



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Stavebná fakulta

Ing. Adam Blažo

Autoreferát dizertačnej práce
Optimalizácia okenného profilového systému
na báze dreva pre aplikácie vákuového zasklenia

na získanie akademického titulu *philosophiae doctor, PhD.*

v doktorandskom študijnom programe:

3631 Teória a konštrukcie pozemných stavieb

v študijnom odbore: Stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Bratislava 2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

Predkladateľ: **Ing. Adam Blažo**

Katedra konštrukcií pozemných stavieb

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. et Ing. arch. Milan Palko, PhD.**

Katedra konštrukcií pozemných stavieb

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

(dátum rozoslania)

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa o h

na Katedre konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Abstrakt

Dizertačná práca sa zaoberá fyzikálno-konštrukčnou optimalizáciou okenných konštrukcií na báze dreva, zameranou na aplikáciu vákuových skiel, ktoré predstavujú inovatívne riešenie v oblasti sklených systémov. Hlavným cieľom práce je analyzovať integráciu vákuových zasklení do drevených a drevohliníkových okenných profilov s dôrazom na dosiahnutie optimálnych tepelnotechnických vlastností a zlepšenie funkčnosti okenných systémov. Výskum zahŕňa detailné testovanie prototypu okenných profilov v klimatickej komore, kde sa merali kľúčové parametre ako súčiniteľ prechodu tepla, lineárny stratový súčiniteľ a vnútorné povrchové teploty. Výsledky potvrdili zlepšenie tepelných vlastností pri aplikácii vákuových skiel. Okrem experimentálnych meraní práca obsahuje aj výpočty a simulácie, ktoré podporujú navrhované technické riešenia. Súčasťou práce je tiež analýza vplyvu rôznych tepelnoizolačných materiálov v detaile styku zasklenia a rámu v zasklievacej škáre. Na základe získaných poznatkov práca ponúka odporúčania na zlepšenie konštrukcie a návrhu okenných systémov.

Kľúčové slová: vákuové sklo, drevený rám, povrchová teplota, súčiniteľ prechodu tepla

Abstract

The dissertation focuses on the physical and structural optimization of wood-based window constructions, emphasizing the application of vacuum glazing, which represents an innovative solution in the field of glass systems. The main objective of the work is to analyze the integration of vacuum glazing into wooden and wood-aluminum window profiles, with an emphasis on achieving optimal thermal-technical properties and improving the functionality of window systems. The research includes detailed testing of window profile prototypes in a climate chamber, where key parameters such as thermal transmittance coefficient, linear thermal transmittance coefficient, and internal surface temperatures were measured. The results confirmed improvements in thermal performance when vacuum glazing was applied. In addition to experimental measurements, the work includes calculations and simulations that support the proposed technical solutions. The study also examines the impact of various thermal insulation materials in the detail of the interface between glazing and the frame within the glazing gap. Based on the findings, the dissertation offers recommendations for improving the design and construction of window systems.

Keywords: vacuum glazing, wood-based frame, surface temperature, thermal transmittance coefficient

1. Úvod

Tepelnotechnické požiadavky na stavebné konštrukcie sa neustále sprísňujú. Cieľom je zabezpečenie udržateľnosti prostredia v ktorom žijeme, a v ktorom budú žiť ďalšie generácie. Zo stavebného hľadiska je cieľom výstavba energeticky hospodárnych budov s nižšími nárokmi na vykurovanie, s ekologickým prístupom k výstavbe, nízkou spotrebou energetických zdrojov a s nízkou hodnotou produkcie skleníkových plynov CO₂.

Drevo, ako jeden z najstaršie používaných stavebných materiálov, predstavuje materiál veľmi využívaný v minulosti ale aj v súčasnosti na výrobu okien. Využitie domácej surovinovej základne, energetickej náročnosť samotného materiálu i celého výrobného procesu, prácnosť spojená s výrobou a modernizáciou okna počas životnosti a možnosť recyklácie zabezpečuje tomuto tradičnému materiálu širokú aplikáciu (nielen na výrobu okien) aj v budúcnosti (Bielek, 1987). Drevo má pri svojej hmotnosti nízky súčiniteľ tepelnej vodivosti. Nevýhodou dreva je jeho nevyhnutná ochrana proti vlhkosti, plesniam, organizmom a ohňu (Puškár et al., 2008). V súčasnej produkcii drevených okenných profilov prevláda kombinovanie

s viacerými materiálmi – zabudovanie účinnej tepelnej izolácie a aplikácia vonkajšieho ochranného hliníkového profilu.

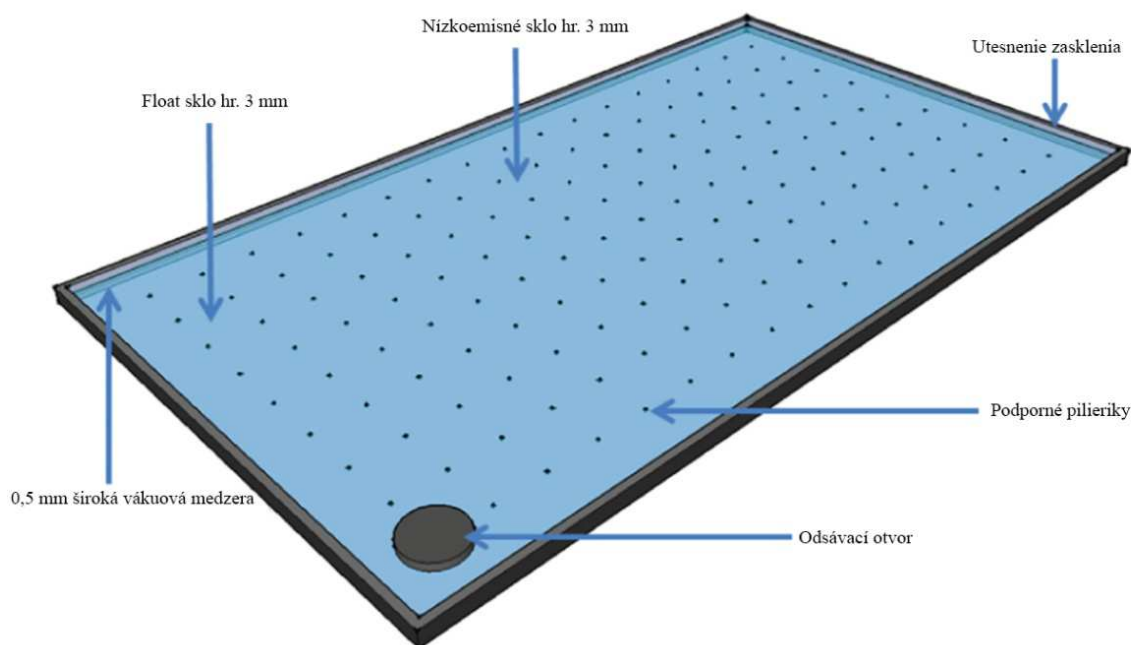
Súčasný vývoj v zasklievaní okien sa už nesústreďuje len na kombinácie skla s nízkoemisnými povlakmi. Moderné technológie umožňujú dosiahnuť lepšie vlastnosti už aj v oblasti priepustností slnečného žiarenia, akustiky, a pod. Veľký problém nastáva v snahe o spojenie všetkých týchto vlastností do jedného celku, keďže sa niektoré z týchto vlastností navzájom vylučujú. Výskum a vývoj sa pomaly sústreďuje na dynamické zasklenie, kde je možné nastaviť si parametre zasklenia podľa aktuálnych svetelných a teplotných podmienok (elektrochromické zasklenie, tieniace systém a iné).

Vákuové zasklenia predstavujú nový prístup v spôsobe konštrukcie zasklenia. Prvotná idea bola prvýkrát predstavená patentom od DI Zollera v roku 1913, avšak nebola vyrobená žiadna vzorka. V roku 1989 bol úspešne skonštruovaný prvý prototyp Robinsonom a Collinsom na univerzite v Sydney (Austrália). Tlak vo vákuu musí byť menší ako 0,1 Pa (atmosférický tlak 100 000 Pa), aby sa minimalizovala konduktívna a konvekčná zložka tepelného toku. Radiačná zložka tepelného toku sa eliminuje nízkoemisnými povlakmi (oxidy kovov) (Collins and Robinson, 1991). Prvé skúšobné výrobky vákuového skla mali okrajové tesnenie na báze sklenej spájky, ktoré sa vyrábali pri vysokých teplotách (Collins and Fischer-Cripps, 1991). Významný technologický pokrok nastal v roku 1998 na Univerzite v Ulsteri, kde Griffiths a Hyden vyvinuli nízko-teplotnú technológiu utesňovania (do 200 °C). Použitím zliatiny indiu a sekundárneho epoxidového tesnenia, umožnilo aplikáciu nízkoemisných vrstiev aplikovaných metódou katódového rozprašovania („soft coat“). Výsledná hodnota U_g zasklenia bola 0,86 W/(m²·K) (Griffiths et al., 1998). Existujú rôzne výskumy s hybridným vákuovým sklom, ktoré reprezentuje izolačné dvojsklo, kde je jedna tabuľa skla nahradená vákuovým sklom (Fang et al., 2013). Ďalšie výskumy sa zaoberali aplikáciou nízkoemisných vrstiev na vákuové „trojsklo“ (Fang et al., 2015). Súčasnými výzvami pri výrobe vákuového skla sú: zníženie nákladov na výrobu, eliminácia nebezpečných látok (Pb – olovo), zjednodušenie výroby a zabezpečenie dlhodobej stability vákuového prostredia vo vnútri skla a tým prináležiace udržanie hermetickosti a odolnosti voči absorpcií vlhkosti či úniku plynov (Memon and Eames, 2020). Rakúsky výskum sa sústreďuje na vývoj nových drevených okenných profilov pre aplikáciu vákuových zasklení. (Pont et al., 2022).

Praktická časť dizertačnej práce nadväzuje na teoretické poznatky v oblasti drevených a drevo-hliníkových okenných konštrukcií s dôrazom na integráciu vákuového zasklenia. Cieľom je overiť vplyv rôznych konštrukčných riešení na tepelnotechnické vlastnosti okien prostredníctvom experimentálnych meraní a numerických simulácií. Analyzované sú kľúčové parametre ako súčiniteľ prechodu tepla rámom U_f , lineárny stratový súčiniteľ Ψ_g a vnútorné povrchové teploty, ktoré sú dôležité z hľadiska hygieny vnútorného prostredia a rizika kondenzácie. Súčasťou praktickej časti je aj vývoj prototypu drevo-hliníkového okenného profilového systému, ktorého konštrukčné riešenie bolo priebežne optimalizované na základe výsledkov meraní v klimatickej komore a 2D simulačných analýz. Výsledky tejto časti zároveň slúžia ako podklad pre ďalší výskum a vývoj v oblasti efektívnej aplikácie vákuového zasklenia v okenných konštrukciách.

2. Súčasný stav riešenej problematiky

Vákuové zasklenie predstavuje inovatívny systém s výrazne redukovanými tepelnými stratami pri minimálnej konštrukčnej hrúbke. Prvý patent na tento typ skla bol udelený v roku 1913 (A. Zoller), no prvý funkčný prototyp vznikol až v roku 1989 na Univerzite v Sydney pod vedením prof. Robinsona a Collinsa. Štandardná konštrukcia pozostáva z dvoch sklenených tabúl, medzi ktorými je vákuum, pričom ich vzájomný odstup zabezpečuje sieť mikropilierikov. Tie zabráňujú deformácii tabúl pri odsatí vzduchu a sú rozmiestnené tak, aby neovplyvňovali optickú priehľadnosť. Hlavnou výhodou vákuového zasklenia je eliminácia konduktívnej a konvekčívnej zložky tepelného toku v medzisklenom priestore, zatiaľ čo radiačný tok je redukovaný aplikáciou nízkoemisného povlaku. Pre správne fungovanie vákuového zasklenia je potrebné, aby bol tlak vo vákuu nižší ako 0,1 Pa. Neskorší vývoj sa zameriaval na nové spôsoby utesňovania obvodu vákuového skla, zväčšenie rozostupu pilierikov, hybridnými vákuovým sklom, elektrochromickým vákuovým sklom, vákuovým trojsklom.



Obr. 2.1 3D schematické zobrazenie konvenčne vyrábaného vákuového zasklenia
(Cuce and Cuce, 2016)

Na okenné konštrukcie sú z fyzikálneho hľadiska kladené dve základné požiadavky – najnižšia vnútorná povrchová teplota výplní otvorov $\Theta_{si,w}$ a súčiniteľ prechodu tepla vonkajších otvorových konštrukcií U_w .

