



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM CHOVÁNÍ VLÁKNITÝCH MATERIÁLOVÝCH STRUKTUR ZA SNÍŽENÉHO TLAKU

STUDY OF BEHAVIOR OF FIBER STRUCTURES UNDER LOW PRESSURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Magdaléna Heliová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Magdaléna Heliová
Název	Studium chování vláknitých materiálových struktur za sníženého tlaku
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [2] VAVERKA, J.; KOZEL, V.; LÁDYŠ, L.; LIBERKO, M.; CHYBÍK, J. Stavební fyzika 1, urbanistická stavební a prostorová akustika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. 343 s. ISBN 80-214-1283-6.
- [3] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 209 s. ISBN 80-214-2117-7.
- [4] KÜNZEL, H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [5] V. Nemanič, M. Žumer, New organic fiber-based core material for vacuum thermal insulation, Energy and Buildings 90 (2015) 137-141.
- [6] S. Brunner, K. G. Wakili, T. Stahl, B. Binder, Vacuum insulation panels for building applications—Continuous challenges and developments, Energy and Buildings 85 (2014) 592-596.
- [7] X. Di, Y. Gao, Ch. Bao, S. Ma, Thermal insulation property and service life of vacuum insulation panels with glass fiber chopped strand as core materials, Energy and Buildings 73 (2014) 176-183.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce se bude věnovat studiu chování vláknitých organických izolantů za vysoce sníženého tlaku (po vakuu). Cílem bude popsat princip přenosu tepla a navrhnout (i ověřit) vláknité izolanty s možností využití pro výrobu vakuových izolačních panelů VIP. Cílem bude především navrhnout využití odpadních textilních vláken (jako jsou například odprachy z recyklace bavlněného textilu, apod.), případně využití vláken pocházejících ze zemědělství, pro výrobu vakuových izolací. Cílem bude především provedení teoretického návrhu těchto izolantů, provedení laboratorní výroby zkušebních vzorků a ověření chování experimentálně vyrobených izolantů za normálního i sníženého tlaku (po vakuu).

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem chování vláknitých organických izolantů za vysoce sníženého tlaku (až po vakuum). V teoretické části práce jsou popsány principy přenosu tepla a dále vývoj, výroba, použití a trvanlivost vakuových izolačních panelů. V praktické části se pro výrobu jádra VIP použila odpadní vlákna z textilního průmyslu a zemědělství. Na experimentálně vyrobených jádrových izolantech bylo provedeno ověření chování za normálního i sníženého tlaku (až po vakuum).

KLÍČOVÁ SLOVA

Vakuum, vakuové izolační panely, tepelná vodivost, izolace, alternativní materiály, přenos tepla

ABSTRACT

The diploma thesis deals with study of behavior of fibrous organic insulants under greatly reduced pressure (even to vacuum). Development, production and durability of vacuum insulating panels are described in the theoretical part as well as principles of heat transfer. Method for production of core of VIP, created using waste fibers from textile industry and agriculture, is described in the practical part. Verification of behavior during normal and reduced pressure (even to vacuum) was carried out on experimentally made core insulants.

KEYWORDS

Vacuum, vacuum insulation panels, thermal conductivity, insulation, alternative materials, heat transfer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Magdaléna Heliová *Studium chování vláknitých materiálových struktur za sníženého tlaku*. Brno, 2019. 85 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Studium chování vláknitých materiálových struktur za sníženého tlaku* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 9. 1. 2019

