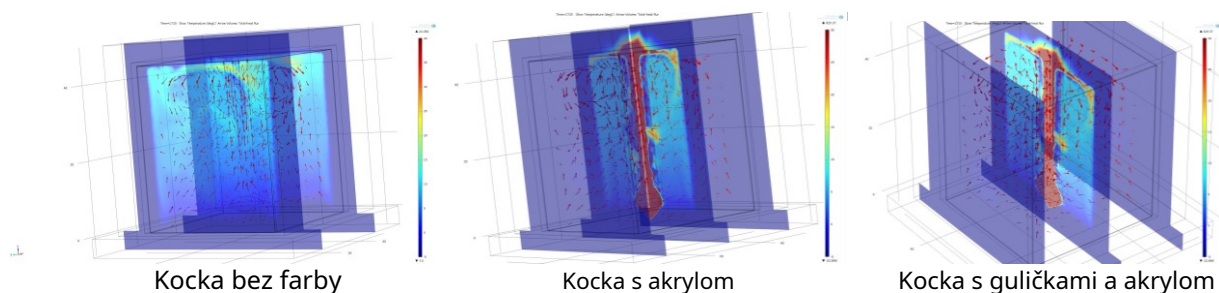
## Statický výpočet ohrevu „kvetináča“



Obr.13 Konečné teploty pozdĺž uhlopriečky nakreslenej na obr. 12 pre tri prípady farebnej krytiny v statickom výpočte. Tiež ukazuje stabilný nárast teploty zľava doprava podľa výsledkov experimentu Pankow. Všimnite si, že delenia stupnice pre prípady (a), (b) a (c) sú rôzne. V prípade (c) mikrogulôčky dávajú krivke miernu nadstavbu

Výpočty sa uskutočnili na overenie metódy FEM pomocou experimentálnych údajov. Tento experiment, ktorý sme tiež zopakovali, priniesol porovnateľné výsledky, takže prístup sa potvrdil. Mníchovský experimentálny postup bol podobný. Tento model bol úplne prerobený a vypočítaný v 3 rozmeroch. Takýto výpočet je mimoriadne zložitý kvôli veľmi vysokému počtu konečných prvkov, a preto bol vykonaný len pre prípad stien z pórobetónu (mníchovský experiment). Rovnaké experimentálne usporiadanie s drevenými stenami (Pergula Experiment) mení iba fyzikálne hodnoty materiálu steny. Na overenie programovania už preto nepomohlo, a preto sa nevykonalo.

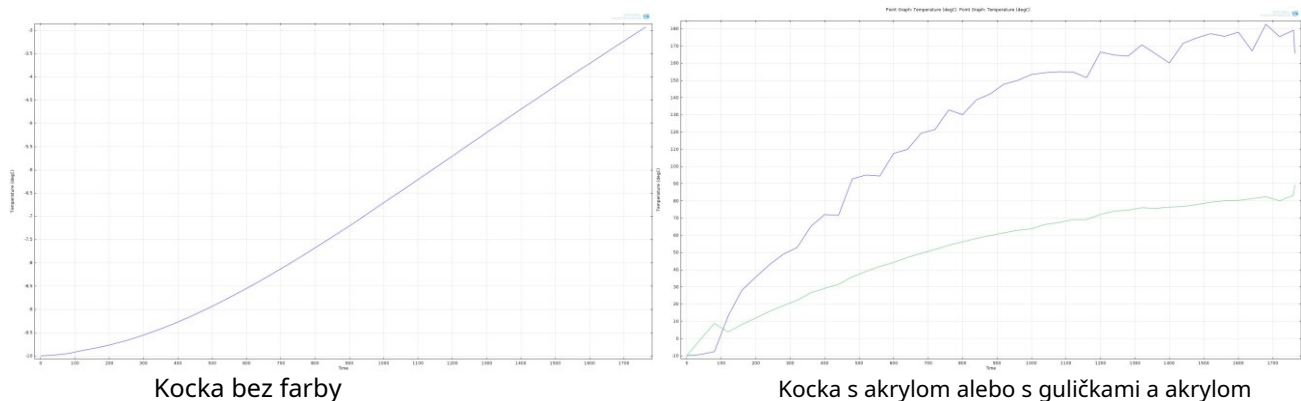
## Výpočet ohrevu izolovanej kocky Mníchovský experiment



Obr.14 Výpočet vykurovacieho experimentu vo vnútri kocky s 15 W zdrojom tepla a stenami z pórobetónu (a), navyše s akrylátovým náterom (b) a s náterom ClimateCoating (c). Podobne ako v prípade kvetináča došlo aj v interiéri k zvýšeniu teploty, najmä v prípade (c).



## Teplotné krivky v obnovenom mníchovskom experimente



Obr.15 Výpočet vykurovacieho experimentu vo vnútri kocky s 15 W zdrojom tepla a stenami z pórobetónu (a), navyše s akrylátovým náterom (b) a s náterom ClimateCoating (c). Podobne ako v prípade kvetináča došlo aj v interiéri k zvýšeniu teploty, najmä v prípade (c).

**Záver :** Oba experimenty sa dali zopakovať a poskytli konzistentné výsledky pre zvýšenie teploty. To dokázalo, že metóda FEM použitá s programom Comsol Multiphysics je platnou metódou na simuláciu skutočných tepelných procesov.