V našich lokálnych podmienkach sa začiatkom 20. stor. uplatňovali dvojité okná. Povojnový vývoj sa zameriaval na okná zdvojené – aplikácia v hromadnej panelovej výstavbe. V 70. rokoch 20. stor. bol v Nemecku zavedený jednotný Euro-program. Súčasné profilové riešenia drevených resp. drevohliníkových okien majú rôzne tvarové riešenia líšia sa najmä v prevedení funkčnej škáry, v počte tesnení, hrúbke a výške profilu, skladbe hranolu a v jeho povrchovej úprave. Sú vyrábané z hranolov, ktoré sú tvorené z 3, 4 alebo viacerých lamíel dreva. Súčasťou rámu býva aj účinná tepelná izolácia. Môžeme teda skonštatovať, že sme sa vývojom teda postupne vrátili k jednoduchšej geometrii okna pozostávajúcej z jedného rámu a jedného krídla.

3. Tézy dizertačnej práce

3.1 Predmet dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh optimálneho konštrukčného riešenia dreveného okenného rámu so zohľadnením požiadaviek na osadenie vákuového zasklenia. Pozornosť je zameraná na geometriu zasklievacej polodrážky. V teoretickej časti práce je spracovaný aktuálny prehľad materiálov a technologických postupov výroby drevených a drevohliníkových okenných rámov. Súčasťou práce je aj analýza vývoja zasklievacích systémov, pričom dôraz je kladený na vákuové zasklenie, jeho vlastnosti a potenciál využitia v stavebnej praxi.

3.2 Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je návrh nového optimalizovaného okenného rámu s možnosťou osadenia vákuového zasklenia.

Pre potreby splnenia cieľa dizertačnej práce budú musieť byť splnené čiastkové ciele:

- získanie vzoriek vákuového zasklenia
- analýza polohy umiestnenia vákuového zasklenia v drevenom ráme

- experimentálne laboratórne testovanie vzorky vákuového zasklenia v klíma-komore
- analýza a úprava geometrie drevo-hliníkového rámu pre osadenie vákuového zasklenia
- výroba prototypu drevo-hliníkového rámu a jeho následné testovanie v klíma-komore
- odporúčania a úprava

3.3 Metódy spracovania dizertačnej práce

Zoznam metód, ktoré boli použité v dizertačnej práci:

- teoretická analýza súčasného stavu danej problematiky;
- metóda počítačovej analýzy;
- metóda vedeckého experimentu v laboratóriu;
- vyhodnotenie výsledkov – porovnanie výsledkov z jednotlivých druhov analýz a odporúčania

3.4 Metodika dizertačnej práce

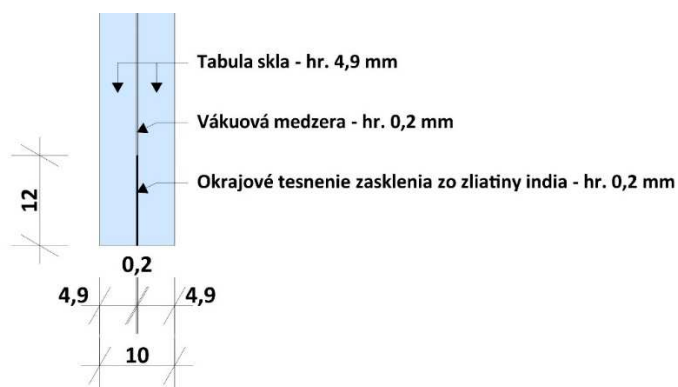
Dizertačná práca je metodicky a chronologicky členená na tieto časti:

1. Overenie simulačného programu THERM na určenie parametrov konštrukcie okna podľa metodiky normy STN EN ISO 10077-2: 2019 – určenie súčiniteľa prechodu tepla rámu U_f a určenie lineárneho stratového súčiniteľa v styku zasklenia a rámu Ψ_g
2. Simulačná analýza polohy umiestnenia vákuového zasklenia v rámci vybraného dreveného rámu – určenie súčiniteľa prechodu tepla rámu U_i , určenie lineárneho stratového súčiniteľa v styku zasklenia a rámu Ψ_g a vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu Θ_{si} .
3. Experimentálna analýza povrchových teplôt v osadení vákuového zasklenia v klíma – komore s tepelným izolantom a následne bez izolantu.
4. Určenie súčiniteľa prechodu tepla zasklením aplikovaného vákuového zasklenia v experimentálnej analýze.
5. Experimentálna analýza povrchových teplôt v osadení vákuového zasklenia v klíma – komore s tepelnými izoláciami na rôznej materiálovej báze.
6. Návrh a analýza rôznych konštrukčných tvarov drevených okenných rámov s osadeným vákuovým zasklením v simulačnom programe Therm.
7. Výrobná dokumentácia prototypu drevo-hliníkového okna s osadeným vákuovým zasklením.
8. Výroba prototypu konštrukcie okna a jeho následné testovanie vo veľkej klíma – komore.
9. Simulačná analýza aplikácie vákuového zasklenia inej konštrukcie do prototypu drevo-hliníkového okna.
10. Simulačná analýza aplikácie vákuového zasklenia rôznej konštrukcie do rôznych okenných profilov a následné porovnanie výsledkov.
11. Analýza celkových výsledkov a odporúčania.

4. Simulačné a experimentálne testovanie okenných konštrukcií

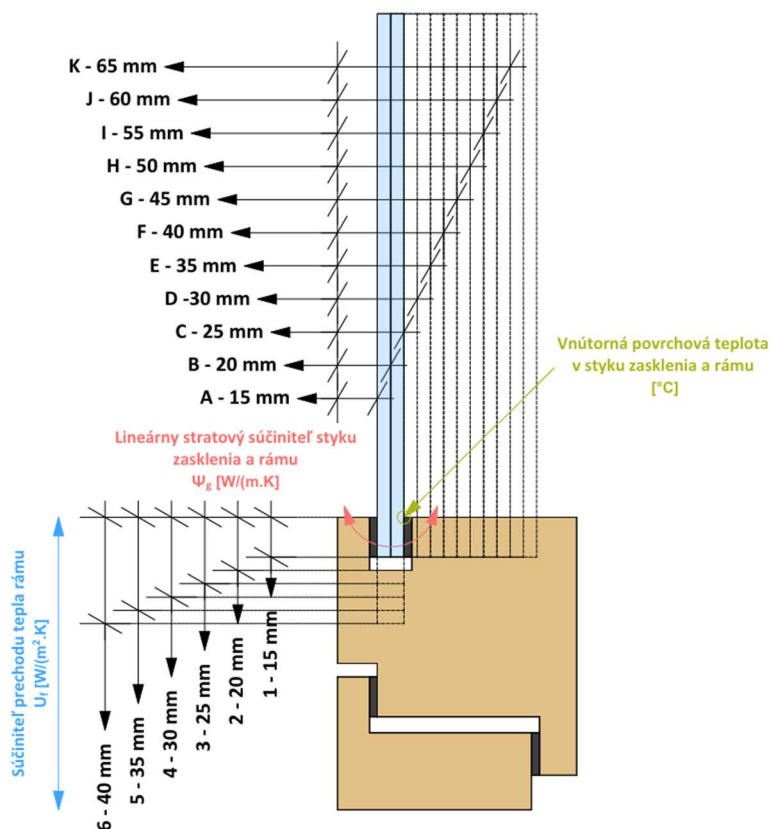
4.1 Simulačná analýza aplikácie vákuového zasklenia do dreveného rámu

Výpočtová 2D analýza sa sústreďí na aplikáciu vákuového zasklenia do dreveného okenného rámu z mäkkého dreva. Celková hrúbka vákuového skla je 10 mm. Pozostáva z dvoch skiel hrubých 4,9 mm a vákuovej medzery širokej 0,2 mm. Vákuové zasklenie parametrami zodpovedá výrobku od Beijing Synergy Vacuum Glazing Technology Co., Ltd., ktoré sa testovalo v priestoroch laboratória konštrukcií pozemných stavieb na Stavebnej fakulte STU v Bratislave v roku 2018. Štruktúra vákuového zasklenia pozostávala $T5 + V + TL5$, kde „T“ predstavuje 5 mm hrubé tepelne upravené sklo, „V“ reprezentuje vákuovú medzeru s hrúbkou od 0,15 do 0,2 mm, „TL“ popisuje tepelne upravené sklo s nízkoemisnou vrstvou. Výška okrajového tesnenia na báze zliatín kovov india je 12 mm. Pilieriky sú usporiadané v sieti 40 x 40 mm. Deklarovaná hodnota súčiniteľa prechodu tepla zasklením $U_g = 0,58 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ (Chmurný and Szabo, 2019).



Obr. 4.1 Schéma fragmentu vákuového zasklenia aplikovaného v 2D výpočtovej analýze

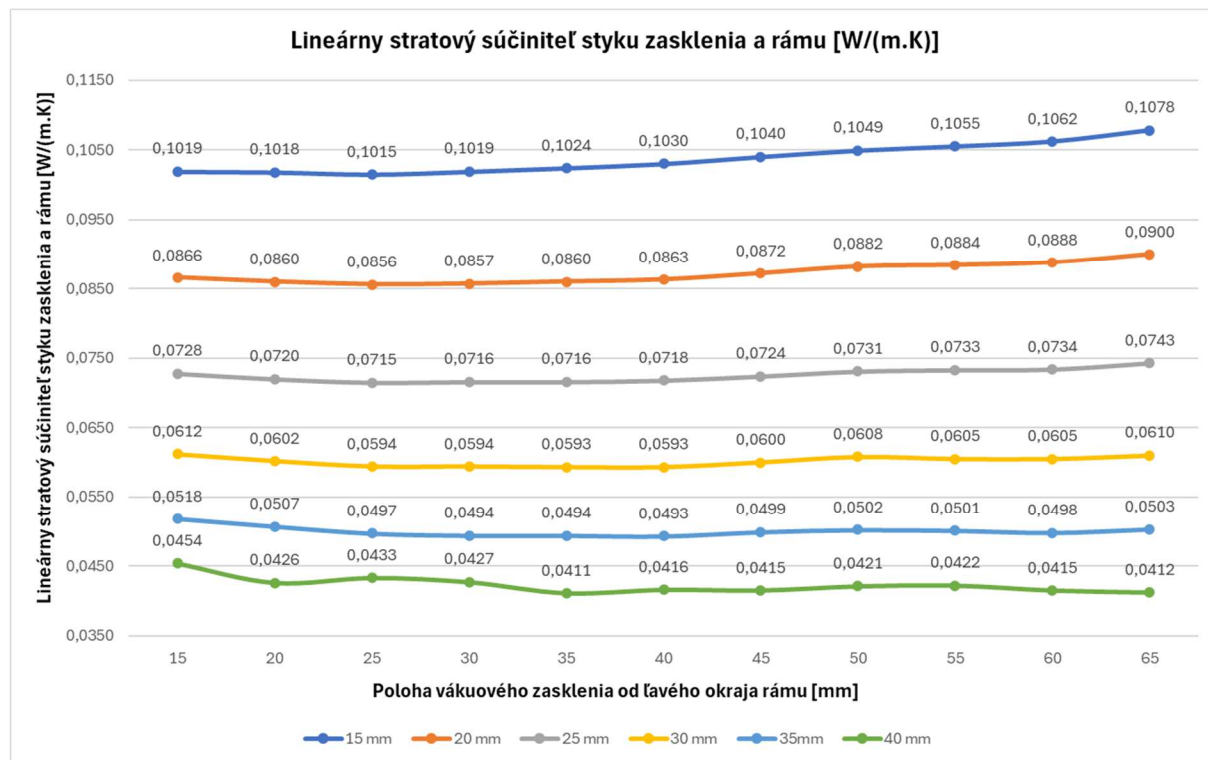
V rámci 2D výpočtovej analýzy sú sledované vypočítané hodnoty: Súčiniteľ prechodu tepla rámu U_f [$W/(m^2.K)$]; Lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu – Ψ_g [$W/(m.K)$]. Ďalej sú v 2D výpočtovej analýze porovnávané vnútorné povrchové teploty v styku zasklenia a rámu. Teplota v tomto mieste nesmie klesnúť pod teplotu rosného bodu tzn. $\Theta_{dp} = 9,26$ °C pri relatívnej vlhkosti vo vnútornom prostredí 50 %.



Obr. 4.2 Grafické znázornenie jednotlivých polôh osadenia vákuového zasklenia v drevenom okennom ráme „H.5–2.0“ spolu s naznačením sledovaných parametrov v 2D analýze

Najpriaznivejšia poloha osadenia vákuového skla vzhľadom na hodnotu súčiniteľa prechodu tepla rámom U_f v polohe „E6“ so súčiniteľom prechodu tepla rámu $U_f = 1,2369$ $W/(m^2.K)$ tzn. hĺbka osadenia tepelnoizolačného panela (reprezentujúceho vákuové zasklenie) je 40 mm a vzdialenosť od ľavého okraja okenného krídla je 35 mm. Tak ako aj pri vyjadrení súčiniteľa prechodu tepla rámu U_f [$W/(m^2.K)$] vychádza aj hodnota lineárneho stratového súčiniteľa Ψ_g [$W/(m.K)$] najpriaznivejšie v polohe „E6“ s hodnotou $\Psi_g =$

0,0411 W/(m.K). Lineárny stratový súčiniteľ mal vzhľadom na hĺbku osadenia približne konštantný priebeh bez ohľadu na to v akej vodorovnej polohe bol vyčíslený. Najvyššia povrchová teplota styku zasklenia a dreveného rámu je v polohe „K6“ s hodnotou 15,5 °C, tzn. hĺbka osadenia zasklenia je 40 mm a vzdialenosť od ľavého okraja rámu je 65 mm.