Bc. Magdaléna Heliová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu práce, panu doc. Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D., za odborné vedení, připomínky, rady, trpělivost a ochotnou spolupráci při vzniku této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD	10
CÍL PRÁCE.....	11
I. TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TEPELNÁ OCHRANA BUDOV	12
2 PRINCIP ŠÍŘENÍ TEPLA.....	15
2.1 PŘENOS TEPLA V JÁDROVÝCH IZOLANTECH.....	19
2.1.1 VEDENÍ TUHOU MATRICÍ.....	19
2.1.2 PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM (SÁLÁNÍM)	23
2.1.3 PŘENOS TEPLA PLYNNOU MATRICÍ.....	24
2.2 TEPELNÁ VODIVOST VAKUOVÝCH IZOLAČNÍCH PANELŮ	25
3 VAKUOVÉ IZOLAČNÍ PANELY	27
3.1 VÝVOJ VAKUOVÝCH IZOLAČNÍCH PANELŮ	28
3.2 SLOŽENÍ VAKUOVÝCH IZOLAČNÍCH PANELŮ	29
3.2.1 JÁDRO.....	30
3.2.2 GETRY A VYSOUŠEDLA.....	36
3.2.3 OBÁLKA.....	36
3.2.4 VÝROBA VIP	38
4 ŽIVOTNOST VIP	40
5 POUŽITÍ VAKUOVÝCH IZOLAČNÍCH PANELŮ	43
II. PRAKTICKÁ ČÁST.....	50
6 CÍL PRÁCE	50
7 METODIKA PRÁCE.....	50
7.1 POUŽITÉ SUROVINY A MATERIÁLY	51
7.2 VÝROBA JÁDROVÝCH IZOLANTŮ.....	53
7.2.1 VÝROBA VZORKŮ Z ODPRACHŮ BAVLNY A LNU	54
7.2.2 VÝROBA VZORKŮ Z RECYKLOVANÉ TEXTILIE.....	60
7.3 STANOVENÍ VLASTNOSTÍ VYROBENÝCH JÁDROVÝCH IZOLANTŮ.....	61
7.3.1 STANOVENÍ TLOUŠTKY A DÉLKY VLÁKEN	61
7.3.2 STANOVENÍ TLOUŠTKY IZOLANTŮ	61
7.3.3 STANOVENÍ ROZMĚRŮ	62
7.3.4 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI	63
7.3.5 STANOVENÍ SOUČinitele TEPELNÉ VODIVOSTI	63
7.4 VYHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ JÁDROVÝCH IZOLANTŮ	64

7.4.1	STANOVENÍ TLOUŠŤKY A DÉLKY VLÁKEN	64
7.4.2	STANOVENÍ ROZMĚRŮ, TLOUŠŤKY, OBJEMOVÉ A PLOŠNÉ HMOTNOSTI 66	
7.4.3	STANOVENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI	69
7.4.4	STANOVENÍ SOUČinitele TEPELNÉ VODIVOSTI NA TEPLITĚ	72
7.4.5	STANOVENÍ HODNOTY $P_{1/2}$ [MBAR]	73
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	77
9	ZÁVĚR.....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM GRAFŮ.....	84
	SEZNAM TABULEK.....	85

ÚVOD

V současné době jsou čím dál větší nároky v oblasti tepelné ochrany budov. Nové objekty podléhají stále náročnějším požadavkům pro nízkoenergetické nebo pasivní budovy a je snaha o častějším využití moderních tepelně izolačních výrobků s lepšími tepelně izolačními vlastnostmi při zachování ekonomičnosti staveb. Klasické tepelně izolační materiály se pro splnění přísných požadavků používají v poměrně vysokých tloušťkách, což vytváří stěny velkých tloušťek a negativně působí z estetického hlediska. V některých detailech ani není možné vysoké tloušťky izolantu aplikovat. Díky nedostatečně dobrým tepelně izolačním vlastnostem tradičních materiálů se neustále inovují nové produkty za účelem zvýšení tepelně izolační schopnosti a zároveň snížení tloušťky.