### 4.Výpočtový modul pre optimalizáciu rozloženia priemeru dutých keramických guľôčok (AP 4)

Fakturovateľný krok: Výpočty na zlepšenie vlastností spätného rozptylu v dôsledku pridania keramických guľôčok do farieb a počítačovo podporované výpočty na prispôsobenie farieb infračerveným ohrievačom (diskusia a prezentácia výsledkov) (Účtovateľný krok pre 10. projektový týždeň)

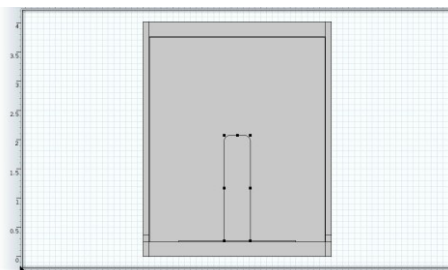
Po tom, čo bolo možné najprv určiť vlastnosti zmesi dutých guľôčok z hľadiska ich infračervených optických vlastností, konkrétne proces absorpcie hlavnej časti prichádzajúceho žiarenia, bola teraz skúmaná ďalšia časť farebných vlastností. Pri simulačnom prístupe v priečnom priestore bola vrstva farby rozdelená na dve časti a podľa pridania 50% vákuových guľôčok bola jedna polovica vrstvy farby (0,025 mm) naprogramovaná ako vákuová a druhá polovica (tiež 0,025 mm) ako akrylová farba. Tá bola aplikovaná na ľavú stranu modelu a na pravú stranu bola nanosená vrstva čistého akrylu s hrúbkou 0,3 mm. Pri stropnom sálacom ohrievači 30°C sa priečny priestor zahrieval z počiatočného stavu 10°C pre všetky komponenty počas jednej hodiny. Proces zahrievania počas fázy zahrievania v trvaní jednej hodiny bol vypočítaný pomocou figuríny osoby umiestnenej v miestnosti pri teplote 37 °C a tepelnom výkone 80 W. Na označených miestach boli k „osobe“ pripevnené meracie body, ktorých teplotné krivky bolo možné následne graficky vyhodnotiť.

Aby sa určil vplyv odrazových vlastností farby, boli uskutočnené tri testovacie pokusy s rôznymi odrazovými vlastnosťami pre obe strany farby.

Keďže náter má pozitívne vlastnosti aj v predchádzajúcich aplikáciách pre konštrukčné tepelné mosty, nad podlahou bol inštalovaný aj umelý studený most, ktorému bola pridelená vonkajšia teplota -10°C. Zároveň sa vo výpočtoch zisťoval priebeh prúdov vzduchu, čím sa zabezpečilo dodatočné rozpoznanie.

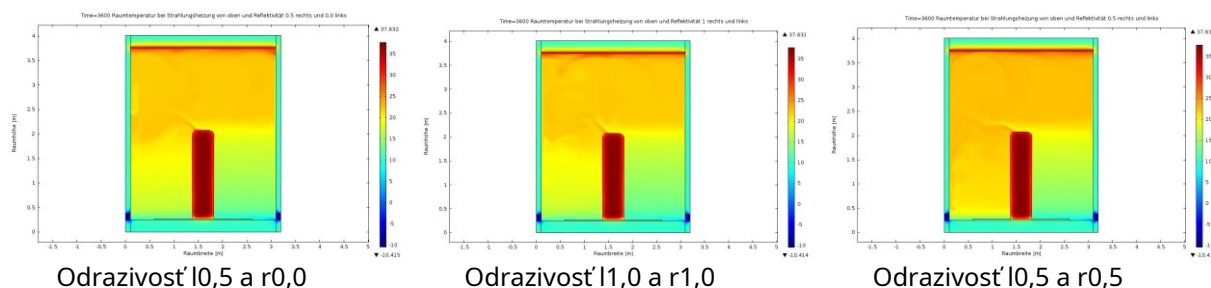
vyhral. Poskytovali informácie o sile, smere a turbulencii v rôznych častiach miestnosti.

Geometria pre skúšobné jazdy



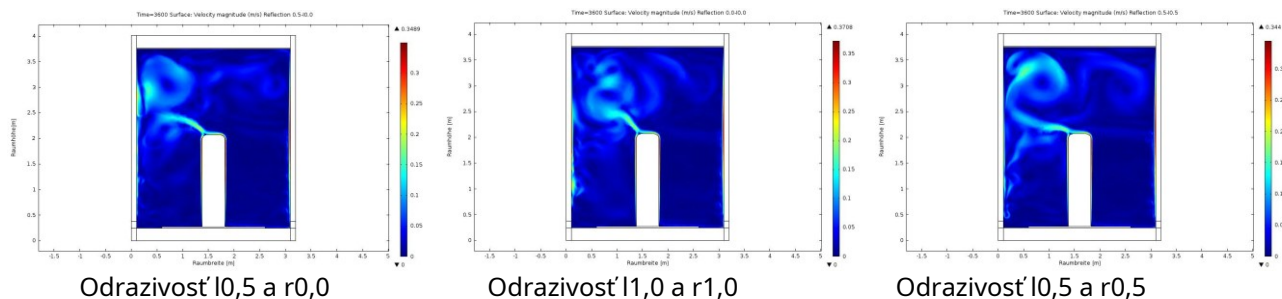
Obr. 16 Znáznorenie geometrie použitej v troch testovacích jazdách a meracích bodov na testovanej osobe.

Teplotné profily vykurovania priechnej miestnosti po jednej hodine vykurovania



Obr.17 Znáznorenie konečných teplotných profilov po hodinovom zahrievaní pre tri prípady odrazu vrstiev náteru. Farba ClimateCoating bola simulovaná vľavo a štandardná akrylová farba vpravo. Ľavá farebná vrstva pozostávala z polovice vákuovej vrstvy s tlakom 1/100 normálneho tlaku a polovice z akrylovej vrstvy. Vo všetkých troch prípadoch došlo k výrazne lepšiemu prehriatiu ľavej strany.