Obr. 4.3 Grafické vyjadrenie hodnôt lineárneho stratového súčiniteľa styku zasklenia a rámu Ψ_g [W/(m.K)]

4.2 Simulačná analýza povrchových teplôt v osadení vákuového zasklenia

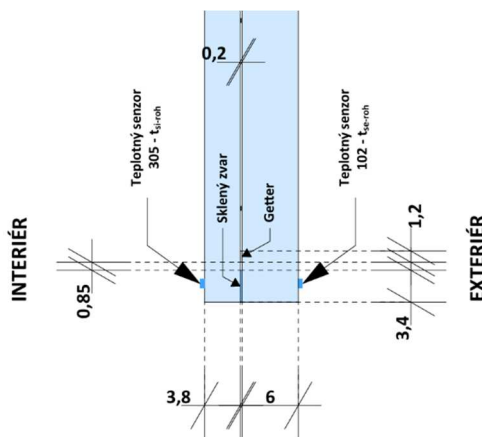
Pri tejto 2D výpočtovej analýze sa skúmal vplyv rôznych hrúbok tepelného izolantu na vnútornú povrchovú teplotu v styku zasklenia a rámu. V tomto prípade sa sklo osadilo do extrudovaného polystyrénu (XPS), ktorý reprezentuje časť maskovacieho panela klíma - komory – vychádzame z prípravy pre experimentálnu metódu.

Pre 2D výpočtovú analýzu na posúdenie hrúbok izolantu bolo do výpočtového modelu osadené vákuové sklo so známymi parametrami. (kapitola 4.2). Na základe výsledných teplôt sa určila hrúbka izolačného materiálu, ktorá sa aplikovala v experimentálnej metóde. Pri výpočtovej metóde sa skúmalo 35 variantov (5 x 7). Šírka izolantu je 10 až 30 mm. Výška izolantu reprezentuje výšku prekrytia zasklenia z exteriéru. V tomto prípade to je odstupňované od 10 do 40 mm v rozstupe po 5 mm.

Pri tejto 2D výpočtovej analýze môžeme na základe výsledkov skonštatovať, že šírka izolácie má marginálny vplyv na vnútornú povrchovú teplotu v styku zasklenia a rámu. Avšak oproti tomu výška prekrytia izolácie zohráva významnú úlohu pre tento sledovaný parameter. Na základe tejto analýzy boli stanovené rozmery izolantu aplikovaného v experimentálnej analýze – boli zvolená hrúbka izolácie 15 mm s výškou 15, 30 a 40 mm.

4.3 Experimentálna analýza povrchových teplôt v osadení vákuového zasklenia v klíma-komore s tepelným izolantom

Experimentálna analýza skúma osadenie vákuového zasklenia v laboratóriách Katedry konštrukcií pozemných stavieb Stavebnej fakulty STU v Bratislave. Zasklenie bolo osadené do klíma-komory. Aplikovaný je produkt vákuového zasklenie „FINEO“ od výrobcu AGC s rozmermi 980 mm (šírka) x 1280 mm (výška). Vákuové zasklenie pozostáva z dvoch tabúl o hrúbke 6,0 mm (exteriér) a 3,8 mm (interiér). Vákuová medzera je široká 0,2 mm. Okrajové tesnenie je realizované zo skleného zvaru. Výška zvaru v medzisklenom priestore je 3,8 mm. Ďalej je pri okraji zvaru situovaný líniový „getter“. Oproti iným produktom v tomto skle absentuje „odsávací“ otvor. Dištančné pilieriky sú umiestnené v sieti 20 x 20 mm. Súčiniteľ prechodu tepla zasklením uvádzaný výrobcom $U_g = 0,70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Obr. 4.5 Geometria okrajového tesnenia aplikovaného zasklenia

Riešená zóna reprezentuje fragment dĺžky 588 mm, ktorý predstavuje časť „okenného rámu“. Z vonkajšej strany je osadená izolácia na z termoplastickej peny na báze styrénu hrúbky 15 mm. Výška izolácie je 15, 30 a 40 mm. V tej istej polohe z vnútornej strany je aplikovaný drevený hranol hrúbky 45 mm z mäkkého dreva. Ako materiál bol zvolený smrek, keďže ide o najrozšírenejšiu drevinu využívanú pri výrobe drevených okenných profilov na Slovensku. Výška hranola je rovnako odstupňovaná ako pri izolácií, tzn. 15, 30 a 40 mm. Sledovanými parametrami boli okrem vnútornej povrchovej teploty v styku zasklenia a rámu aj teploty na povrchu zasklenia v mieste dištančných pilierikov resp. medzi pilierikmi, a to ako zo strany interiéru, tak aj exteriéru. Ďalej boli do meracej ústredne zanesené aj hodnoty teplôt vnútorného a vonkajšieho prostredia v klíma – komore. Na vzorke vákuového zasklenia bola z vnútornej strany umiestnená aj doštička (rozmery 100 x 30 mm - meracia časť 80 x 20 mm) na meranie hustoty tepelného toku q [W/m²]. Hlavným cieľom merania bolo porovnanie vnútorných povrchových teplôt v styku zasklenia a rámu v rôznych variantoch konštrukcie „ideového okenného rámu“, ale aj zistenie parametrov predmetnej vzorky vákuového zasklenia –súčiniteľ prechodu tepla zasklením U_g [W/(m².K)].



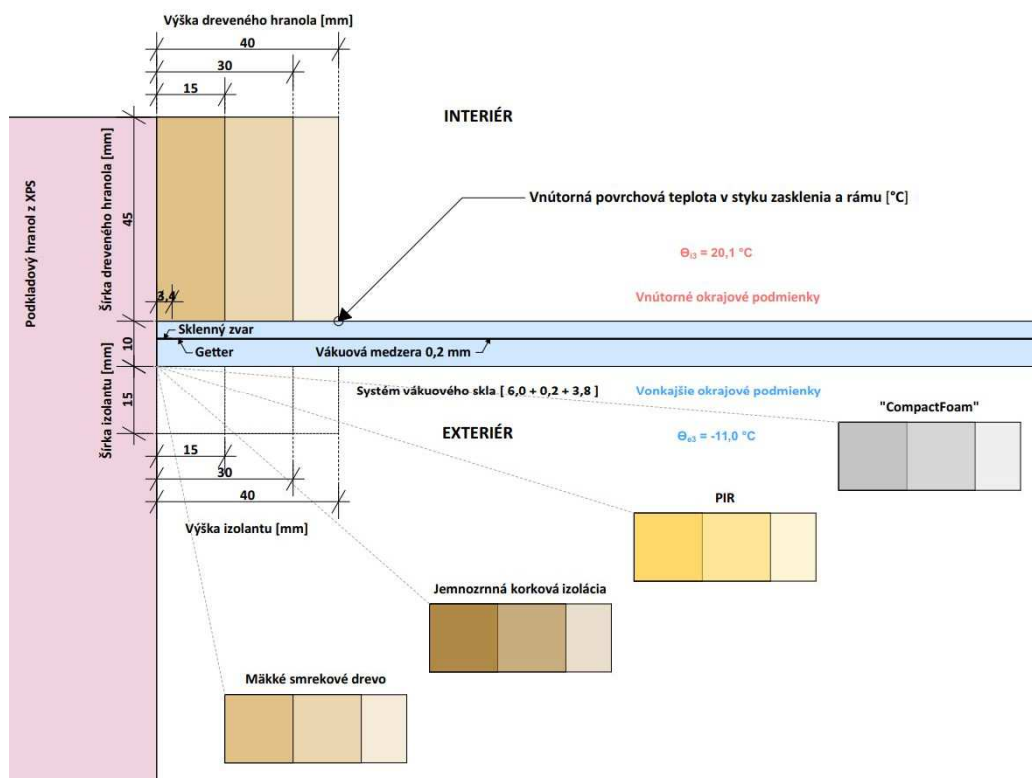
Obr. 4.6 Fragment dreveného hranola a izolácie, poloha doštičky a teplotných senzorov na vnútornej strane

Pri teplotnom rozdieli 21,42 K je vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu reprezentovaný hranolom s rozmermi š. 45 mm x v. 15 mm a s izoláciou s rozmermi š. 15 mm x v. 15 mm je 13,91 °C. Pri rovnakom teplotnom rozdieli je povrchová teplota v styku skla a rámu s rozmermi hranola š. 45 mm x v. 30 mm a s izoláciou s rozmermi š. 15 mm x v. 30 mm je 15,75 °C. Pri hranole s rozmermi š. 45 mm x v. 40 mm a s izoláciou š. 15 mm x 40 mm je vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu 17,11 °C. Pri teplotnom rozdieli 30,81 K je vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu s hranolom s rozmermi š. 45 mm x v. 15 mm a s izoláciou s rozmermi š. 15 mm x v. 15 mm je 10,91 °C. Pri hranole s rozmermi š. 45 mm x 30 mm a s izoláciou s rozmermi š. 15 mm x 30 mm je teplota v styku skla a rámu 13,56 °C. Pre hranol s rozmermi š. 45 mm x v. 40 mm a s izoláciou s rozmermi š. 15 mm x v. 40 mm bola

nameraná teplota v styku zasklenia a rámu 14,53 °C. Na základe nameraných teplôt môžeme skonštatovať, že vo všetkých prípadoch je zabezpečené to, že v styku zasklenia a rámu je teplota nad kritickou teplotou pre vznik rosného bodu ($\Theta_{dp} = 9,26$ °C). Z nameraných priemerovaných hodnôt povrchových teplôt vieme potvrdiť hypotézu z prechádzajúcej 2D výpočtovej analýzy, že výška prekrytia izoláciou má výrazný vplyv na povrchovú teplotu v styku zasklenia a rámu. Na základe meraní a odvodenia prestupových súčiniteľov bol určený súčiniteľ prechodu tepla zasklením meranej vzorky vákuového zasklenia $U_g = 0,824$ W/(m².K) pri teplotnom rozdieli 21,42 K.

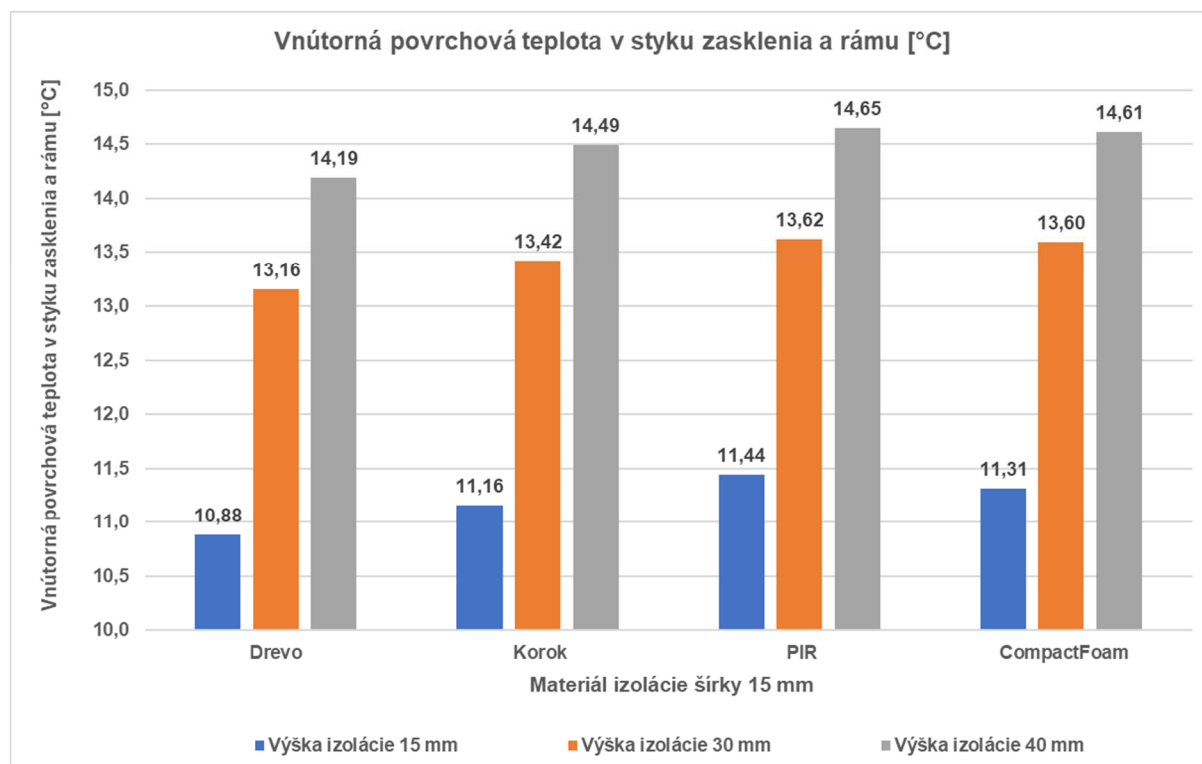
4.4 Experimentálna analýza povrchových teplôt v osadení vákuového zasklenia v klíma-komore s tepelnými izoláciami na rôznej materiállovej báze

Následne sa realizovalo opäť meranie na sledovanie vnútornej povrchovej teploty v styku zasklenia a rámu ale s použitím rôznych stavebných materiálov na vonkajšej strane zasklenia. Následne sa dané hodnoty porovnávali. Zistené dáta slúžili na kalibráciu 2D výpočtového simulačného modelu zasklenia v mieste okrajového tesnenia aplikovaného vákuového zasklenia. Použité materiály na vonkajšej strane reprezentovali vonkajšiu časť „ideového okenného rámu“. Na vonkajšiu stranu sa aplikovali postupne materiály v troch rôznych rozmeroch (šírka x výška) 15 x 15 mm, 15 x 30 mm a 15 x 40 mm. Použitými materiálmi boli: hranoly z mäkkého smrekového dreva, jemnozrná korková izolácia, PIR izolácia a už vyššie spomenutá izolácia z termoplastickej peny na báze styrénu „Compactfoam“.