Mezi poměrně nové tepelně izolační výrobky patří vakuové izolační panely, které se aktuálně nejvíce využívají v chladírenském průmyslu. Extrémně nízký součinitel tepelné vodivosti (cca 10x nižší než u konvenčních izolantů) při zachování minimální tloušťky je to, díky čemu vakuové izolační panely několikanásobně převyšují tradiční tepelné izolanty jako je polystyren či minerální vlna. Použití VIP ve stavebnictví značně limitují vysoké výrobní náklady a problematika zabudování těchto izolantů do stavebních konstrukcí. Nejdražší část vakuových izolačních panelů je jejich jádro, kde se v současnosti nejvíce používá materiál typu pyrogenního oxidu křemičitého nebo skleněných vláken. Výzkumy se zajímají o nalezení nového ekonomicky efektivního jádrového materiálu. Jako nadějně se jeví materiály na bázi druhotných surovin, které mají dostatečně nízký součinitel tepelné vodivosti při razantním snížení výsledné ceny výrobku.

Diplomová práce se zabývá zejména řešením na téma vakuových izolací. V teoretické části jsou zpracovány informace a poznatky zejména jádrových izolantů a obálek, ze kterých jsou tvořeny vakuové izolační panely. Dále se práce věnuje použití VIP ve stavebnictví, trvanlivostí a životností. Praktická část se zaměřuje na výběr vhodného materiálu pro jádrovou část z druhotných surovin. Klíčovým cílem kritériem pro posouzení u vyrobených vzorků bylo stanovení součinitele tepelné vodivosti v závislosti na tlaku.

CÍL PRÁCE

Diplomová práce se bude věnovat studiu chování vláknitých organických izolantů za vysoce sníženého tlaku (po vakuu). Cílem bude popsat princip přenosu tepla a navrhnout (i ověřit) vláknité izolanty z možnosti využití pro výrobu vakuových izolačních panelů /VIP. Cílem bude především navrhnout využití odpadních textilních vláken (jako jsou například odprachy z recyklace bavlněného textilu apod.), případně využití vláken pocházejících ze zemědělství, pro výrobu vakuových izolací. Cílem bude především provedení teoretického návrhu těchto izolantů, provedení laboratorní výroby zkušebních vzorků a ověření chování experimentálně vyrobených izolantů za normálního i sníženého tlaku (po vakuu).

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEPELNÁ OCHRANA BUDOV

Tepelná ochrana budov v rámci ČR vychází obecně z požadavků zákona o hospodaření energií 406/2000 Sb. Ve znění pozdějších předpisů [27] a jeho prováděcí vyhlášky 78/2013 Sb O energetické náročnosti stavebních konstrukcí, ve znění pozdějších předpisů [28]. Dále pak z požadavků vyhlášky 268/2009 O technických požadavcích na stavby, ve znění pozdějších předpisů. [29] Konkrétní požadavky na vlastnosti jednotlivých konstrukcí uvádí norma ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov – požadavky. [30] Obálkou budovy norma rozumí soubor všech teplosměnných konstrukcí na systémové hranici celé budovy nebo zóny, které jsou vystaveny přilehlému prostředí (jako je venkovní vzduch, přilehlá zemina, vnitřní vzduch nevytápěného prostoru). [1]

Dodržením normativních požadavků při návrhu a výstavbě stavebních konstrukcí by měla být zajištěna zejména prevence vzniku tepelně technických vad a poruch budov, tepelná pohoda uživatelů, ochrana zdraví a zdravé životní podmínky. Dodržení požadavků dle normy musí být po splněno po ekonomicky přiměřené životnosti konstrukcí a budov, a to při jejich běžné údržbě a při působení běžně předvídatelných vlivů. [1]

Norma pro tepelně technické požadavky (ČSN 73 0540-2) zohledňuje hlavně šíření tepla, vlhkosti a vzduchu konstrukcemi, místnostmi a budovami. Požadované hodnoty stanovují úroveň technického požadavku, prokazovanou a písemně dokládanou v návaznosti na zvláštní předpisy i stavebním řízením. Doporučené hodnoty stanovují úroveň obvykle potřebnou pro energeticky zvláště úsporné budovy. [1]

Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla vyjadřuje schopnost stavebního materiálu nebo konstrukce tepelně izolovat. Hodnotí se současně dvěma způsoby, a to buď

pro jednotlivé konstrukce, nebo pro budovu jako celek. Oba požadavky musí být splněny současně, pokud není výjimečně připuštěno jinak. [1]

Součinitel prostupu tepla U $W/(m^2 \cdot K)$ se hodnotí pro jednotlivé konstrukce vytápěných budov. Tato veličina se měří v prostorech a navrhovanou relativní vlhkosti vnitřního vzduchu $\varphi_i \leq 60 \%$ alespoň takovou hodnotu, aby splňoval podmínku [1]:

$$U \leq U_N \quad (1)$$

Kde

U_N – je požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla $[W/(m^2 \cdot K)]$ [1]

Součinitel prostupu tepla pro budovu jako celek se hodnotí jako průměrný součinitel prostupu tepla U_{em} ve $W/(m^2 \cdot K)$, budovy nebo vytápěné zóny budov musí splňovat podmínku [1]:

$$U_{em} \leq U_{em,N} \quad (2)$$

Kde:

$U_{em,N}$ – je požadovaná hodnota průměrného součinitele prostupu tepla $[W/(m^2 \cdot K)]$

Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti λ $[W/(m \cdot K)]$ vyjadřuje schopnost stejnorodého, izotropního materiálu při dané střední teplotě vést teplo a je dán vztahem:

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-grad \theta}$$

Kde: \vec{q} – je vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením, proudícího stejnorodým izotropním materiálem $[W/m^2]$, $grad \theta$ – je gradient teploty $[K/m]$. [1]

Navrhovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti λ_u ve $W/(m^2 \cdot K)$ stavebních materiálech/ výrobcích pro vnitřní konstrukce, ve kterých nedochází ke kondenzaci vodní páry a které jsou ve styku s vnitřním prostředím s částečným tlakem vodní páry $p_{vi} \leq 1491$ Pa, se stanoví vztahem:

$$\lambda_{u,i} = \lambda_k \quad (3)$$

Kde:

λ_k – je charakteristická hodnota součinitele tepelné vodivosti, tj. hodnota součinitele tepelné vodivosti odvozená pro charakteristickou hmotnostní vlhkost. [1]

Tepelný odpor

Tepelný odpor R [$m^2 \cdot K/W$] je tepelně izolační vlastnost vrstvy materiálu, popř. nestejnorodé vrstvy materiálu, popř. stavební konstrukce dané tloušťky. Je-li známa hodnota součinitele tepelné vodivosti vrstvy materiálu a je-li konstantní, povrchy kolmé na směr tepelného toku jsou vzájemně rovnoběžné a vrstvou tak proudí rovnoměrný tepelný tok. Tepelný odpor je definován vztahem: [1]

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4)$$

Kde:

d je tloušťka vrstvy (tloušťka vrstvy v konstrukci) v [m], λ je součinitel tepelné vodivosti [$W/(m \cdot K)$] [2]

Faktor difúzního odporu

Faktor difúzního odporu μ [-] je definován jako relativní schopnost vrstvy materiálu, propouštět vodní páru difuzí, je poměrem difuzního odporu materiálu a difuzního odporu vrstvy vzduchu o téže tloušťce, při smluvních podmínkách, je definován vztahem:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta}$$

Kde: δ_a – je součinitel difuzní vodivosti vzduchu [$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$], δ – je součinitel difuzní vodivosti materiálu [$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$]

2 PRINCIP ŠÍŘENÍ TEPLA

Šíření tepla je termodynamický děj, při kterém dochází k výměně tepla mezi dvěma tělesy s různou teplotou. Princip tepelné výměny spočívá v tom, že teplejší těleso předává svoji vnitřní energii chladnějšímu tělesu, dokud se teplota v obou tělesech nevyrovná. [3]

Výměna tepla může probíhat několika způsoby:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- sáláním (radiací, zářením). [3]

Přenos tepla vedením (kondukcí)

Teplo se vedením (kondukcí) šíří zejména v tuhých látkách, ale lze i v kapalinách a plynech, pokud v nich nedochází k proudění. Přenos tepla vedením (kondukcí) nastává, když si částice jedné látky vyměňují svoji kinetickou energii. Tepelná vodivost se často chápe jako změna teplot v různých částech tělesa v závislosti na čase. Jeho podmínkou je existence spojitého látkového prostředí. Probíhá ve všech látkách a ve všech skupenstvích, neprobíhá však ve vakuu. [3]

Mezi základní veličiny pro vedení tepla jsou tepelný tok Φ a hustota tepelného toku q .