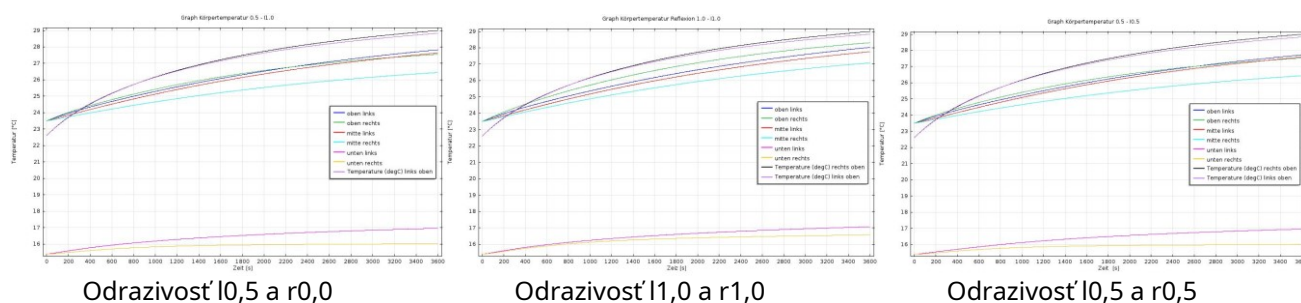
Prietokové profily vykurovania priechneho priestoru po jednej hodine vykurovania



Obr.18 Znáznorenie konečných profilov toku po hodinovom zahrievaní pre tri prípady odrazu vrstiev náteru. Farba ClimateCoating bola simulovaná vľavo a štandardná akrylová farba vpravo. Ľavá farebná vrstva pozostávala z polovice vákuovej vrstvy s tlakom 1/100 normálneho tlaku a polovice z akrylovej vrstvy. Vo všetkých troch prípadoch došlo v dôsledku rýchlejšieho ohrevu k výrazne vyššej turbulencii vzduchu na ľavej strane.

Teplotná krivka určená z týchto dynamických výpočtov ukazuje v grafe očakávané teplotné rozdiely v strede a pri nohách testovanej osoby. Na hlave sú teploty takmer rovnaké, pretože sú vyvážené prúdením vzduchu (pozri obr. 16)

### Telesná teplota testovaného subjektu



Obr.19 Znáznornenie teplotných kriviek na testovanej osobe v troch skúmaných prípadoch rôzneho odrazu farby. Jasne ukazujú viac zahrievania na ľavej strane počas zahrievacej fázy

Záver : Časť dôvodov na zlepšenie vnútornej klímy už mohla byť preukázaná v tejto štúdii. Spočíva v rýchlejšom ohreve tenkej akrylovej vrstvy v dôsledku tepelného tienenia, ktoré zabezpečuje vákuová vrstva. Významné zahrievanie na ľavej strane je spôsobené súvislou vrstvou vákua používanou v týchto štúdiách. Prináša však požadovaný výsledok možnej optimalizácie: Keďže vákuová izolácia prináša také výrazné zlepšenie, možno dosiahnuť výraznú optimalizáciu farby ClimateCoating zvýšením veľkosti vákuových guľôčok na rozsah rozptylu 50 - 250  $\mu\text{m}$ . Toto zvýšenie má za následok výrazné zvýšenie objemu vákua, podobne ako tu simulovaná súvislá vrstva. Zvýšenie odrazu farby ClimateCoating z faktora odrazu 0,5 na 1,0 spôsobilo aj mierne zvýšenie teploty, preto by sa tu v budúcnosti malo robiť aj experimenty. Výpočty teda mohli poskytnúť dôležité optimalizačné vyhlásenie aj tu!

### 5. Výpočty na zlepšenie vlastností spätného rozptylu (rozptyl Mie a spätný rozptyl v IR) vďaka pridaným keramickým guľôčkam vo farbách a počítačom podporované výpočty na prispôbenie farieb infračervenému žiareniu Sálavé ohrievače. (AP 5)

Fakturovateľný krok: Simulácie úspor energie na vykurovanie pomocou technológie termokeramickej membrány pre vnútorné a/alebo vonkajšie nátery budov (diskusia, prezentácia a animácia o prvých výsledkoch). 12. týždeň

Infračervené žiarenie a rozptyl možno opísať pomocou nasledujúcich fyzikálnych javov:

#### 1. Makroskopicko-deterministické javy:

- Na prenosovej ceste IR žiarenia možno energiu žiarenia rozdeliť na tri zložky: „odraz“, „absorpcia“ a „prenos“. „Odraz“, „prenos“, ale aj „lom“ a „difrakcia“ sú interferenčné efekty, ktoré možno podobne ako Mieov rozptyl (pozri 2.) opísať pomocou Maxwellovej teórie. Absorpciu je však potrebné zaradiť do 3.

#### 2. Mikroskopicko-deterministické javy

- Mieov rozptyl možno opísať interferenciou zo sekundárnych vĺn, ktoré sú excitované primárnou vlnou na rozhraniach medzi materiálmi s rôznymi elektromagnetickými vlastnosťami (Huygensov princíp).
- Fenomény rozhrania možno vysledovať späť k rozdielom v konštantách poľa použitých materiálov. V tomto prípade sú všetky materiály elektricky nevodivé a nemagnetické. Preto je permitivita (dielektrika) jediným materiálovým parametrom, ktorý spôsobuje Mieov rozptyl.

