



HI-SMART: BALÍK VYŠŠIEHO VZDELÁVANIA PRE TAKMER NULOVÚ
SPOTREBU ENERGIE A NÁVRH INTELIGENTNÝCH BUDOV

MODULE #2: KONŠTRUKCIE PRE BUDOVY S TAKMER NULOVOU ENERGIU - ZASKLENIE

ŠTANDARDNÉ SYSTÉMY ZASKLENIA VYUŽÍVANÉ V „nZEB“

1.1 ÚVOD

Sprievodná prezentácia sa zaoberá významom nízko-emisných vrstiev zasklenia pre zlepšenie energetickej bilancie a pre zachovanie vizuálneho komfortu interiéru. Popisuje fyzikálnu podstatu žiarenia a s ňou spojenú povrchovú emisivitu a tiež vplyv umiestnenia nízko-emisnej vrstvy. Rozoberá tiež princípy, výhody a nevýhody najbežnejších kombinácií skla a nízko-emisnej vrstvy - tzv. „high performance“ skla a tzv. „low-e“ skla.

1.2 SLNEČNÉ ŽIARENIE

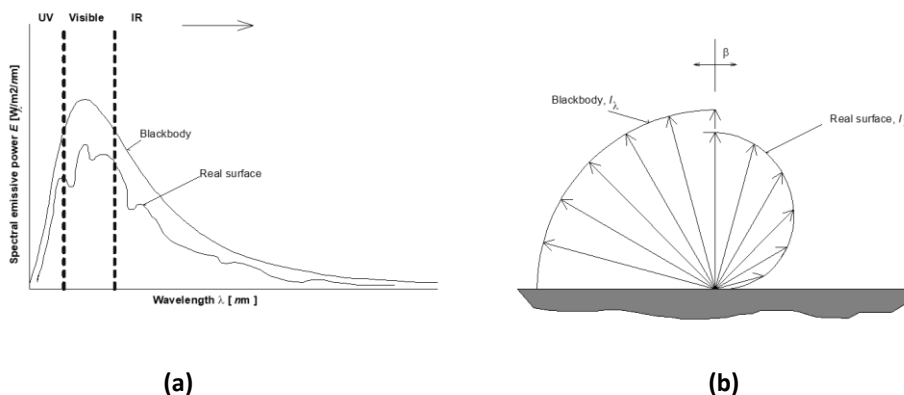
Slnéčné žiarenie je jedným z najvzrušujúcejších, no zároveň najsofistikovanejších spôsobov prenosu tepla. Ide o elektromagnetické žiarenie rôznych vlnových dĺžok v rôznych smeroch. Podľa toho, čo nás najviac zaujíma, hovoríme o spektrálnom (podľa vlnovej dĺžky), smerovom alebo integrovanom (celkovom) žiarení. Z hľadiska smeru žiarenia sa zvyčajne rozlišujú dva extrémne prípady - priame a difúzne žiarenie. Zo spektrálneho hľadiska často hovoríme o viditeľnej (svetlo) a neviditeľnej (röntgenové lúče, UV, IR) časti slnečného žiarenia. Pri dopade na zemský povrch sa žiarenie v závislosti od jeho vlnovej dĺžky a smeru, ako aj od charakteru materiálu, na ktorý dopadá, odráža, prepúšťa alebo pohlcuje (absorbuje). V polopriehľadných materiáloch (napr. sklenená tabuľa, voda) sa vyskytujú všetky tri javy, t.j.

$$\rho (\text{odrazivosť}) + \tau (\text{priepustnosť}) + \alpha (\text{pohlťivosť}) = 1 \quad (1)$$