Tepelný tok Φ , vyjadřuje rychlost průchodu tepla danou plochou nebo také výkon přenášený při průchodu danou plochou a je definován diferenciálním podílem tepla Q [J], které projde nějakou plochou (průřezem) S za čas t [s] a tohoto času:

$$\Phi = \frac{Q}{t} [W] \quad (7)$$

Jednotka tepelného toku je shodná s jednotkou výkonu (W), proto se někdy tepelný tok označuje také jako tepelný výkon. [3]

Hustota tepelného toku q je v daném místě vektor, jehož velikost q se rovná podílu tepelného toku $d\Phi$ procházejícího v daném okamžiku zvolenou elementární plochou kolmou ke směru průchodu tepla a plošného obsahu dS této plochy:

$$q = \frac{d\Phi}{dS} [W \cdot /m^2] \quad (8)$$

Velikost hustoty tepelného toku je rovna tepelnému toku, který prochází jednotkovou plochou kolmou na směr přenosu tepla. [4]

Fouriérův zákon vedení tepla

Na základě experimentálních výsledků stanovil v r. 1811 francouzský matematik a fyzik Jean Batiste Joseph Fourier (1768–1830) závislost hustoty tepelného toku q na gradientu teploty pro vedení tepla rovnicí:

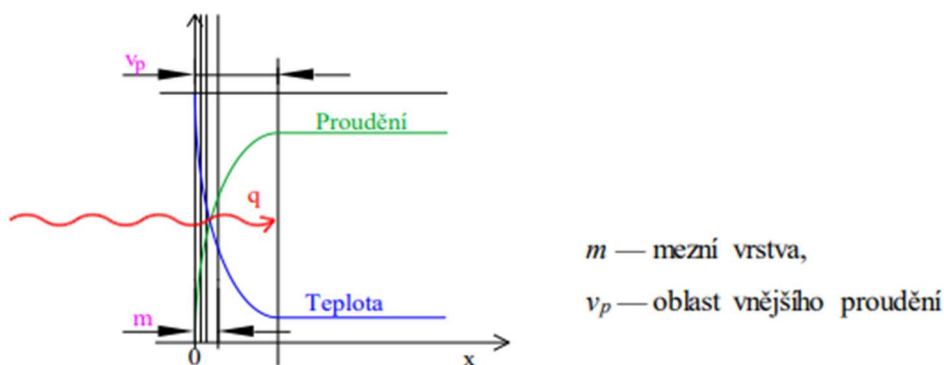
$$q = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} [W/m^2] \quad (10)$$

kde, $d\theta/dx$ je gradient teploty [K/m] a konstanta úměrnosti λ je součinitel tepelné vodivosti, který vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo. [3]

Přenos tepla prouděním (konvekcí)

Přenos tepla prouděním se šíří jen v kapalných a plyných látkách. Jedná se o přenos, který je způsobený pohybem tekutých látek (př. pohyb vody nebo vzduchu) a přitom přenášejí teplo. energii ve formě tepla s sebou přenáší proudící tekutina.