#### 3. Makroskopicko-štatistické javy

- Emisie z radiátora (v tomto prípade sú relevantné iba planckovské teplotné radiátory). V oblasti aplikácie náterových hmôt ClimateCoating sa predpokladal teplotný rozsah  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $120^{\circ}\text{C}$ . Spektrálny výkon alebo hustota energie nad 50 % maxima je v rozsahu vlnových dĺžok od cca 4 do 24  $\mu\text{m}$ . Tieto vlnové dĺžky spadajú do rozsahu rozmerov sklenených keramických guľôčok. Preto je predpoklad, že Mieho rozptyl je relevantný jav, spočiatku opodstatnený.
- Absorpcia zvyšuje teplotu absorbujúceho materiálu stimuláciou vnútorného pohybu (atómové/molekulárne priestorové oscilácie). Ako materiálnu vlastnosť možno absorpciu vyjadriť imaginárnou časťou komplexnej permitivity.

#### 4. Mikroskopicko-štatistické javy

- Permitivita je však silne závislá od vlnovej dĺžky a frekvencie v uvažovanej oblasti. Táto závislosť je spôsobená najmä atómovými a iónovými rezonanciami, ako aj orientačnou polarizáciou. Účinky sú vysoko závislé od molekulárneho zloženia a štruktúry materiálov. V IR oblasti možno elementárne interakcie vysvetliť kvantovo mechanickými interakciami medzi fotónmi a optickými fonónmi. Tie nie je možné vypočítať pre nedostatok údajov.

Najsilnejšie účinky elektromagnetického rozhrania sa vyskytujú v povlaku ClimateCoating medzi dutinou a sklokeramikou vložených guľôčok. Okrem frekvenčnej závislosti existujú len malé rozdiely v permitivite medzi sklokeramikou a akrylovou matricou. Účinok týchto rozhraní by sa preto mohol zanedbať.

Aby bolo možné simulovať Mieho rozptyl nezávisle od štrukturálnych vplyvov prostredia, simulácia bola simulovaná pre jednu sférickú dutinu (vákuum) v nekonečne expandovanom oxide kremičitom.

Tento model umožňuje

- presné kvantitatívne vyjadrenie smerovosti Mieho rozptylu v závislosti od pomeru vlnovej dĺžky k veľkosti objektu
- maximálne vyjadrenie smerovo závislých maxím a miním rozptylu
- dobrý odhad extrémnej hodnoty rozptylového efektu

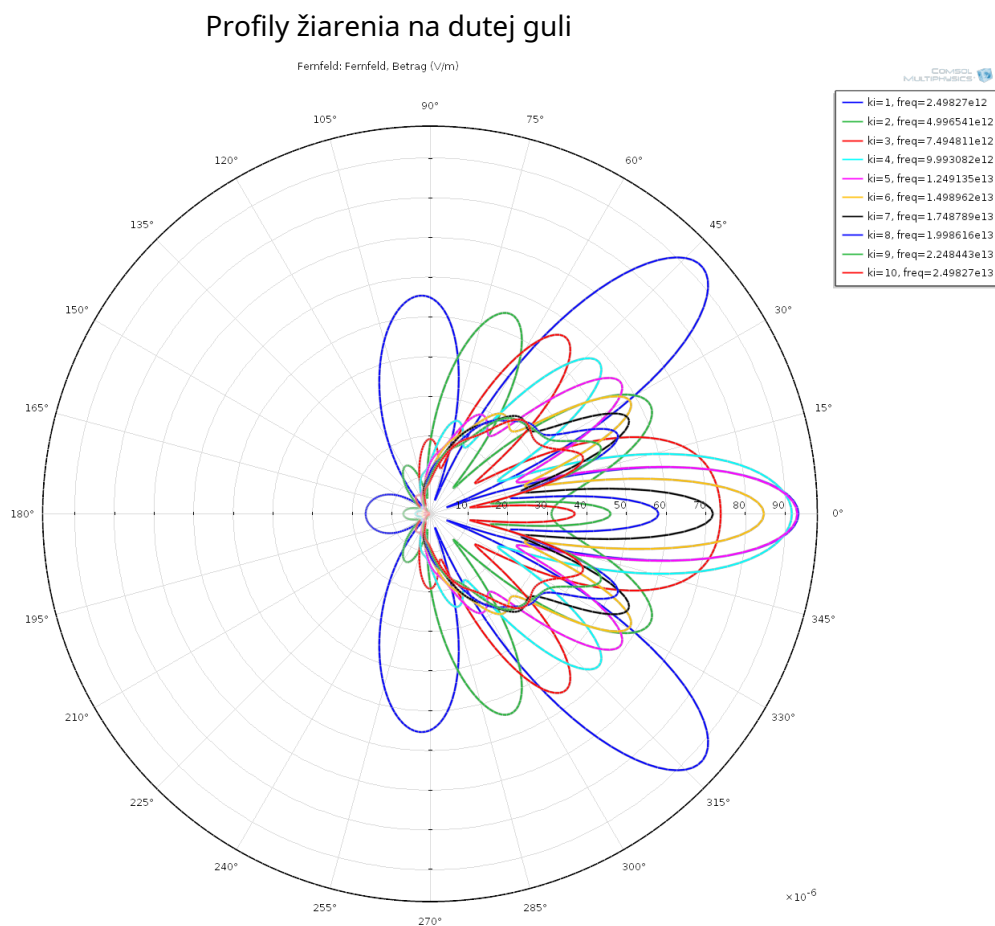
Pre primárne žiarenie bola použitá monofrekvenčná rovinná vlna s nekonečnou koherenčnou dĺžkou, ktorá pri dopade na materiálové rozhranie vybudí rušivé sekundárne vlny.