Obr. 4.7 Schéma zobrazenia variantov prekrytia osadenia vákuového zasklenia v klíma - komore

Na základe výsledkov môžeme skonštatovať, že najlepší materiál z pohľadu vnútornej povrchovej teploty v styku zasklenia a rámu je materiál na báze PIR peny. Pri rozmeroch izolácie PIR s rozmermi v. 40 mm x š. 15 mm vychádzala teplota v sledovanom mieste 14,65 °C. S rovnakými rozmermi nasledovala izolácia „CompactFoam“ s teplotou v styku zasklenia a rámu 14,61 °C. Pri aplikácií jemnozrnnnej korkovej izolácií bola teplota v riešenom detaile 14,49 °C. Pri prekrytí skla z mäkkého smrekového dreva s rozmermi v. 40 mm x š. 15 mm vychádzala vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu 14,19 °C. Pri ďalších rozmeroch izolantov (v. 30 mm x š. 15 mm a v. 15 mm x š. 15 mm) umiestnených z vonkajšej strany ideového rámu sú výsledné namerané teploty vyjadrené v nasledujúcom stĺpcovom grafe:



Obr. 4.8 Grafické vyjadrenie vnútorných povrchových teplôt v styku vákuového zasklenia a vonkajšej izolácie zabudovanej do rámu na rôznej materiállovej báze zo strany interiéru v °C (merané hodnoty)

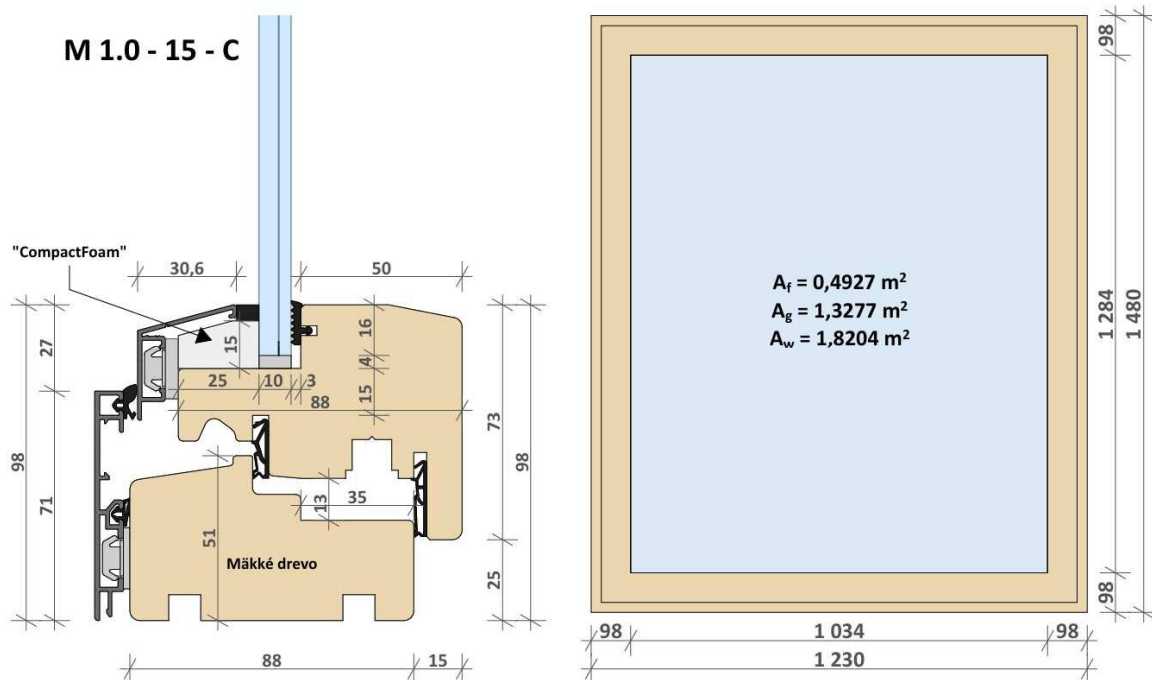
4.5 Prototyp drevo-hliníkové okna

Na základe všetkých meraní a simulácií sa pristúpilo k úprave drevo – hliníkového okenného rámu od výrobcu MINTAL s.r.o.. Na základe elektronickej, ale aj osobnej komunikácie sme postupne upravovali profil drevo-hliníkového okna, tak aby sa doň umiestnila vzorka vákuového zasklenia FINEO od výrobcu AGC. Boli objednané dve vzorky vákuového zasklenia – jedna slúžila na meranie a zistenie vlastností samotného zasklenia (overenie hodnoty súčiniteľa prechodu zasklením U_g [W/(m².K)]), povrchové teploty v rôznych miestach zasklenia pri rozdielnych teplotných rozdieloch vonkajšieho a vnútorného prostredia atď.) Druhá vzorka bola použitá na výrobu prototypu drevo-hliníkového okna. Ako bolo spomenuté v kapitole 4.8, rozmery vákuového skla boli 980 mm (šírka) x 1280 (výška).

4.5.1 Predvýrobné analýzy

Prvým krokom bolo zistenie vlastností prvotného profilového riešenia, tzn. súčiniteľ prechodu tepla rámom U_f [W/(m².K)], lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu Ψ_g [W/(m.K)], súčiniteľ prechodu tepla okna U_w [W/(m².K)]. Pri výpočte hodnoty Ψ_g a U_w je uvažovaná hodnota súčiniteľa prechodu tepla zasklením $U_g = 0,7$ W/(m².K) (hodnota prevzatá od výrobcu zasklenia – numericky vypočítaná hodnota ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti vákuovej medzery - $\lambda_{ekv-vak} = 0,000160$ W/(m.K)). Rozmer uvažovaného okna je 1,23 x 1,48 m, pohľadová šírka rámu je $b_f = 98$ mm. Pre porovnanie boli simulačne odvodené aj varianty s izolačnými materiálmi na rôznej materiállovej báze – mäkké drevo, korok, PIR a „CompactFoam“.

Okrajové podmienky vychádzajú z predmetnej normy STN EN ISO 10077-2: 2019: Tepelnotechnické vlastnosti okien, dverí a okeníc; Výpočet súčiniteľa prechodu tepla; Časť 2: Numerická metóda pre rámy Metodika uvedená v norme špecifikuje a uvádza referenčné vstupné údaje na výpočet súčiniteľa prechodu tepla rámových profilov U_f [W/(m².K)] a lineárneho stratového súčiniteľa v styku so zasklením Ψ_g [W/(m.K)]. Pri určení lineárneho stratového súčiniteľa uvažujeme so súčiniteľom prechodu vákuovým zasklením z nameranej a následne odvodennej hodnoty $U_g = 0,700$ W/(m².K).



Obr. 4.9 Geometria prvotného profilového riešenia profilu drevo-hliníkového od výrobcu Mintal s.r.o. okna „M1.0 – 15 - C“ s osadeným vákuovým zasklením „FINEO“ od výrobcu AGC, tepelný izolant „CompactFoam“

Tab. 01 Súhrn zisťovaných hodnôt pre rôzne varianty drevo-hliníkového rámu „M1.0 – 15“ s izoláciami na rôznej materiállovej báze, vákuové zasklenie – FINEO

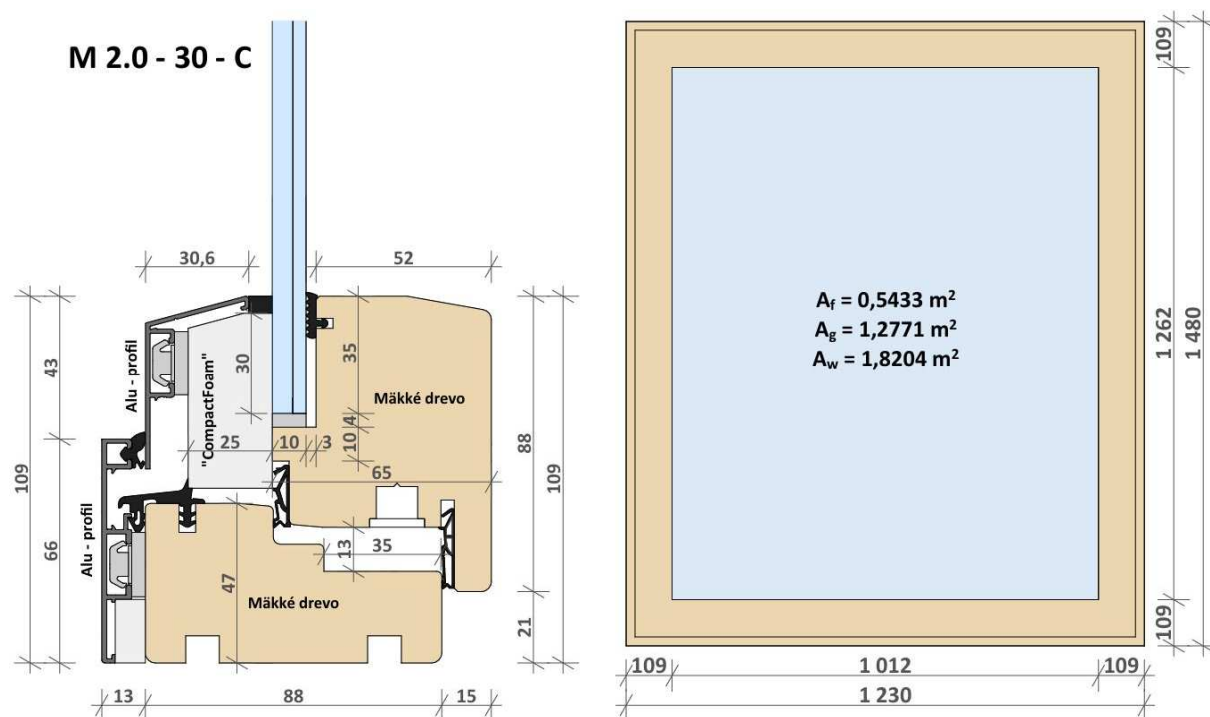
	Izolačný materiál	Tepelná priepustnosť rezu L_{20} [W/(m.K)]	Súčiniteľ prechodu tepla rámu U_f [W/(m².K)]	Súčiniteľ prechodu tepla zasklením U_g [W/(m².K)]	Tepelná priepustnosť rezu L_{w20} [W/(m.K)]	Lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu Ψ_g [W/(m.K)]	Súčiniteľ prechodu tepla okna U_w [W/(m².K)]	Vnútna povrchová teplota v styku zasklenia a rámu [°C]
FINEO 10 - "M 1.0 - 15" izolant v. 15 x š. 25 mm $b_f = 98$ mm, $b_p = b_g = 190$ mm $A_f = 0,4927$ m² $A_g = 1,3277$ m² $A_w = 1,8204$ m²	Mäkké drevo	0,5378	1,2338	0,7000	0,3187	0,0648	1,0095	11,40
	Korok	0,5332	1,1868	0,7000	0,3139	0,0646	0,9963	11,70
	PIR	0,5311	1,1647	0,7000	0,3123	0,0652	0,9918	11,80
	"CompactFoam"	0,5327	1,1809	0,7000	0,3135	0,0648	0,9952	11,70

Z danej analýzy vyplýva, že najlepšie hodnoty súčiniteľa prechodu tepla rámom U_f dosahuje pri aplikácii tepelnej izolácie na báze PIR, s hodnotou súčiniteľa prechodu tepla rámom 1,1647 W/(m².K), následne izolácia „CompactFoam“ s hodnotou $U_f = 1,1809$ W/(m².K). Pri aplikácii korkovej izolácie bola hodnota $U_f = 1,1868$ W/(m².K). Pre variant s použitím mäkkého dreva je hodnota súčiniteľa prechodu tepla rámom $U_f = 1,2338$ W/(m².K). Hodnota lineárneho stratového súčiniteľa Ψ_g bola numericky odvodená z údajov zo simulácie v rozmedzí od 0,0646 do 0,0652 W/(m.K). Vnútna povrchová teplota v styku zasklenia a rámu bola v závislosti od použitého izolačného materiálu v rozmedzí od 11,4 až 11,8 °C.