V nepriehľadných materiáloch priepustnosť vypadáva a platí

$$\rho (\text{odrazivosť}) + \alpha (\text{pohlťivosť}) = 1 \quad (2)$$

Pohltené (absorbované) žiarenie zvyšuje teplotu materiálu (hmoty), ktorý sa zase prebytočnej tepelnej energie zbavuje emisiou. Množstvo emitovanej energie je závislé od emisivity (povrchového sálenia), ε , čo je jedna z charakteristík materiálov. Emisivita je definovaná ako pomer žiarenia emitovaného povrchom materiálu k žiareniu emitovanému čiernym telesom pri rovnakej teplote (obr. 1) (Incropera & DeWitt, 1996). Čierne teleso je dokonalým absorbérom a emitentom žiarenia, pričom spektrálne rozloženie intenzity slnečného žiarenia pozdĺž vlnových dĺžok sa približuje spektrálnemu rozloženiu intenzity žiarenia čierneho telesa pri teplote 5800 K.



Obrázok 1: Porovnanie žiarenia čierneho telesa a reálneho povrchu. (a) Spektrálne rozloženie, (b) Smerové rozloženie (I_λ = intenzita žiarenia, β = uhol žiarenia) (Incropera & DeWitt, 1996)



Intenzita žiarenia čierneho telesa je definovaná emisivitou pri danej vlnovej dĺžke. Podľa Stefan-Boltzmannovho zákona vlnová dĺžka žiarenia, a tým aj emisivita čierneho telesa závisí od jeho teploty, pričom platí (Incropera & DeWitt, 1996), že

$$I_b = E_b / \pi = \sigma T^4 / \pi \quad (3)$$

kde I_b je intenzita žiarenia čierneho telesa v závislosti od jeho emisivity (W/m^2), E_b energia ako výsledok emisivity (W/m^2), π je číslo pi, σ je Stefan-Boltzmannova konštanta ($\sigma = 5,670 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$) a T teplota v Kelvinoch. Potom, veľmi zjednodušene, emisivita povrchu konkrétneho materiálu je nasledovná

$$\varepsilon(T) = I(T) / I_b(T), \quad (4)$$

$$\text{resp. } \varepsilon(T) = E(T) / E_b(T) \quad (\text{Incropera \& DeWitt, 1996}) \quad (5)$$

kde $\varepsilon(T)$ je emisivita povrchu materiálu pri danej teplote (-), $I(T)$ intenzita žiarenia povrchu materiálu pri danej teplote vo W/m^2 a $E(T)$ energia ako výsledok emisivity povrchu materiálu pri danej teplote vo W/m^2 . Vyššie uvedené ukazuje, že emisivita daného materiálu závisí od teploty jeho povrchu a vlnovej dĺžky emitovaného žiarenia. Ale závisí aj od smeru žiarenia (pozri obr. 1). Odchýlky emisivity pre uhly vyžarovania iné ako kolmé na rovinu povrchu (tzv. normálové (ε_n)) sú zanedbateľné. Preto pre bežné použitie platí (Incropera & DeWitt, 1996), že

$$\varepsilon \approx \varepsilon_n \quad (6)$$

Tabuľky hodnôt povrchovej emisivity jednotlivých materiálov publikované v normách, resp. odbornej literatúre, sa týkajú najmä hodnôt pri teplote 300 K (26,85 °C) alebo pre najčastejšie situácie ich použitia či výskytu (napr. pre ľad pri 0 °C). V prípade kovov sa uvádzajú hodnoty pre niekoľko teplôt, pretože emisivita ako funkcia teploty a súvisiace chemické procesy sa môžu značne líšiť. Podľa Kirchhoffovho zákona pre väčšinu materiálov pri normálnych teplotách platí, že

$$\alpha = \varepsilon \quad (7)$$

V prípade niektorých materiálov, napr. v prípade kovov, vzťah (7) nemusí nevyhnutne platiť na 100 percent (Incropera & DeWitt, 1996).