Na ilustráciu rozptylového efektu bolo brané do úvahy iba excitované sekundárne žiarenie, pretože v skutočnosti aj toto interferuje s primárnym žiarením a rozptylová charakteristika môže byť vytvorená len vágne alebo dokonca vôbec nerozlíšiteľná.

Keďže charakteristiky rozptylu nezávisia od absolútnej vlnovej dĺžky a veľkosti objektu, ale od ich pomeru, pre simuláciu bol zvolený priemer referenčnej gule 20  $\mu\text{m}$ . To znamená, že výsledky pre iné priemery možno preniesť pomocou jednoduchého škálovania vlnovej dĺžky.

Aby bolo možné analyzovať iba závislosti na geometrických vzťahoch, bola vykonaná simulácia s frekvenčne nezávislou permitivitou.

V rozptylových diagramoch bola silná závislosť od vlnovej dĺžky a veľmi výrazné minimá a maximá závislé od smeru. To tiež ukazuje zníženie smerovosti smerom k hraniciam pásma príslušného infračerveného rozsahu.



Obr. 20 2-D profily rozptýleného žiarenia pre vzdialené elektrické pole, keď rovinná vlna zasiahne a Dutá guľa s rôznymi vlnovými dĺžkami.

Najväčšie maximá rozptylu sa tvoria v smere ožarovania (zľava doprava), niektoré aj pod uhlom  $40^\circ$  k tomuto. Na druhej strane je spätné žiarenie proti smeru ožarovania veľmi nízke.

Najdôležitejším zistením však je, že ani v početných 3D hodnoteniach nie sú žiadne maximá rozptylu väčšie ako  $10^{-4}$  intenzita ožiareného poľa existovala. Pre výkony alebo energie žiarenia musí byť tento pomer umocnený na druhú, tj hustota rozptýleného výkonu je maximálne len  $10^{-8}$  primárne ožiarené množstvo. V praxi Mieho rozptyl pôsobí len ako veľmi malé narušenie homogenity primárneho žiarenia. Z energetického hľadiska má maximálny účinok na 8. mieste za desatinnou čiarkou, a preto sa ťažko zisťuje pomocou meraní.

Praktickú irelevantnosť Mieho rozptylu potvrdzujú aj nasledujúce skutočnosti a súvislosti:

- Rozptylové pole bolo vypočítané vo vzdialenosti polovice vlnovej dĺžky od rozhrania rozptylu. Na väčšie vzdialenosti sa intenzita rozptýleného poľa zodpovedajúcim spôsobom znižuje
- Nepriamy rozptyl na viacerých sférach je zodpovedajúci. Tu sa efekty reťazového rozptylu veľmi rýchlo znásobujú na extrémne malé rády.
- V inej simulácii bola modelovaná relatívne jednoduchá permitivita s komplexnou hodnotou s iónovou rezonanciou pri vlnovej dĺžke  $10\ \mu\text{m}$ , podobne ako pre  $\text{SiO}_2$  platí. To ukázalo, že výrazné minimá a maximá sa vyrovnali smerom k priemerným hodnotám.



- K ďalšiemu zvýšeniu efektu difúzneho rozptylu dochádza v dôsledku nepravidelného usporiadania a veľkosti guľôčok vo vrstve farby, čo znamená, že maximálny efekt rozptylu sa ďalej približuje k strednej hodnote.

Pri simulácii celkovej intenzity poľa bolo jasne viditeľné, že „ohniskové body“ sa už formovali vo vnútri alebo vonku blízko povrchu gule. Celkovo možno tiež konštatovať, že žiarenie z veľkého rozsahu priestorového uhla sa zaostruje do užšieho rozsahu priestorového uhla v smere šírenia.

Simulácia absorpčných vlastností vyžaduje podrobnejšie materiálové údaje, ktoré je možné určiť len pomocou meraní s prijateľným úsilím. To potom robí simuláciu zastaranou.

Záver : Prostredníctvom analýzy problému pre modelovanie Mieho rozptylu boli odhalené relevantné parametre Mieho rozptylu. V zásade sa Mie rozptyl dá dobre modelovať pre oblasť použitia a umožňuje jasné limitné odhady účinnosti Mieho rozptylu. Tieto ukazujú, že Mie efekt rozptylu nemá praktický význam pri vysvetľovaní účinnosti náteru ClimateCoating.

To vedie k záveru, že vlastnosti žiarenia sú určené hlavne priepustnosťou, absorpciou a odrazom na povrchu farby. Tenkou vrstvou farby prenikne relatívne vysoký podiel žiarenia. Zvyšná časť by mohla zahriať povrch farby absorpciou a silnými teplotnými gradientmi a spôsobiť, že bude pôsobiť ako teplotný žiarič. Toto je podporované vysokým tepelným odporom vďaka vloženým dutinám, výsledným zmenšeným prierezom a dlhšou dĺžkou dráhy v akrylovej matrici, ako aj nízkou tepelnou kapacitou.