Základný koncept úpravy drevo-hliníkového okenného rámu vychádzal z eurohranolu triedy IV 88, tzn. hĺbka pevnej časti rámu je 88 mm. Okenné krídlo v ktorom je osadené predmetné vákuové zasklenie obsahuje tepelnú izoláciu „CompactFoam“, resp. iné tepelné izolácie, ktorá je umiestnená pred týmto zasklením. Na základe vyššie uvedenej teplotnej analýzy je zrejmé, že vplyv šírky tepelnej izolácie je menší ako je výška prekrytia okrajového tesnenia vákuového skla. To znamená, že výrazný vplyv na vnútornú povrchovú teplotu v mieste styku zasklenia a rámu má hĺbka osadenia takéhoto skla. Obmedzujúcim prvkom geometrie zasklievacej drážky okenného krídla bola hrúbka drevenej hmoty pod zasklením, ktorá musela byť min. 10 mm. Ďalšia dôležitá informácia poskytnutá od výrobcu bola minimálna šírka druhej komory (kde je umiestnené kovanie), ktorá nesmie byť menej ako 30 mm.

Na základe týchto parametrov boli simulačne (programe „THERM“) namodelované tri varianty modifikovaného „M1.0“ profilu. Do profilu bol osadený izolant so šírkou 25 mm. Výška prekrytia skla bola

v jednotlivých variantoch 15 mm (M2.0 – 15 - C), 30 mm (M2.0 – 30 - C) a 40 mm (M2.0 – 40 - C). Pri tejto analýze boli na základe údajov zo simulácie zistené nasledovné hodnoty: súčiniteľ prechodu rámu U_f [$W/(m^2.K)$], lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu Ψ_g [$W/(m.K)$], súčiniteľ prechodu tepla okna U_w [$W/(m^2.K)$]. Pri výpočte hodnoty Ψ_g a U_w je uvažovaná hodnota súčiniteľa prechodu tepla zasklením $U_g = 0,7 W/(m^2.K)$ (hodnota prevzatá od výrobcu zasklenia – numericky vypočítaná ekvivalentná hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti vákuovej medzery $\lambda_{\text{ekv-vak}} = 0,000160 W/(m.K)$). Rozmer uvažovaného okna je 1,23 x 1,48 m. Ďalším sledovaným parametrom je vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu s aplikáciou tepelnoizolačných materiálov na rôznej materiálovej báze – mäkké drevo, korok, PIR, „CompactFoam“. Viditeľná šírka panela resp. zasklenia je v oboch prípadoch rovnaká – $b_p = b_g = 190$ mm.



Obr. 4.10 Upravená geometria profilového riešenia profilu drevo-hliníkového okna „M2.0 – 30 - C“ s osadeným vákuovým zasklením na základe predchádzajúcich analýz, meraní a konzultácií s výrobcom Mintal s.r.o.

Hlavná úprava profilu spočívala v pohľadovej šírke pevnej časti rámu a zväčšení výšky okenného krídla z vnútornej pohľadovej strany. Uvedenými opatreniami bola zabezpečená adekvátna hĺbka osadenia vákuového zasklenia, ktorá umožňuje elimináciu nepriaznivých vplyvov okrajového tesnenia tohto typu zasklenia.

Hlavná úprava okenného rámu „FINEO - M1.0 – 15“ na drevo-hliníkový okenný rám „M2.0 – 15“, a aj v ostatných variantoch, bolo zväčšenie izolačnej plochy aj pod úroveň zasklievacej drážky. Prekrytie vákuového zasklenia izolantom je 15 mm. Hodnota súčiniteľa prechodu tepla rámom sa zlepšila v priemere o 0,1684 $W/(m^2.K)$. Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu bola lepšia o približne 1 °C v závislosti od použitého izolačného materiálu.

Hodnoty súčiniteľa prechodu tepla rámu pre drevo-hliníkový rám „FINEO - M2.0 – 30“ U_f [$W/(m^2.K)$] sa pri zvýšení prekrytia izoláciou (30 mm), na rôznej materiálovej báze pohybovali v rozmedzí od 0,9047 $W/(m^2.K)$ (PIR) do 1,1162 $W/(m^2.K)$. Hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa Ψ_g sa pohybovali v rozmedzí od 0,0327 $W/(m.K)$ (mäkké drevo) do 0,0375 $W/(m.K)$ (PIR). Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu bola v závislosti od použitého izolačného materiálu v rozmedzí od 14,30 °C (mäkké drevo) do 14,90 °C (PIR).

Tab. 02 Súhrn zisťovaných hodnôt pre rôzne varianty drevo-hliníkového upraveného rámu „M2.0“ s izoláciami na rôznej materiállovej báze a rôznych rozmerov, vákuové zasklenie – FINEO

	Izolačný materiál	Tepelná priepustnosť rezu L_{2D} [W/(m.K)]	Súčiniteľ prechodu tepla rámu U_f [W/(m ² .K)]	Súčiniteľ prechodu tepla zasklením U_g [W/(m ² .K)]	Tepelná priepustnosť rezu L_{2D} [W/(m.K)]	Lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu Ψ_g [W/(m.K)]	Súčiniteľ prechodu tepla okna U_w [W/(m ² .K)]	Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu [°C]
FINEO 10 - "M 2.0 - 15" izolant v. 15 x š. 25 mm $b_f = 94$ mm, $b_p = b_g = 190$ mm $A_f = 0,4741$ m ² $A_g = 1,3463$ m ² $A_w = 1,8204$ m ²	Mäkké drevo	0,5268	1,1688	0,7000	0,2981	0,0553	0,9639	12,30
	Korok	0,5144	1,0370	0,7000	0,2873	0,0568	0,9334	12,70
	PIR	0,5081	0,9700	0,7000	0,2831	0,0589	0,9214	12,80
	"CompactFoam"	0,5128	1,0201	0,7000	0,2861	0,0572	0,9300	12,70
FINEO 10 - "M 2.0 - 30" izolant v. 30 x š. 25 mm $b_f = 109$ mm, $b_p = b_g = 190$ mm $A_f = 0,5433$ m ² $A_g = 1,2771$ m ² $A_w = 1,8204$ m ²	Mäkké drevo	0,5386	1,1162	0,7000	0,2873	0,0327	0,9059	14,30
	Korok	0,5238	0,9801	0,7000	0,2744	0,0345	0,8698	14,70
	PIR	0,5155	0,9047	0,7000	0,2691	0,0375	0,8548	14,90
	"CompactFoam"	0,5217	0,9609	0,7000	0,2729	0,0352	0,8658	14,70
FINEO 10 - "M 2.0 - 40" izolant v. 40 x š. 25 mm $b_f = 119$ mm, $b_p = b_g = 190$ mm $A_f = 0,5883$ m ² $A_g = 1,2321$ m ² $A_w = 1,8204$ m ²	Mäkké drevo	0,5471	1,0943	0,7000	0,2852	0,0220	0,8814	15,00
	Korok	0,5302	0,9517	0,7000	0,2708	0,0246	0,8417	15,40
	PIR	0,5203	0,8689	0,7000	0,2648	0,0284	0,8243	15,50
	"CompactFoam"	0,5277	0,9309	0,7000	0,2692	0,0254	0,8370	15,40

Z tabuľky je evidentné, že najlepšie hodnoty súčiniteľa prechodu tepla rámom U_f [W/(m².K)] dosahujú drevo-hliníkové rámy „FINEO - M2.0 – 40“ s izolačnými materiálmi, ktoré pokrývajú vákuového zasklenie izoláciou 40 mm vysokou. Hodnoty U_f boli v rozmedzí od 0,8689 W/(m².K) (PIR) do 1,0943 W/(m².K) (mäkké drevo). Hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa Ψ_g sa pohybovali v rozmedzí od 0,0220 W/(m.K) (mäkké drevo) do 0,0284 W/(m.K) (PIR). Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu bola v závislosti od použitého izolačného materiálu v rozmedzí od 15,00 °C (mäkké drevo) do 15,50 °C (PIR).

Na základe výsledkov z vyššie uvedenej tabuľky sa zvolil profil, ktorý sa následne dal do výroby – profil M2.0 – 30 – C – s hĺbkou osadenia vákuového zasklenia 30 mm. Aj keď hodnota v rámci simulácie nedosahovala požadovanú hodnotu pre súčiniteľ prechodu tepla oknom $U_{w,r2} = 0,85$ W/(m².K), sme sa na základe konzultácie s výrobcou rozhodli, že daný prototyp vyrobíme a meraním overíme daný predpoklad. Na základe výsledkov meraní bolo predmetom ďalšieho skúmania opätovná optimalizácia detailu zasklievacej drážky.

Konštrukciu detailu zasklievacej drážky prototypu drevo-hliníkového okenného profilu tvorí plastová podložka pod vákuové zasklenie výšky 4 mm. Pred vákuovým zasklením je umiestnená tepelná izolácia na báze „CompactFoam“ s rozmermi š. 25 mm x v. 52 mm (prekrytie 30 mm). Vákuové zasklenie je z pohľadu exteriéru osadené 35 mm od hrany vonkajšieho silikónového tesnenia. Z vnútornej strany je zasklenie zastabilizované tesniacím a dištančným profilom na báze EPDM gummy.

Pre drevo-hliníkový rám „M2.0 – 30 - C“ vyšiel s danými okrajovými podmienkami a aplikovanými materiálmi súčiniteľ prechodu tepla rámu $U_f = 0,9609$ W/(m².K). Lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu bol numericky vyčíslený $\Psi_g = 0,0352$ W/(m.K) s aplikáciou vákuového zasklenia so súčiniteľom prechodu tepla zasklením $U_g = 0,7000$ W/(m².K). Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu je 14,7 °C.

4.5.2 Meranie v klíma – komore

Meranie prototypu prebiehalo v klíma-komore s cieľom zistenia súčiniteľa prechodu tepla okna U_w [W/(m².K)] pri teplotnom rozdieli ± 20 K s prisunutým „HOT-BOXom“. Toto zariadenie presnejšie simuluje vnútorné prostredie v reálnych podmienkach. Na základe výrobných dokumentácie sa vyrobila vzorka s menšími odchýlkami v jednotkách mm. Celkové rozmery vyrobeného prototypu boli šírka 1130 mm, oproti 1128 mm, a výška 1430 mm, oproti 1428 mm.



Obr. 4.11 Osadenia prototypu drevo-hliníkového okna zo strany exteriéru (vľavo – studená komora klíma-komory) a interiéru – (vpravo - teplá komora klíma-komory) s teplotnými senzormi a doštičkou na meranie hustoty tepelného toku vákuovým zasklením

Z nameraných povrchových teplôt na tepelných senzoroach umiestnených na rôznych miestach drevo-hliníkového rámu a vákuového zasklenia sa numericky vypočítali na základe váženého priemeru, priemerné povrchové teploty na vnútornej a vonkajšej strane prototypu okna. Na základe týchto spriemerovaných povrchových teplôt sa stanovili odpory pri prestupe tepla na vnútornej R_{si} [(m².K)/W] resp. vonkajšej strane konštrukcie R_{se} [(m².K)/W].

Na základe odvodených prestupových súčiniteľov bola numericky vypočítaná normalizovaná hodnota súčiniteľa prechodu tepla prototypom okna – $U_{okno,st} = 0,8681$ W/(m².K). Keďže na základe požiadavky normy „STN 73 0540-2 + Z1 + Z2: 2019, Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov Časť 2 Funkčné požiadavky. Konsolidované znenie“ musí okenná konštrukcia spĺňať hodnotu – $U_w \leq U_{w,r2} = 0,85$ W/(m².K). Avšak podľa pozn. 5 – Požiadavky platia pre vonkajšie okná s plochou aspoň 1,8 m², okná menšej plochy, ktoré nespĺňajú požadované hodnoty, musia byť zhotovené z rovnakých komponentov ako okná spĺňajúce požiadavky.