1.3 SKLO

Sklo je bezpochyby jedným z najatraktívnejších stavebných materiálov. Umožňuje vizuálne prepojenie medzi vnútorným a vonkajším prostredím budovy, ako aj využitie denného svetla a slnečného tepla. Má zaujímavé vlastnosti (Encyklopédia: Technika, 1963) - okrem priehľadnosti je tvarovateľné nad plameňom a odolné voči kyselinám, čo je obzvlášť dôležité v chemickom priemysle. Vyrába sa z kremičitého piesku s prísadami (uhličitan draselný,



vápenec, sóda, prípadne tetraoxid olova) zahrievaním na vysokú teplotu (cca. 1 600 °C), formovaním a ochladzovaním. Po ochladení stvrdne, ale zachováva si priehľadnosť. Spôsob chladenia skloviny rozhoduje o mnohých rozhodujúcich vlastnostiach skla, najmä o jeho pevnosti. Ploché sklo sa vyrába odlievaním, fúkaním, lisovaním, valcovaním alebo ťahaním (Encyklopédia: Technika, 1963). V minulosti malo najväčší podiel ťahané sklo (Encyklopédia: Technika, 1963): „Sklo v tekutom stave je dostatočne koherentné, aby viselo ako záves na okne. Spôsobov ťahania skla je viacero, ale vždy sa začína tak, že do smaltovanej vane sa ponorí železný rám, na ktorý sa sklo prichytí. Pri vyťahovaní rámu nahor vzniká široký (až 300 cm) nekonečný pás plochého skla, ktorý prechádza valcami a chladičmi a reže sa na tabule. Hrúbku skla je možné regulovať zmenou teploty a rýchlosti ťahania. Takto pripravené tabuľové sklo nie je dokonale hladké a rovnomerne hrubé. Je preto potrebné ho prebrúsiť. Ďalšou možnosťou je naliať roztavené sklo na povrch tekutého cínového kúpeľa. V tekutom stave je cín dokonale plochý a hladký a sklo sa po ňom rozlieva do úplne rovnej dosky.“

Ďalšou veľkou výhodou skla je jeho takmer 100% recyklovateľnosť. Proces úpravy použitého skla je približne rovnaký ako pri výrobe nového skla. Najdôležitejším obmedzením recyklácie skla je podľa Vetropacku jeho farba. Na výrobu bieleho skla je možné použiť iba črepy bieleho skla. Podiel použitého skla pri výrobe teda výrazne závisí od farby vyrábaného skla (Vetropack).

1.4 STAVEBNO-FYZIKÁLNE VLASTNOSTI ZASKLENIA

Na rozdiel od netransparentných konštrukcií, charakterizovaných hlavne súčiniteľom tepelnej vodivosti, λ , v prípade zasklenia sú dôležité aj vlastnosti, ktoré sa dajú pripísať priepustnosti slnečného žiarenia. Existujú dva hlavné typy týchto vlastností - solárne a optické. Solárne vlastnosti sa týkajú viac-menej celého spektra slnečného žiarenia ako integrovaného žiarenia zahŕňajúceho spektrálne aj smerové žiarenie, optické sa týkajú iba viditeľnej časti - svetla a smeru jeho dopadu a odrazu.

„Zrada“ spočíva v tom, že symboly solárnych a optických charakteristík, t. j. priepustnosť (priama priepustnosť), τ , odrazivosť, ρ , a pohltivosť, α , sú rovnaké. Aby sa predišlo nedorozumeniam, je dobré k nim pridávať dolné indexy, ako napríklad „sol“ alebo „opt“. Okrem vyššie uvedených charakteristík sa používa najmä globálna charakteristika solárnych vlastností v podobe koeficientu celkovej priepustnosti slnečnej energie, tzv. solárneho faktora alebo hodnoty g .