## 6.Simulácie úspor energie na vykurovanie pomocou technológie termokeramickej membrány pre vnútorné a/alebo vonkajšie nátery budov. (AP 6)

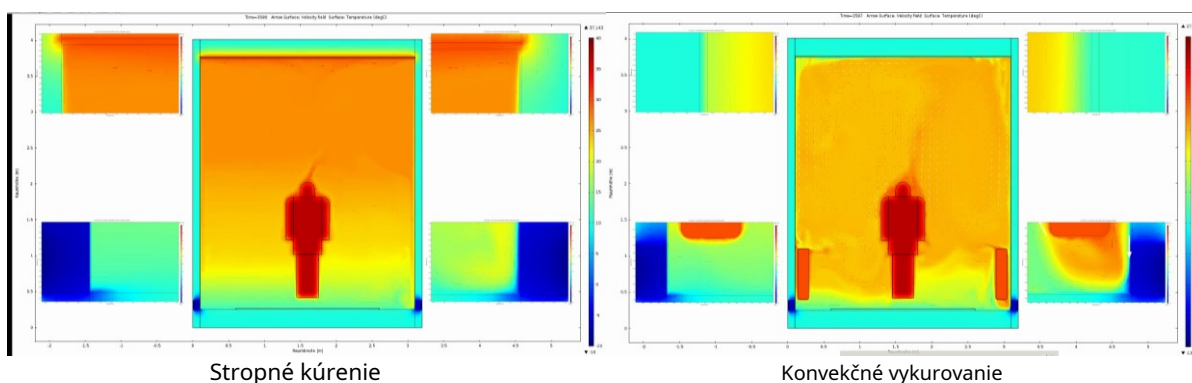
Fakturovateľný krok: Validácia výpočtov a animácií, prezentácia výsledkov  
14. týždeň

Na základe výsledkov vyššie uvedených predbežných prieskumov boli teraz vykonané kompletne simulácie izbovej klímy, ktoré objasnili funkčnosť farby a porovnali ju s funkčnosťou bežnej akrylovej farby.

Na tento účel, ako na obr. 15, bola ľavá strana s plne opísanými fyzikálnymi efektmi porovnaná s normálnou akrylovou farbou na pravej strane v dvoch simuláciách s konvenčným konvekčným vykurovaním a moderným stropným sálavým vykurovaním. Aby sa predišlo zaseknutiu na úrovni podlahy, testovaná osoba bola umiestnená vyššie, čo umožnilo výmenu blízko podlahy.

Teplotné rozdiely vpravo a vľavo sú jasne viditeľné. Pokojné prúdenie vzduchu je navyše vidieť v sálavom kúrení vľavo, ktoré má turbulencie len pri studenom moste vpravo. Naproti tomu konvekčné vykurovanie má relatívne vysokú úroveň turbulencií v celej miestnosti.

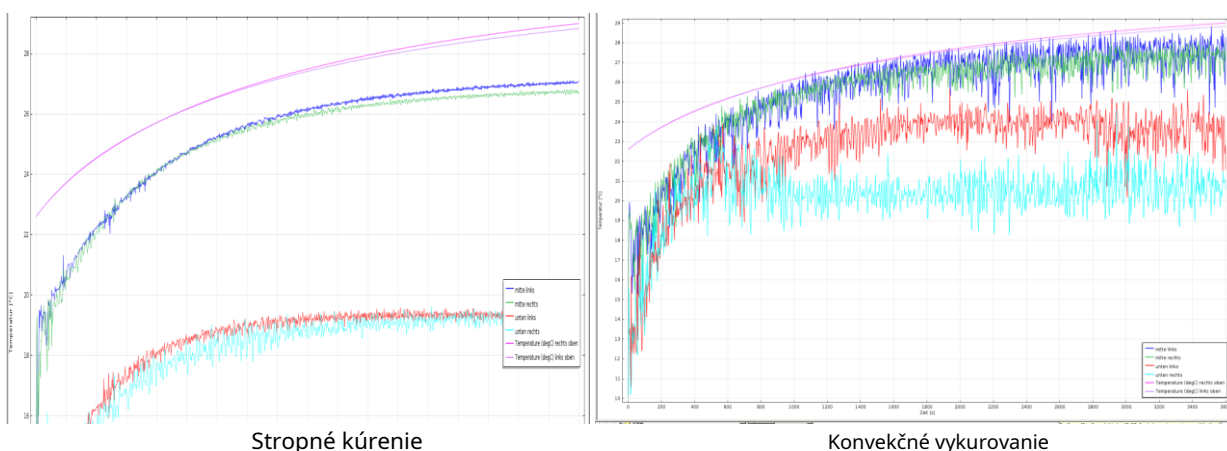
## Porovnanie teplotných profilov pre dva druhy vykurovania



Obr.21 Znáznornenie teplotných profilov v každej skúšobni s dvomi typmi ohrevu a s farebným náterom: vľavo - farba ClimateCoating, vpravo - akrylová farba, pričom obom farbám je priradený faktor odrazu 0,5. Detailné pohľady na oboch stranách odhaľujú teplotu náteru a teplotu vzduchu v hraničnej vrstve. Kým farba ClimateCoating sa už zohriala a tieni tak teplotu steny, ako aj teplotu studeného mosta, akrylová farba má po hodine výrazne nižšiu teplotu, rovnako ako susedná hraničná vrstva.

Vypočítané teploty sú na obr. 21 a znázorňujú očakávané rozdiely medzi pravou a ľavou stranou dole a v strede. Vo výške hlavy je rozdiel malý. Silné kolísanie nameraných hodnôt v prípade konvekčného vykurovania je spôsobené turbulenciou vzduchu.