Z tohto merania si z doštičky (senzor „301“) odčítame hustotu tepelného toku zasklením, ako údaj potrebný na výpočet súčiniteľa prechodu tepla zasklením $U_{g-tok-okno}$ [W/(m².K)]. Výpočet je vyjadrený rovnicou definovanou podielom hodnoty hustoty tepelného toku s rozdielom teplôt vnútorného a vonkajšieho prostredia. Teplota vonkajšieho prostredia bola $t_{ae} = 1,69$ °C a teplota vnútorného prostredia bola $t_{ai} = 22,65$ °C. Hustota tepelného toku zasklením bola pri teplotnom rozdieli medzi vonkajším a vnútorným

priestorom 20,96 K $\rightarrow q_{g\text{-}tok\text{-}okno} = 15,82 \text{ W/m}^2$. Na základe výpočtu bola odvodená hodnota súčiniteľa prechodu tepla zasklením $U_g = 0,755 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Na základe numerickej a experimentálnej metódy vieme porovnať hodnoty súčiniteľa prechodu tepla okennou konštrukciou. Na základe vyššie uvedených hodnôt bol numerickou metódou stanovený výsledný súčiniteľ prechodu tepla oknom s rozmermi 1,23 x 1,48 m, a to vo výške $U_w = 0,7909 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

V simulačnej 2D analýze sa zistilo, že hodnota súčiniteľa prechodu tepla okennou konštrukciou je $U_w = 0,8658 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, avšak vstupnými parametrami boli:

- Súčiniteľ prechodu tepla rámom $- U_f = 0,9609 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
- Súčiniteľ prechodu tepla zasklením $- U_g = 0,7000 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
- Lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu $- \Psi_g = 0,0352 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

Rozdiel medzi hodnotami U_w je vyjadrený hodnotou $\Delta U_w = 0,0749 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Môžeme skonštatovať, že navrhnutá okenná konštrukcia spĺňa požiadavky normy STN 73 0540-2 + Z1 + Z2: 2019, Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov Časť 2 Funkčné požiadavky. Konsolidované znenie. Okenná konštrukcia musí spĺňať hodnotu $- U_w = 0,79 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \leq U_{w,r2} = 0,85 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

4.6 Posúdenie kritickej vnútornej povrchovej teploty v styku zasklenia a rámu

Ďalším zisťovaním na prototype drevo-hliníkového okna bola vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu pri rôznych teplotných rozdieloch. Cieľom bolo zistenie či dochádza v tomto kritickom mieste ku kondenzácii na povrchu vákuového zasklenia vplyvom okrajového tesnenia tohto zasklenia. V klíma-komore na vnútornej strane bola nastavená relatívna vlhkosť na úroveň okolo 50 %. Okrajové podmienky pre tento teplotný scenár boli v programe, ktorý ovláda klíma-komora nastavené na:

Teplota vonkajšieho prostredia – studená komora klíma-komory	$\Theta_{ae} = -11,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
Teplota vnútorného prostredia – teplá komora klíma-komory	$\Theta_{ai} = 20,1 \text{ } ^\circ\text{C}$



Obr. 4.12 Absencia viditeľnej kondenzácie v styku zasklenia a rámu v rohovom spoji drevo – hliníkového okna pri štvrtom teplotnom scenári

Interpoláciou bola ďalej zistená hraničná hodnota relatívnej vlhkosti pre nameranú hodnotu povrchovej teploty v styku zasklenia a rámu $\Theta_{roh-4} = 14,34\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na základe interpolácie bola odvodená hodnota pre max. možnú relatívnu vlhkosť vnútorného prostredia, pri ktorej by došlo ku vzniku kondenzácie v styku zasklenia a rámu - $\varphi_{i-4-krit} = 69,96\%$. To je pre výrobok drevo-hliníkového okna, s aplikovaným vákuovým zasklením, veľmi priaznivý výsledok.



Obr. 4.13 Pohľad na styk zasklenia a rámu cez termovíziu kameru, na danom snímku sú viditeľné aj zvýšené tepelné toky kondukciou cez dištančné pilieriky

4.7 2D simulačná analýza aplikácie vákuového zasklenia do prototypu drevo-hliníkového okna

Zo zistených údajov, z meraní a simulácií, sa zrealizovala ďalšia simulačná analýza. Do drevo-hliníkových rámov M2.0 -15, M2.0 – 30, M2.0 – 40 bolo osadené vákuové zasklenie od výrobcu Synergy. Toto vákuové zasklenie sa vyznačuje inou technológiou okrajového utesňovania. Okrajové tesnenie je tvorené zliatinou india s vysokou tepelnou vodivosťou. Avšak výrobný proces takéhoto zasklenia sa realizuje pri nižších teplotách, preto je možná aplikácia nízko-emisných vrstiev tzv. soft-coats, ktoré majú nižšiu emisivitu. Tým pádom je radiačná zložka tepelného toku viac eliminovaná a preto vákuové zasklenie dosahuje lepšiu hodnotu súčiniteľa prechodu tepla zasklením – $U_g = 0,58\text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

Pri tejto analýze boli na základe údajov zo simulácie zistené nasledovné hodnoty: súčiniteľ prechodu rámu $U_f [\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})]$, lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu $\Psi_g [\text{W}/(\text{m}.\text{K})]$, súčiniteľ prechodu tepla okna $U_w [\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})]$. Pri výpočte hodnoty Ψ_g a U_w je uvažovaná hodnota súčiniteľa prechodu tepla zasklením $U_g = 0,58\text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (hodnota prevzatá od výrobcu zasklenia – numericky vypočítaná ekvivalentná hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti vákuovej medzery $\lambda_{ekv-vak} = 0,000130\text{ W}/(\text{m}.\text{K})$). Rozmer uvažovaného okna je $1,23 \times 1,48\text{ m}$. Ďalším sledovaným parametrom je vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu s aplikáciou tepelnoizolačných materiálov na rôznej materiállovej báze – mäkké drevo, korok, PIR, „CompactFoam“. Viditeľná šírka panela resp. zasklenia je v oboch prípadoch rovnaká – $b_p = b_g = 190\text{ mm}$.

Tab. 03 Súhrn zisťovaných hodnôt pre rôzne varianty drevo-hliníkového upraveného rámu „M2.0“ s izoláciami na rôznej materiállovej báze a rôznych rozmerov, vákuové zasklenie – SYNERGY

	Izolačný materiál	Tepelná priepustnosť rezu L_{r20} [W/(m.K)]	Súčiniteľ prechodu tepla rámu U_f [W/(m ² .K)]	Súčiniteľ prechodu tepla zasklením U_g [W/(m ² .K)]	Tepelná priepustnosť rezu L_{w20} [W/(m.K)]	Lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu Ψ_g [W/(m.K)]	Súčiniteľ prechodu tepla okna U_w [W/(m ² .K)]	Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu [°C]
SYNERGY - "M 2.0 - 15" izolant v. 15 x š. 25 mm $b_r = 94$ mm, $b_p = b_g = 190$ mm $A_f = 0,4741$ m ² $A_g = 1,3463$ m ² $A_w = 1,8204$ m ²	Mäkké drevo	0,5268	1,1688	0,5800	0,2994	0,0793	0,9367	11,20
	Korok	0,5144	1,0370	0,5800	0,2862	0,0785	0,9003	11,70
	PIR	0,5081	0,9700	0,5800	0,2812	0,0798	0,8862	11,90
	"CompactFoam"	0,5128	1,0201	0,5800	0,2848	0,0787	0,8964	11,80
SYNERGY - "M 2.0 - 30" izolant v. 30 x š. 25 mm $b_r = 109$ mm, $b_p = b_g = 190$ mm $A_f = 0,5433$ m ² $A_g = 1,2771$ m ² $A_w = 1,8204$ m ²	Mäkké drevo	0,5386	1,1162	0,5800	0,2790	0,0471	0,8577	13,80
	Korok	0,5238	0,9801	0,5800	0,2621	0,0451	0,8121	14,40
	PIR	0,5155	0,9047	0,5800	0,2554	0,0466	0,7933	14,60
	"CompactFoam"	0,5217	0,9609	0,5800	0,2602	0,0453	0,8068	14,40
SYNERGY - "M 2.0 - 40" izolant v. 40 x š. 25 mm $b_r = 119$ mm, $b_p = b_g = 190$ mm $A_f = 0,5883$ m ² $A_g = 1,2321$ m ² $A_w = 1,8204$ m ²	Mäkké drevo	0,5471	1,0943	0,5800	0,2735	0,0330	0,8272	14,70
	Korok	0,5302	0,9517	0,5800	0,2549	0,0314	0,7772	15,30
	PIR	0,5203	0,8689	0,5800	0,2473	0,0337	0,7561	15,50
	"CompactFoam"	0,5277	0,9309	0,5800	0,2529	0,0319	0,7717	15,30

Hodnoty súčiniteľa prechodu tepla rámu pre drevo-hliníkový rám „SYNERGY - M2.0 – 15“ U_f [W/(m².K)] pri prekrytí izoláciou 15 mm, na rôznej materiállovej báze pohybovali v rozmedzí od 0,9700 W/(m².K) (PIR) do 1,1688 W/(m².K) (mäkké drevo). Hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa Ψ_g sa pohybovali v rozmedzí od 0,0785 W/(m.K) (korok) do 0,0798 W/(m.K) (PIR). Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu bola v závislosti od použitého izolačného materiálu v rozmedzí od 11,20 °C (mäkké drevo) do 11,90 °C (PIR).

Hodnoty súčiniteľa prechodu tepla rámu pre drevo-hliníkový rám „SYNERGY - M2.0 – 30“ U_f [W/(m².K)] sa pri zvýšení prekrytia izoláciou (30 mm), na rôznej materiállovej báze pohybovali v rozmedzí od 0,9047 W/(m².K) (PIR) do 1,1162 W/(m².K) (mäkké drevo). Hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa Ψ_g sa pohybovali v rozmedzí od 0,0451 W/(m.K) (korok) do 0,0471 W/(m.K) (mäkké drevo). Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu bola v závislosti od použitého izolačného materiálu v rozmedzí od 13,80 °C (mäkké drevo) do 14,60 °C (PIR).

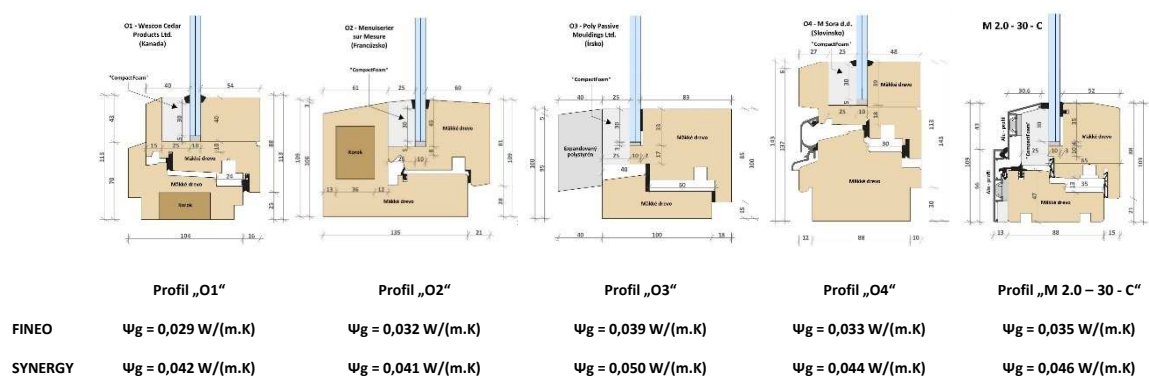
Z tab. 32 je evidentné, že najlepšie hodnoty súčiniteľa prechodu tepla rámom U_f [W/(m².K)] dosahujú drevo-hliníkové rámy „SYNERGY - M2.0 – 40“ s izolačnými materiálmi, ktoré pokrývajú vákuové zasklenie 40 mm. Hodnoty U_f boli v rozmedzí od 0,8689 W/(m².K) (PIR) do 1,0943 W/(m².K) (mäkké drevo). Hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa Ψ_g sa pohybovali v rozmedzí od 0,0314 W/(m.K) (korok) do 0,0337 W/(m.K) (PIR). Vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu bola v závislosti od použitého izolačného materiálu v rozmedzí od 14,70 °C (mäkké drevo) do 15,50 °C (PIR).

V porovnaní s rovnakou analýzou, ale so zasklením FINEO v predmetných rámoch, môžeme skonštatovať, že vnútorná povrchová teplota v styku zasklenia a rámu sa pri aplikácii zasklenia SYNERGY o niečo zhoršila. Hodnoty súčiniteľa prechodu tepla oknom U_w [W/(m².K)] pri aplikácii vákuového zasklenia SYNERGY vykazovali priaznivejšie výsledky. Pre drevo-hliníkový rám „SYNERGY - M2.0 – 15“ vyšli hodnoty súčiniteľa prechodu oknom U_w v rozptyle od 0,8862 W/(m².K) (PIR) do 0,9367 W/(m².K) (mäkké drevo). Pre drevo-hliníkový rám „SYNERGY - M2.0 – 30“ vyšli hodnoty súčiniteľa prechodu oknom U_w v rozptyle od 0,7933 W/(m².K) (PIR) do 0,8577 W/(m².K) (mäkké drevo). Najlepšie hodnoty súčiniteľa prechodu tepla oknom U_w vyšli pre drevo-hliníkový rám „SYNERGY - M2.0 – 40“ v rozptyle od 0,7561 W/(m².K) (PIR) do 0,8272 W/(m².K) (mäkké drevo).