Solárny faktor (celková priepustnosť slnečnej energie), g , je definovaný v EN 410:1998 ako súčet priamej solárnej priepustnosti, τ_{sol} , a sekundárneho faktora prechodu tepla, q_i , zasklenia smerom dovnútra. Sekundárny faktor prechodu tepla je spôsobený konvekciou a dlhovlnným infračerveným žiarením tej časti dopadajúceho slnečného žiarenia, ktorá bola zasklením pohltená. Príslušná rovnica pre g -hodnotu je potom:

$$g = \tau_{sol} + q_i \quad (8)$$

Priama priepustnosť slnečného žiarenia, τ_{sol} , je vlastnosťou zasklenia. Je to časť dopadajúceho slnečného žiarenia, ktorá prejde zasklením a dá sa opísať ako primárny tepelný zisk, g_1 , vydelený celkovým dopadajúcim tepelným tokom zo slnečného žiarenia, φ_e (niektoré normy, napr. ISO 15099:2003, namiesto toho používajú symbol I namiesto φ_e pre celkovú hustotu tepelného toku dopadajúceho slnečného žiarenia). Sekundárny súčiniteľ prechodu tepla q_i je závislý od absorpčných faktorov vrstiev zasklenia, ich emisivity (dlhovlnné infračervené žiarenie), ε , a tepelnej vodivosti, Λ , vrátane dutín a povrchového prestupu tepla. Je to absorbovaná časť dopadajúceho slnečného žiarenia, ktorá sa premieňa na vodivý a sálavý tepelný tok smerom dovnútra a možno ju opísať ako sekundárny tepelný zisk, g_2 , delený celkovou hustotou dopadajúceho solárneho tepelného toku, φ_e . Ďalšia rovnica pre g -hodnotu je teda:

$$g = \frac{g_1 + g_2}{\varphi_e} \quad (9)$$

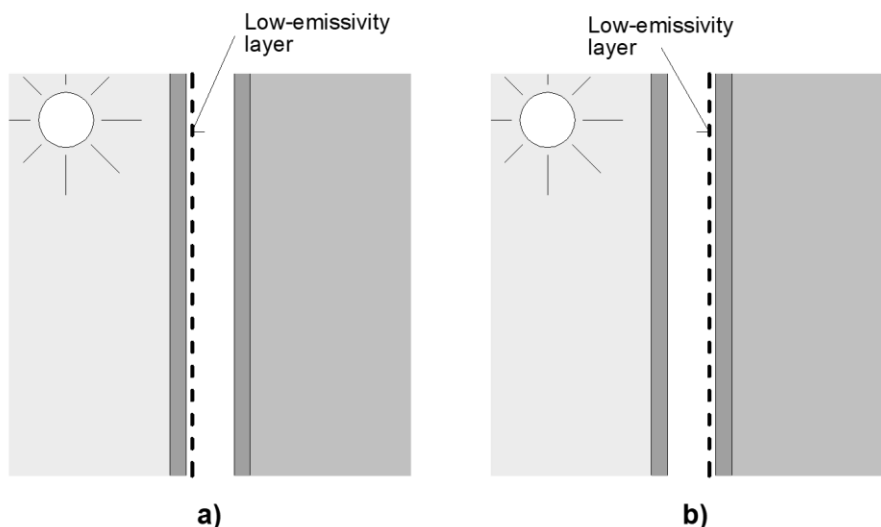
Solárny faktor je jednou z najdôležitejších charakteristík systémov zasklenia, pretože umožňuje okamžité a spoľahlivé posúdenie ich budúceho správania sa z hľadiska solárnych tepelných ziskov. Solárne, ako aj optické a tepelné vlastnosti zasklenia tak možno zistiť pomocou výpočtových postupov stanovených v medzinárodných a európskych normách. Predpokladom sú však namerané hodnoty charakteristík konkrétnych skiel, teda α , τ , ρ , ε a λ . Tie je možné získať od výrobcov skla alebo z kvalitných databáz ako je napr. WIS (www.windat.org). Databáza WIS má tú výhodu, že umožňuje aj výpočet solárnych, optických a tepelných charakteristík systémov zasklenia akejkoľvek konfigurácie, vrátane medzier vyplnených vzduchom / plynom / vákuom, prípadne vetraných medzier, ďalších reflexných vrstiev, tieniacich prvkov a dokonca aj rámov. Hodnoty okrajových podmienok je možné zadávať voľne alebo je možné použiť normatívne údaje (napríklad ISO 15099: 2003 rozlišuje zimné a letné okrajové podmienky). Výsledky z WIS je možné použiť v softvéri na simuláciu energetickej efektívnosti budov, ako aj na simuláciu denného osvetlenia.