## Telesná teplota testovaného subjektu



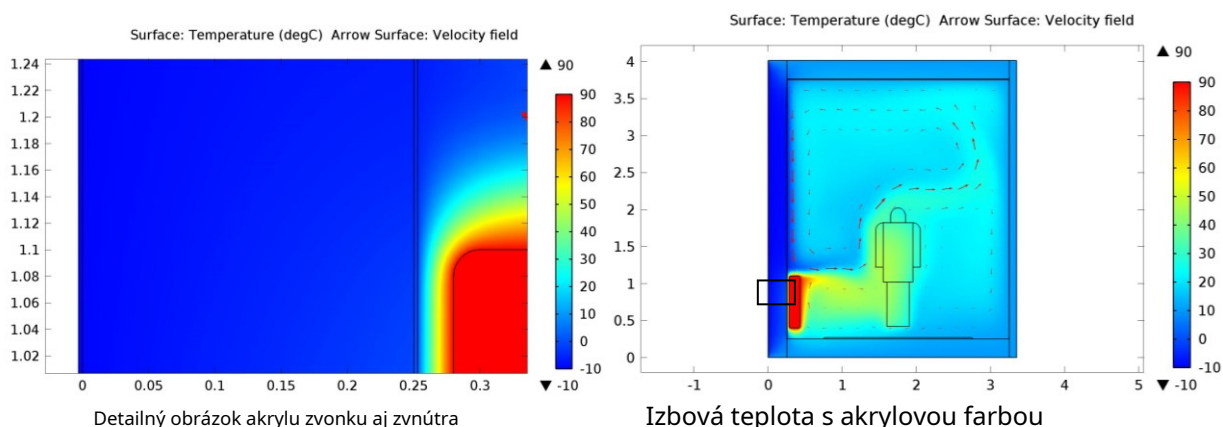
Obr. 22 Znáznornenie kriviek teplôt v skúšobni s dvomi typmi ohrevu a jednou farbou Vrstvenie: vľavo - farba ClimateCoating, vpravo - akrylová farba, pričom obidvom farbám je priradený faktor odrazu 0,5. V oboch prípadoch je mierny rozdiel medzi pravou a ľavou stranou, pričom konvekčný ohrev spôsobuje vyšší prítok vzduchu, čo vedie k väčšiemu kolísaniu nameraných hodnôt. Vyšší príjem žiarenia na strane ClimateCoating v dôsledku otepľovania povrchu ClimateCoating tu nie je znázornený.

Pomocou týchto ilustrácií sa dal efekt farby výborne vysvetliť. Ukazuje, ako sa ľavá strana ClimateCoating zahrieva vďaka svojej nízkej tepelnej kapacite, zatiaľ čo vďaka nízkej tepelnej vodivosti vytvára silný spád k stene pod ňou. Teplý povrch ľudia vnímajú ako príjemný a výrazne prispieva k dobrej atmosfére. Zároveň sa ukázalo, že ani studený most neprenikne na vnútorný povrch. Prúd chladu smeroval len do neizolovanej podlahy. Vrstva farby je teda schopná zabrániť vlhkosti, ktorá sa potom tvorí na studenom povrchu. To je ďalší dôležitý argument pre pozitívny účinok farby. Vykurovanie miestnosti dvoma druhmi vykurovania a jedným

Rôzne povrchové úpravy stien boli tiež vytvorené ako videá a prezentované spoločnosti na veľtrhu.

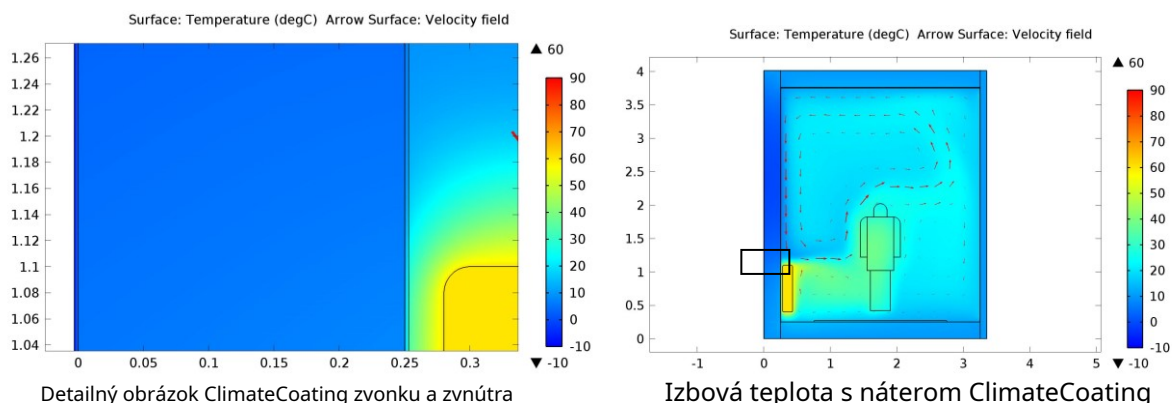
Ďalšie dôležité tvrdenie o vplyve náteru možno urobiť stanovením úspory energie na vykurovanie. Na tento účel boli vykonané dva výpočty MKP s modelom miestnosti, ktorý má vonkajšiu stenu vľavo a vonkajšiu teplotu  $-10^{\circ}\text{C}$ . Vnútri bol umiestnený konvekčný ohrievač, ktorý produkoval rôzny tepelný výkon rôznymi teplotami prívodu ( $90^{\circ}\text{C}$  alebo  $60^{\circ}\text{C}$ ). Dva modely dostali vrstvu akrylovej alebo ClimateCoating na vnútornej a vonkajšej strane vľavo. Konečný teplotný profil bol vypočítaný v statickom výpočte. Výkon potrebný v oboch prípadoch cez plochu radiátora pre takmer identický konečný stav bol potom použitý na určenie úspor energie pri vykurovaní týchto dvoch variantov miestností.