4.8 2D simulačná analýza aplikácie dvoch typov konštrukcie vákuového zasklenia do rôznych drevo-hliníkových okenných profilov

Na základe všetkých zistených simulácií a meraní sa pristúpilo k úprave 4 vybraných drevených resp. drevo-hliníkových okien z databázy Passivhaus. Tepelnotechnické vlastností aplikovaných materiálov pre jednotlivé profilové riešenia boli uvedené v predchádzajúcich kapitolách. Hlavné zmeny spočívali v úprave hĺbky zasklievacej drážky tak aby bolo vákuové zasklenie prekryté min. 30 mm izolačného materiálu. Šírka izolačného materiálu bola 25 mm. Izolačné materiály, ktoré boli aplikované v tejto analýze boli: drevený hranol so súčiniteľom tepelnej vodivosti $\lambda = 0,1300 \text{ W/(m.K)}$, jemnozrnný korok s $\lambda = 0,0450 \text{ W/(m.K)}$, PIR doska s $\lambda = 0,0240 \text{ W/(m.K)}$ a doska na báze termoplastickej peny „CompactFoam“ s $\lambda = 0,0387 \text{ W/(m.K)}$. Jedná sa o profily so zjednodušenou geometriou. Do profilov boli osadené dva druhy vákuového zasklenia. Jeden od čínskeho výrobcu SYNERGY s okrajovým tesnením na báze zliatin india. Druhým bol výrobok z belgickej pobočky spoločnosti AGC s produktom „FINEO“ s okrajovým tesnením na báze sklenej spájky. Súčasťou detailu okraja tohto zasklenia je aj líniový getter. Hlavným cieľom je porovnanie vnútorných kritických teplôt v styku zasklenia a rámu a hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa v styku vákuového zasklenia a rámu. Ďalej bola zisťovaná hodnota súčiniteľa prechodu tepla rámom $U_f [\text{W/(m}^2\text{.K)}]$ s aplikáciou rôzneho izolačného materiálu v mieste zasklievacej drážky.

Najlepšiu hodnotu súčiniteľa prechodu tepla rámu dosiahol profilové riešenie „O2“ so zabudovanou izoláciou na báze PIR dosky s hodnotou $U_f = 0,7187$. Najhoršiu hodnotu $U_f = 1,0870$ mal profil „O3“ s osadením mäkkého dreva so súčiniteľom tepelnej vodivosti $\lambda = 0,130 \text{ W/(m.K)}$. Čo sa týka hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa v styku zasklenia a rámu Ψ_g , vyšla najnižšia hodnota pre profilové riešenie „O2“ s osadeným vákuovým zasklením „FINEO“, ktoré bolo v zasklievacej drážke doplnené o hranol z mäkkého dreva. Hodnota Ψ_g pre takúto konfiguráciu sa rovnala 0,0294. Najvyššiu hodnotu $\Psi_g = 0,0503$ vyšla pre profilové riešenie „O3“ s osadeným vákuovým zasklením od výrobcu SYNERGY, ktoré bolo v zasklievacej drážke doplnené o izoláciu na báze PIR dosky. Najnižšia hodnota súčiniteľa prechodu oknom $U_w = 0,7248 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ pre profil „O2“ s osadeným vákuovým sklom od výrobcu SYNERGY pred ktorým je zabudovaný izolačný materiál na báze PIR dosky. Najvyššiu hodnotu $U_w = 0,9021 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ mal profil „O3“ s vákuovým zasklením „FINEO“ so zabudovaným hranolom z mäkkého dreva. Najvyššiu vnútornú povrchovú teplotu v styku zasklenia a rámu dosiahol profil „O2“ so zabudovaným vákuovým sklom od výrobcu AGC „FINEO“ s teplotou 15,2 °C. Môžeme tak skonštatovať, že aplikácia vákuového zasklenia s okrajovým tesnením na báze zliatin india má priaznivejšie výsledky na celkovú hodnotu súčiniteľa prechodu tepla oknom U_w . Avšak pri aplikácii zasklenia s okrajovým tesnením na báze sklenej spájky, a v tomto prípade je okrajové tesnenie doplnené aj líniovým gettrom, (produkt „FINEO“ od výrobcu AGC) vychádzajú výrazne nižšie hodnoty pre lineárny stratový súčiniteľ v styku zasklenia a rámu Ψ_g . Čo sa týka vnútorných povrchových teplôt v styku zasklenia a rámu vychádzajú hodnoty priaznivejšie pre vákuové zasklenie „FINEO“, ale rozdiel medzi jednotlivými variantmi aplikácie vákuového zasklenia je minimálny - max. $\Delta\theta = 0,5 \text{ °C}$. Pri stanovenej hĺbke zasklievacej drážky je možné v rámci predbežnej analýzy determinovať hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa pre jednotlivé konštrukčné varianty vákuových skiel na základe ich okrajového tesnenia. Na nasledujúcom obrázku je porovnanie dvoch rôznych konštrukčných riešení vákuových skiel v simulačných modeloch vybraných profilov z databázy „Passivhaus“ v kontexte lineárneho stratového súčiniteľa v styku zasklenia a rámu $\Psi_g [\text{W/(m.K)}]$ pri výške prekrytia 30 mm.



Obr. 4.14 Porovnanie hodnôt lineárnych stratových súčiniteľov v styku zasklenia a rámu dvoch rôznych konštrukcií vákuových skiel v rôznych profilových riešeniach

5 Záver

Cieľom práce bolo navrhnuť optimalizovaný drevený okenný rám, ktorý umožní aplikáciu vákuového zasklenia. Tento cieľ bol úspešne splnený vytvorením a testovaním prototypu. Výpočtové analýzy (metodika STN EN ISO 10077-2: 2019) ukázali, že optimalizácia geometrie rámu môže významne znížiť hodnoty súčiniteľa prechodu tepla. Experimentálne testovanie potvrdilo správnosť výsledkov výpočtových simulácií. Zistené hodnoty povrchových teplôt boli konzistentné s predikciami z modelu. Použitie vákuového zasklenia s okrajovým tesnením na báze india alebo sklenenej spájky prinieslo rozdielne, avšak priaznivé výsledky. Experimenty ukázali, že pri správnom dizajne rámu a zasklenia sa povrchové teploty pohybujú nad hodnotami rosného bodu, čo znižuje riziko kondenzácie. Vákuové zasklenie sa ukázalo byť efektívnym riešením pre moderné okná, avšak jeho použitie si vyžaduje presné prispôbenie rámu.

Na základe simulácií sa hľadalo optimálne umiestnenie vákuového skla v kontexte súčiniteľa prechodu tepla rámu, lineárneho stratového súčiniteľa a vnútornej povrchovej teploty v styku zasklenia a rámu. Ideálna poloha pre prvé dva stanovené parametre vyšli v strednej časti rámu. Čo sa týka vnútornej povrchovej teploty vychádzalo optimálne osadenie vákuového skla v časti bližšej k interiéru. Hodnota lineárneho stratového súčiniteľa bola v podstate konštantná, v závislosti od hĺbky osadenia vákuového zasklenia do rámu. Výsledky preukázali aj vhodné doplnenie zasklievacej drážky o izolačný materiál, o elimináciu tepelných mostov a zlepšenie tepelnotechnických charakteristík detailu zasklievacej drážky. Bolo zistené že dôležitým faktorom pre dimenzovanie izolačného materiálu v mieste zasklievacej drážky je hodnota výšky prekrytia okrajového tesnenia vákuového zasklenia oproti šírke tohto izolantu.

Vhodná úprava metodiky určenia súčiniteľa prechodu tepla rámom s aplikáciou izolantu o hrúbke vákuového zasklenia. Vplyvom zmenšenia hrúbky tohto panela reprezentujúceho tenkú konštrukciu vákuového zasklenia vychádzali hodnoty súčiniteľa U_f o niečo horšie, ako pri ráme s osadeným tepelnoizolačným panelom o hrúbke reprezentujúcej izolačné trojsklo.

V tejto práci sú na základe simulácií zistené hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa pre styk zasklenia a rámu v kontexte osadenia vákuového zasklenia. Boli skúmané dva varianty vákuových skiel. Prvé s okrajovým tesnením na báze zliatin india a druhé na báze sklenej spájky.

Rozdielna technológia utesňovania vákuového skla má aj výrazný vplyv na tepelnotechnické vlastnosti samotného skla. Pri aplikácii vákuového skla s okrajovým tesnením na báze sklenej spájky vychádzali lepšie hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa a vnútorné povrchové teploty v kritickom detaile styku zasklenia a rámu. Avšak hodnoty pre celkový súčiniteľ prechodu tepla zasklením vychádzal o niečo horšie ako pri vákuovom zasklení s okrajovým tesnením na báze zliatin india.

5.1 Prínos pre vedu

Vákuové zasklenia sú v súčasnosti častokrát nevhodne aplikované do rámového systému a práca určuje spôsoby ako optimálne využiť potenciál vákuového zasklenia v kontexte úpravy profilového systému, konkrétne optimálna veľkosť a hĺbka zasklievacej drážky. Práca zaviedla metodický prístup k návrhu drevených okenných rámov, špecificky zameraných na integráciu vákuového zasklenia. Výsledky experimentálnych meraní potvrdili presnosť numerických výpočtových analýz. Tento výskum má význam pre budúci výskum, pretože umožňuje s vyššou mierou istoty využívať numerické metódy na optimalizáciu ďalších riešení v oblasti úpravy okenných rámov s vákuovým zasklením. Významným prínosom pre vedu je aj získanie a detailná analýza rozsiahleho súboru experimentom a simuláciami získaných dát, týkajúcich sa aplikácie vákuového zasklenia. Tieto dáta poskytujú informácie o správaní sa tohto zasklenia v rôznych teplotných podmienkach a prispievajú k hlbšiemu vedeckému pochopeniu jeho potenciálu a limitácií pre širšie uplatnenie. Možnými oblastami pre ďalší výskum by predstavovalo sledovanie dlhodobej životnosti a stability vákuového zasklenia v drevenom okennom ráme v reálnych podmienkach. Na základe takéhoto výskumu by bolo možné pristúpiť k ďalším úpravám resp. vytvoreniu rámového riešenia pre tento inovatívny systém zasklievania.

5.2 Prínos pre prax

Poskytnutie preverených postupov pre aplikáciu vákuového zasklenia do drevených rámov. Práca sa detailne zaoberala analýzou polohy umiestnenia vákuového zasklenia v drevenom ráme a experimentálnym laboratórnym testovaním vzoriek. Na základe týchto analýz a testov poskytuje práca výrobcovi okien konkrétne postupy a návody ako bez rizík implementovať tenkú konštrukciu vákuového zasklenia do svojich produktov. Táto práca eliminuje počiatočné neistoty spojené s touto technológiou. Výsledkom sú konkrétne odporúčania pre výrobcov ohľadom ideálnych parametrov zasklievacej drážky. Tieto odporúčania zohľadňujú nielen osadenie tenkého vákuového skla, ale spolu aj s aplikáciou izolačného materiálu eliminujú tepelné mosty v detaile zasklievacej drážky. Jedným z dôležitých praktických výstupov práce je experimentálne overenie, že pri správnom návrhu rámu a zasklenia sa povrchové teploty v kritickom mieste, v styku zasklenia a rámu, pohybujú nad teplotou rosného bodu. Práca uvádza konkrétne a praktické odporúčania pre dimenzovanie zasklievacej drážky pre rôzne konštrukčné riešenia vákuového zasklenia. Tieto parametre zohľadňujú hĺbku zasklievacej drážky resp. výšku prekrytia vákuového skla. Práca poukázala na význam vhodného doplnenia zasklievacej drážky o izolačný materiál. Pri stanovenej hĺbke zasklievacej drážky je možné v rámci predbežnej analýzy determinovať hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa pre jednotlivé konštrukčné varianty vákuových skiel na základe ich okrajového tesnenia.

Literatúra

Baetens, R., Jelle, B.P. and Gustavsen, A. (2011) 'Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review', *Energy and Buildings*, 43(4), pp. 761–769. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012>.

Bao, M. et al. (2014) 'Novel hybrid vacuum/triple glazing units with pressure equalisation design', *Construction and Building Materials*, 73, pp. 645–651. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.013>.

Bielek, M. (1987) *Okno, energia a životné prostredie*. 1st edn. Bratislava: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, n.p.

Bosák, L. (2017) 'Testovanie a optimalizácia bio-kompozitov pre reverzibilnú modulovú architektúru', in *Písomná časť dizertačnej skúšky*. Slovenská technická univerzita v Bratislave. Stavebná fakulta, p. 102 s.

Chmúrny, I. (2014) *Stavebná tepelná technika*. 1. Nakladateľstvo STU.