1.5 NÍZKO-EMISNÁ VRSTVA

V súčasnosti možno vlastnosti skla výrazne modifikovať (Encyklopédia: Technika, 1963). V stavebníctve sa najčastejšie využívajú dva spôsoby úpravy skiel z hľadiska zlepšenia ich solárnych vlastností - nanášanie reflexných fólií a tzv. povlakovanie alebo pokovovanie. Prvý spôsob, ako už názov napovedá, je zlepšiť odrazivosť viditeľnej časti spektra (svetla). Používa sa tam, kde chceme znížiť záťaž na chladenie vnútorných priestorov. Nevýhodou tohto spôsobu je, že znižuje aj prestup prirodzeného svetla, čo môže viesť k zvýšenému využívaniu umelého osvetlenia a tým, paradoxne, k zvýšeniu vnútorných tepelných ziskov. Druhý spôsob je založený na znížení emisivity povrchu skla nanosením extrémne tenkej vrstvy kovu. Deje sa

tak buď pyrolytickým pokovovaním pri výrobe skla (on-line proces), alebo tzv. magnetrónovou technológiou po vytvrdení skla (off-line proces) (www.glassdbase.unibas.ch). Pokovovaním je možné znížiť emisivitu skla z hodnôt okolo 0,9 až 0,95 (číre sklo) na hodnoty okolo 0,2. Takéto sklo sa nazýva sklo s nízkou emisivitou alebo „low-e“ sklo, ak je pokovovanie na strane skla smerujúcej k exteriéru. Ak je na strane k interiéru, často sa označuje ako takzvané „high-performance“ sklo (v nemčine sa používa výraz „Sonnenschutzglas“), aby sa odlíšili. Stále však pritom ide o sklo s nízkou emisivitou,

Zníženie infračerveného žiarenia smerom dovnútra výrazne znižuje tepelné zaťaženie chladiaceho systému, preto sa „high-performance“ sklo používa hlavne v priestoroch, ktoré je potrebné viac chladiť ako vykurovať. Naopak, „low-e“ sklo sa používa v priestoroch, kde chceme zabrániť tepelným stratám a využiť slnečné žiarenie. Jeho príspevok k zníženiu tepelných strát však nie je taký výrazný ako účinok „high-performance“ skla pri znižovaní tepelných ziskov zo slnečného žiarenia.



Obrázok 2: Typické pozície nízko-emisnej vrstvy v dvojitém zasklení. (a) „High performance“ systém, (b) „Low-e“ systém

Vzhľadom na to, že v našich klimatických podmienkach je nevyhnutné používať systémy zasklenia s minimálne dvoma tabuľkami skla a uzavretou dutinou naplnenou vzduchom alebo vákuom alebo inertnými plynmi a ich zmesami so vzduchom, môže byť nízko-emisná vrstva umiestnená na rôznych pozíciách. Obr. 2 znázorňuje typické pozície nízko-emisnej vrstvy v rámci dvojitého zasklenia v prípade použitia „low-e“ skla a „high-performance“ skla.




Samozrejme, že nízko-emisné sklo sa nepoužíva samostatne, ale v systémoch zasklenia. Ich účinnosť je teda možné zvýšiť napr. v prípade „low-e“ skla uzavretými dutinami vyplnenými inertným plynom alebo vákuom, v prípade „high-performance“ skiel odvetranými vzduchovými medzerami alebo reflexnými sklami na vonkajšej pozícii. Vždy je dobré

plánovaný systém analyzovať, napr. pomocou vhodného softvéru ako je WIS, tak, aby návrh denného osvetlenia alebo predpokladané energetické bilancie skúmaných priestorov čo najlepšie zodpovedali ich skutočnému správaniu.