#### Izbový variant s akrylovým náterom vo vnútri a vľavo vonku



Obr.23 Znáznornenie kriviek teplôt v skúšobni s konvekčným vykurovaním a s farebným náterom akrylátovým náterom (faktor odrazu 0,5) na ľavej vonkajšej stene a v interiéri. Vonkajšia teplota je  $-10^{\circ}\text{C}$  a výstupná teplota radiátora je  $90^{\circ}\text{C}$ . V časti obrázka, ktorá je na pravom obrázku označená rámčekom, môžete vidieť úplné ochladenie vonkajšej steny a prúdenie studeného vzduchu, ktorý existuje na povrchu. Len vzduch obklopujúci testovanú osobu má teplotu cca  $24/25^{\circ}\text{C}$ .

#### Izbový variant s náterom ClimateCoating vo vnútri a vľavo vonku



Obr.24 Znáznornenie teplotných kriviek v skúšobni s konvekčným vykurovaním a s farebným náterom ClimateCoating náterom (faktor odrazu 0,5) na ľavej vonkajšej stene a v interiéri. Vonkajšia teplota je  $-10^{\circ}\text{C}$  a výstupná teplota radiátora je  $60^{\circ}\text{C}$ . V časti obrázka, ktorá je na pravom obrázku označená rámčekom, môžete vidieť teplotný gradient od vonkajšej farby k vonkajšej stene a vnútornej farby. Existuje v interiéri

žiadne povrchové prúdenie studeného vzduchu. Okrem toho sa miestnosť prehrieva rovnomernejšie s teplotou okolo 24/25°C.

Dva výpočty poskytli jasné informácie o vykurovacom výkone. Kým v prvej miestnosti bol na dosiahnutie rovnakého konečného stavu dosiahnutý výkon 108 W/m, v druhom prípade s náterom ClimateCoating bol potrebný výkon len 63 W/m. Výsledkom je úspora vykurovacej energie približne 40 % pri použití farby ClimateCoating.

Záver : Modelovaním interiérovej maľby farbou ClimateCoating na ľavej strane a akrylovou farbou na pravej strane by sa dal poskytnúť dôležitý dôkaz o funkcii farby, ktorá ukazuje izolačný efekt, rýchle zahrievanie na povrchu a vplyv prietok vzduchu v jednom porovnaní vľavo a vpravo. Okrem toho sa preukázala účinnosť studeného mosta, ktorý v štandardnom prípade vedie k vlhkému a teda plesnivému kútu.

V druhom porovnaní sa vypočítal vykurovací výkon potrebný na maľovanie vo vnútri a na jednej vonkajšej stene. Došlo k výraznej úspore energie na vykurovanie o viac ako 40 %.

## 7. Zhrnutie výpočtu a dokumentácia. (AP 7)

Fakturovateľný krok: redizajn a dokumentácia výsledkov

Vypracovanie záverečnej správy s dodaním správy a DVD

16. Kde týždeň

S týmto dokumentom sa predkladá záverečná správa. Poskytol jasné informácie o funkcii a účinku farby ClimateCoating. Na jednej strane spočíva v izolačnom účinku vákuových guľôčok a na druhej strane vo veľmi nízkej tepelnej kapacite vyplývajúcej z vysokého „riedenia“ farby vákuovými guľôčkami. To umožňuje, aby sa farba rýchlo zahriala ako od žiarenia, tak od vzduchu prúdiaceho okolo. To vytvára znateľný pocit pohody, pretože teplý povrch zároveň vyžaruje tepelné žiarenie. Ďalej v dynamickom výpočte súčasne demonštrovali priebeh prúdenia vzduchu pre rôzne druhy vykurovania a dva farebné varianty.

Odznali aj návrhy na optimalizáciu farebnosti, čo by malo spoločnosti veľmi pomôcť pri jej ďalšom rozvoji. To zahŕňa rozloženie veľkosti sklenených guľôčok, odrazivosť a po dohodnutých neskorších fyzikálnych meraniach aj možnosti štruktúrovania povrchu.

Keďže vytvorené dynamické výpočty poskytujú vynikajúce simulačné procesy, vznikla aj séria animačných videí, ktoré boli spoločnosti sprístupnené na reklamné účely.

## Súhrnný záver

Podarilo sa ukázať, že efekt farby vyplýva z dvoch podstatných vlastností. Vysoký podiel vákuových guľôčok v nátere spočiatku vytvára izolačný efekt, no zároveň vysoké riedenie obsahu akrylu vytvára výrazne nižšiu tepelnú kapacitu. Dopadajúce žiarenie je silne rozptýlené a vnútorne absorbované. Tieto vlastnosti (rozptyl a nasiakavosť v kombinácii s nízkou tepelnou kapacitou) majú za následok rýchle zahrievanie farby na povrchu a nízke vedenie tepla od chladného chrbta. Tým sa vytvorí teplejší povrch pre človeka v miestnosti, čím samozrejme aj človek získa teplejší povrch

vyžaruje tepelné žiarenie. Ľudia to vnímajú ako príjemné už pri malých nárastoch teploty a rýchlo tak vytvárajú príjemnú atmosféru. V spojení so sálavým vykurovaním je umožnené výrazné zníženie vykurovacieho výkonu. Zároveň vzniknú nižšie prúdenie vzduchu, pretože na studenej stene už nemôže vzniknúť vysoký klesajúci prúd. Ako je znázornené, studený most tiež vytvára izoláciu, ktorá zabraňuje vzniku vlhkého rohu. Preukázaním týchto želaných účinkov na vnútornú klímu a ich veľkého vplyvu s minimálnym úsilím môžeme hovoriť o farbe budúcnosti. Hoci je farba drahšia ako v súčasnosti dostupná akrylová farba, poskytuje nákladovo efektívnu a vysoko efektívnu alternatívu k drahým izolačným opatreniam v súčasnom stavebnom priemysle.