- Chmurny, I. and Szabo, D. (2019) 'Thermal Irregularities in Vacuum Glazing', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471, p. 062012. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/6/062012>.
- Collins, R. and Fischer-Cripps, A. (1991) 'Design of Support Pillar Arrays in Flat Evacuated Windows', *Australian Journal of Physics*, 44(5), p. 545. Available at: <https://doi.org/10.1071/PH910545>.
- Collins, R.E. *et al.* (1995) 'Vacuum glazing—A new component for insulating windows', *Building and Environment*, 30(4), pp. 459–492. Available at: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00025-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00025-2).
- Collins, R.E., Fischer-Cripps, A.C. and Tang, J.-Z. (1992) 'Transparent evacuated insulation', *Solar Energy*, 49(5), pp. 333–350. Available at: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(92\)90106-K](https://doi.org/10.1016/0038-092X(92)90106-K).
- Collins, R.E. and Robinson, S.J. (1991) 'Evacuated Glazing', *Solar Energy*, 47(1), pp. 27–38. Available at: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90060-A](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90060-A).
- Collins, R.E. and Simko, T.M. (1998) 'Current status of the science and technology of vacuum glazing', *Solar Energy*, 62(3), pp. 189–213. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00007-3).
- Cuce, E. and Cuce, P.M. (2016) 'Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, pp. 1345–1357. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.134>.
- Čunderlík, I. (2009) *Štruktúra dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene.
- Fang, Y. *et al.* (2005) 'Complex multimaterial insulating frames for windows with evacuated glazing', *Solar Energy*, 79(3), pp. 245–261. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.11.009>.
- Fang, Y. *et al.* (2006) 'Experimental validation of a numerical model for heat transfer in vacuum glazing', *Solar Energy*, 80(5), pp. 564–577. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.002>.
- Fang, Y. *et al.* (2007) 'Low emittance coatings and the thermal performance of vacuum glazing', *Solar Energy*, 81(1), pp. 8–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.011>.
- Fang, Y. *et al.* (2010) 'Thermal performance analysis of an electrochromic vacuum glazing with low emittance coatings', *Solar Energy*, 84(4), pp. 516–525. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.02.007>.
- Fang, Y. *et al.* (2013) 'A Novel Building Component Hybrid Vacuum Glazing— A Modelling And Experimental Validation', 119.
- Fang, Y. *et al.* (2015) 'Enhancing the thermal performance of triple vacuum glazing with low-emittance coatings', *Energy and Buildings*, 97, pp. 186–195. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.006>.
- Fang, Y., Eames, P.C. and Norton, B. (2007) 'Effect of glass thickness on the thermal performance of evacuated glazing', *Solar Energy*, 81(3), pp. 395–404. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.05.004>.
- Fang, Y., Hyde, T.J. and Hewitt, N. (2010) 'Predicted thermal performance of triple vacuum glazing', *Solar Energy*, 84(12), pp. 2132–2139. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.09.002>.
- Fischer-Cripps, A.C. *et al.* (1995) 'Stresses and fracture probability in evacuated glazing', *Building and Environment*, 30(1), pp. 41–59. Available at: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)E0032-M](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)E0032-M).
- Garrison, J.D. and Collins, R.E. (1995) 'MANUFACTURE AND COST OF VACUUM GLAZING', *Solar Energy*, Vol. 55.

Griffiths, P.W. *et al.* (1998) 'Fabrication of evacuated glazing at low temperature', *Solar Energy*, 63(4), pp. 243–249. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00019-X).

Horáček, P. (2001) 'Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.', in. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně: ediční středisko MZLU v Brně.

Hovorka, V. (2011) 'Sborník přednášek odborné konference dřevěná okna, dveře a schody', in.

Hraška, J. (2017) 'Prednášky z predmetu Špeciálne konštrukcie pozemných stavieb', in. Stavebná fakulta STU v Bratislave.

Janota, I. and Škripeň, J. (1960) 'Vlastnosti dřeva jedle a smreka niektorých oblastí na Slovensku', in *Drevársky výskum - sborník prác z odboru výskumu dřeva*. (1).

Kamenický, L. (2016) 'Tepelno-vlhkostné problémy okenných konštrukcií', in *Dizertačná práca*. Slovenská technická univerzita v Bratislave. Stavebná fakulta.

Kollmann, F. (1982) 'Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe', in. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (2).

Kuhn, J. *et al.* (1992) 'Thermal transport in polystyrene and polyurethane foam insulations', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35. Available at: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90150-Q](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90150-Q).

Kuklík, P. (2008) 'Wood Properties', in *Handbook 1 - Timber structures*. 1., pp. 15–27.

Limam, A. *et al.* (2016) 'Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation', *Energy and Buildings*, 116, pp. 89–95.

Manz, H., Brunner, S. and Wulschleger, L. (2006) 'Triple vacuum glazing: Heat transfer and basic mechanical design constraints', *Solar Energy*, 80(12), pp. 1632–1642. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.003>.

Memon, S. *et al.* (2015) 'A new low-temperature hermetic composite edge seal for the fabrication of triple vacuum glazing', *Vacuum*, 120, pp. 73–82. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.06.024>.

Memon, S. and Eames, P.C. (2020) 'Design and development of lead-free glass-metallic vacuum materials for the construction and thermal performance of smart fusion edge-sealed vacuum glazing', *Energy and Buildings*, 227, p. 110430. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110430>.

Mrlík, F. (1985) 'Vlhkostné problémy stavebných materiálov a konštrukcií', in. Bratislava (Edícia stavebníckej literatúry).

Ng, N., Collins, R.E. and So, L. (2007) 'Characterization of the thermal insulating properties of vacuum glazing', *Materials Science and Engineering: B*, 138(2), pp. 128–134. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2005.09.066>.

Palko, M. (2009) 'Okenná konštrukcia a pasívny dom', in. *Konference ANSYS 2009*.

Palko, M. (2018) 'Modern wood windows now and trends after the year 2020', *Building Defects 2017*, 146, p. 8.

Panáček, P. (2020) 'K čomu sú potrebné zasklievacie podložky u okien?', in. Available at: <https://mobilab.sk/comu-su-potrebnne-zasklievacie-podlozky-okien/>.

Park, J., Oh, M. and Lee, C. (2019) 'Thermal Performance Optimization and Experimental Evaluation of Vacuum-Glazed Windows Manufactured via the In-Vacuum Method', *Energies*, 12(19), p. 3634. Available at: <https://doi.org/10.3390/en12193634>.

Pescari, S. *et al.* (2015) 'Study Concerning the Thermal Insulation Panels with Double-Side Anti-Condensation Foil on the Exterior and Polyurethane Foam or Polyisocyanurate on the Interior', *Key Engineering Materials*, 660, pp. 244–248. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.660.244>.

Pont, U. *et al.* (2018) 'Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung'.

Pont, U. *et al.* (2021) 'Fensterprototypen mit integriertem Vakuumglas'.

Pont, U. *et al.* (2022) 'A Review on the FIVA-project: Novel Windows employing Vacuum glazing products'.

Pušár, A. *et al.* (2008) *Okná, zasklené steny, dvere, brány*. 2nd edn. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o.

Pušár, A. (2016) 'Vplyv druhu dreveny na tepelnoizolačné vlastnosti okien', in. Available at: <http://mobilab.sk/vplyv-druhu-dreviny-na-tepelnoizolacne-vlastnosti-okien/>.

Schiavoni, S. *et al.* (2016) 'Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, pp. 988–1011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>.

Schuss, M. *et al.* (2021) 'In-situ performance evaluation of historic box-type windows with vacuum glazing', *Journal of Physics: Conference Series*, 2069(1), p. 012128. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012128>.

Shamaeva, A.P., Tolstyakov, D.N. and Fedorova, F.G. (1987) 'Water-content dependence of the thermal conductivity for a phenolic foam plastic composite', *Meas Tech*, 30. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00863036>.

Simko, T.M. *et al.* (1995) *Edge conduction in vacuum glazing*. LBL--36958, CONF-951215--7, 211577, p. LBL--36958, CONF-951215--7, 211577. Available at: <https://doi.org/10.2172/211577>.

Šnajdr, R. (2020) 'Stavební sklo', in *TZB info*. Available at: <https://stavba.tzb-info.cz/zaskleni/20367-stavebni-sklo>.

Toma, P. and Suchomel, J. (2008) 'Základné charakteristiky lesných drevín: ekologické nároky, morfológia, lesné semenárstvo a škôlkárstvo, obhospodarovanie génových základní: spracovanie drevnej suroviny v odvetví spracovania dreva', in. Zvolen: Národné lesnícke centrum.

Zhao, J.F. *et al.* (2007) 'A modified pump-out technique used for fabrication of low temperature metal sealed vacuum glazing', *Solar Energy*, 81(9), pp. 1072–1077. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.03.006>.

Zi-Tao, Y. *et al.* (2011) 'Experimental Measurements of Thermal Conductivity of Wood Species in China: Effects of Density, Temperature, and Moisture Content', in *Forest Products Journal*. (61).

Zoznam publikačnej činnosti

1. Selected laboratory instrumentation of building physics

Palko, Milan -- Bosák, Lukáš -- Bohunický, Bohuš -- Hollý, Ján -- Palková, Adela -- Cruz, Samuel -
- Blažo, Adam -- Kováč, Jozef -- Vavrovič, Boris -- Franek, Michal -- Rabenseifer, Roman -- Pavčková,
Monika -- Maňková, Lucia -- Minarovičová, Katarína -- Hanuliak, Peter -- Szabó, Daniel -- Vargová,
Andrea -- Šujanová, Paulína -- Čehel'ová, Dagmara -- Bielek, Boris -- Tomašovič, Peter -- Držka, Milan -
- Deáková, Karin

Selected laboratory instrumentation of building physics. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2017.
ISBN 978-80-7204-968-4.,

2017 – monografie

AAA - Vedecké monografie vydané v zahraničných vydavateľstvách

2. Current and new trends in window glazing systems

Blažo, Adam -- Palko, Milan

Current and new trends in window glazing systems. In: PĚNČÍK, Jan; PAVČEKOVÁ, Monika. *APABD 2018*. Brno: VUT - Brno University of Technology, 2018, s. 70--74. ISBN 978-80-7204-999-8.,
2018 – príspevok v zborníku

AFC - Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

3. Predikcia konštrukčného riešenia moderného dreveného okna pre aplikácie po roku 2020

Blažo, Adam

Predikcia konštrukčného riešenia moderného dreveného okna pre aplikácie po roku 2020. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 24th 2018, Bratislava [elektronický zdroj]*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, s. 324--331. ISBN 978-80-227-4864-3.,
2018 – príspevok v zborníku

AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

4. Contemporary development of wooden window

Blažo, Adam -- Palko, Milan

Contemporary development of wooden window. In: *Nové poznatky ve vědě a výzkumu z oblasti pozemního stavitelství*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2019, s. 8--16. ISBN 978-80-248-4199-1.

2019 - príspevok v zborníku

AFC - Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

5. Drevené okná a ich potenciál v budúcnosti

Palko, Milan -- Palková, Adela -- Blažo, Adam -- Križanová, Silvia

Drevené okná a ich potenciál v budúcnosti. *OKNOviny*, 12. s. 11--16.

2019 – článok v časopise

BDF - 12/Odborné práce v domácich nekarentovaných časopisoch ; 13/Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

6. Aplikácia vákuového zasklenia na rôznych profilových riešeniach drevených okien – porovnanie vnútorných povrchových teplôt

Blažo, Adam

Aplikácia vákuového zasklenia na rôznych profilových riešeniach drevených okien – porovnanie vnútorných povrchových teplôt. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2019, s. 256--262. ISBN 978-80-227-4972-5.

2019 - príspevok v zborníku

AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

7. 2D Modelovanie vákuového skla a osadenie do drevo-hliníkového rámu okna-porovnanie povrchových teplôt

Blažo, Adam

2D Modelovanie vákuového skla a osadenie do drevo-hliníkového rámu okna-porovnanie povrchových teplôt. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 320--326. ISBN 978-80-227-5052-3.

2020 - príspevok v zborníku

AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

8. Vybrané vlastnosti moderných strešných okien

Blažo, Adam -- Palko, Milan

Vybrané vlastnosti moderných strešných okien. In: JAMRICH, Eduard; PALKO, Milan; PALKOVÁ, Adela; KOVÁČ, Jozef; KRÁĽOVÁ, Barbora. *Strechy 2020*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 158--164. ISBN 978-80-227-5059-2.

2020 - príspevok v zborníku

AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

9. Analýza tepelnotechnických vlastností vákuového zasklenia v styku zasklenia a rámu - výpočtová a experimentálna metóda

Blažo, Adam -- Palko, Milan

Analýza tepelnotechnických vlastností vákuového zasklenia v styku zasklenia a rámu - výpočtová a experimentálna metóda. In: PALKO, Milan; SEDLÁČKOVÁ, Nancy; PALKOVÁ, Adela. *Zborník článkov zo stretnutia katedier konštrukcií pozemných stavieb 2023*. Bratislava: Spektrum STU, 2023, s. 99-125. ISBN 978-80-227-5383-8.

2023 - príspevok v zborníku

AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

10. Koncept inteligentného a ekologického okna v kontexte klimatických zmien

Palko, Milan -- Palková, Adela -- Križanová, Silvia -- Blažo, Adam -- Cruz, Samuel -- Klincová, Veronika -- Chlaň, Mário -- Kráľová, Barbora

Koncept inteligentného a ekologického okna v kontexte klimatických zmien. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2023. ISBN 978-80-7623-120-7.

2023 – monografie

BAA - Odborné monografie vydané v zahraničných vydavateľstvách

11. 2D Computational Analysis of Vacuum Glazing Installation in a Wood-Based Window Frame in the Context of the Linear Thermal Transmittance Ψ_g

Blažo, Adam -- Palko, Milan

(The article will be published in the upcoming June issue of the Slovak Journal of Civil Engineering.)