1.6 SELEKTIVITA

Výber vhodného skla alebo systému zasklenia závisí predovšetkým od požiadaviek na vnútorný komfort plánovaného priestoru a najmä v lete môžu byť značne protichodné. Napríklad v kancelárskych priestoroch je potrebné dosiahnuť čo najlepšie denné osvetlenie, ale chceme zabrániť aj ich prehrievaniu. Použitie nízko-emisnej vrstvy znižuje svetelnú priepustnosť skla, resp. systému zasklenia, čo je nežiaduci vedľajší efekt znižovania solárneho faktora. Výrobcovia skla preto okrem hodnôt g a U zavádzajú aj takzvanú faktor selektivity skla alebo systému zasklenia, aby preukázali jeho vhodnosť z hľadiska uvedených protichodných požiadaviek.

Tab 1. Vlastnosti typického číreho, „high performance“ a „low-e“ skla.

Typ zasklenia		Priepustnosť svetla (τ_{opt}) [-]	g -hodnota [-]	U -hodnota [W/(m ² K)]	Faktor selektivity, S [-]
	Číre zasklenie	0,885	0,840	4,69	1,05
	High Performance zasklenie	0,565	0,472	2,54	1,20
	Low-e zasklenie	0,565	0,583	3,96	0,97

Selektivita je pomer optickej priepustnosti (priepustnosti svetla), τ_{opt} , k hodnote g . Čím je vyššia, tým lepšie vyhovuje sklo alebo systému zasklenia z hľadiska protichodnosti požiadaviek na kvalitu denného osvetlenia a zníženie letného prehrievania. Maximálna, súčasnými technológiami dosiahnuteľná selektivita je okolo 2.

Tabuľka 1 ukazuje faktor selektivity, S , svetelnú priepustnosť, τ_{opt} , a g - a U -hodnoty typického číreho, „high performance“ a „low-e“ skla. Samozrejme, konkrétne hodnoty iných skiel sa môžu líšiť v závislosti od výrobcu a použitej technológie. Hodnoty faktora selektivity, ktoré je možné dosiahnuť súčasnými technológiami, sú uvedené v tabuľke 2 (Brandi, 2005).

Tab 2. Hodnoty selektivity, ktoré sa dajú dosiahnuť súčasnými technológiami (Brandi, 2005)

Typ skla	Priepustnosť svetla (τ_{opt}) [-]	g -hodnota [-]	Selektivita, S [-]
Low-E (Tepelno-izolačné sklo)	0,70	0,60	1,17
High performance sklo (farebné)	0,25	0,21	1,19
High performance sklo (neutrálne)	0,66	0,33	2,00

REFERENCES

Incropera F. P., DeWitt D. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fourth Edition*, John Wiley & Sons, USA.

Encyclopedic work (1963): *Technology*, Albus Books Ltd., London, UK (in Slovak).

Vetropack: *Sklo ostáva sklom (Glass remains glass)*, Company leaflet, Vetropack Nemšová s.r.o., SK (in Slovak).

Brandi U. et al. (2005). *Detail Praxis: Tageslicht / Kunstlicht. Grundlagen, Ausführung, Beispiele*, Edition Detail, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, Munich, Germany (in German).

Van Dijk D., Goulding, J. (2002). *WIS Reference Manual*, TNO - Building and Construction Research, Department of Sustainable Energy and Buildings, Delft, The Netherlands (www.windat.org).

EN 410 (1998): *Glas in Building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing*

ISO 15099 (2003): *Thermal performance of windows, doors and shading devices — Detailed calculations*

<http://www.glassonweb.com/glassmanual>

<http://www.glassdbase.unibas.ch>



Financované Európskou úniou. Vyjadrené názory a postoje sú názormi a vyhláseniami autora(-ov) a nemusia nevyhnutne odrážať názory a stanoviská Európskej únie alebo Európskej výkonnej agentúry pre vzdelávanie a kultúru (EACEA). Európska únia ani EACEA za ne nepreberajú žiadnu zodpovednosť.

Spolufinancované
Európskou úniou
cez program Erasmus+



SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