Pro přenos tepla prouděním je důležitá existence látkového prostředí. Proudění látek rozlišujeme jako proudění volné a nucené. Volné proudění vzniká tehdy, když dochází k pohybu v důsledku různých teplot v objemu kapaliny nebo plynu a tím i různých hustot, které se vyrovnávají. Pomocí vnějších sil (čerpadlo, ventilátor) vzniká nucené proudění tepla, to se využívá v technické praxi pro zesílení přenosu tepla. Výhodou proudění tepla je v tom, že prouděním lze i chladit, tedy proudění probíhá i proti teplotnímu spádu. [3] [5]



Obrázek 1: Schéma proudění vzduchu a teploty na povrchu tělesa [14]

V praxi lze dojít k tomu, že vynucené proudění může probíhat zároveň s přirozeným. Mezi povrchem tělesa a kapalným či plynným prostředím může probíhat výměna tepla přestupem. Rozlišují se dva způsoby proudění:

- a) Laminární – jedná se o rovnoběžný pohyb vzduchu ve směru proudu
- b) Turbulentní – vyznačuje se neuspořádaným, chaotickým pohybem vzduchu

Podle Newtonova zákona se proudění vypočítá jako:

$$q_k = h_k \cdot (\theta_s - \theta_a) \quad (10)$$

Kde: h_k je součinitel přestupu tepla při přirozeném a nuceném proudění [$W/(m \cdot k)$], θ_s je teplota povrchu konstrukce [$^{\circ}C$], θ_a je teplota vzduchu [$^{\circ}C$]

Lze říci, že přestup tepla prouděním závisí na mnoha parametrech, které charakterizují stav a pohyb vzduchu, tvar a rozměry tělesa. [5]

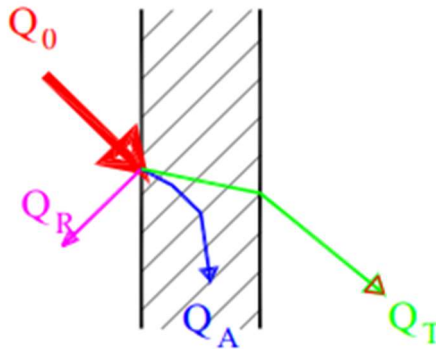
Přenos tepla sáláním (radiací, zářením)

Při přenosu tepla sáláním dochází k přenosu elektromagnetických vln o délce 760 až 12000 nm, ty se šíří rychlostí světla. Teplotním stavem různých těles se určuje jejich tepelné sálání. I při stejné teplotě různých těles je sálavá schopnost jiná. Sálavá schopnost těles nesmí překročit maximální hodnotu, maximální sálavá hodnota odpovídá vlastnostem černého tělesa. Intenzita sálání je odlišná

u každého tělesa a závisí na jejich teplotě, schopnosti sálat, pohlcovat a odrážet teplo, na jejich tvaru, rozměru a vzájemném usprádaní. Celková zářivá energie na dopadající těleso se vypočítá jako:

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_T \quad (11)$$

Kde: Q_A je část tepla pohlcovaná tělesem, Q_R je část tepla odražená tělesem, Q_T je část tepla procházející tělesem



Obrázek 2: Schéma rozdělení zářivé energie dopadající na povrch tělesa [5]

Pro přenos není potřeba látkové prostředí. Elektromagnetickým zářením se přenáší teplo, a to i ve vakuu. Teplota těles předávajících si teplo může být libovolně nižší nebo vyšší, pokud je prostor mezi zářícím a ozařovaným tělesem vyplněn látkou. Dle tohoto způsobu lze vytápět za pomoci infrazářičů, nebo tepelně zpracovávat potraviny. [3] [5]

Pro přenos tepla sáláním platí dva zákony a to Stefan-Boltzmannův zákon a Kirchhoffův zákon a ten je vyjádřen vztahem, kde jmenovatel vyjadřuje hustotu zářivého toku úměrnou čtvrté mocnině absolutní teploty:

$$\frac{C}{C_{\xi}} = \frac{C\left(\frac{T}{100}\right)^4}{C_{\xi}\left(\frac{T}{100}\right)^4} = A < 1 \quad (12)$$

Z toho vyplývá, že $C = A \cdot C_{\xi}$,

Kde: A je součinitel sálaní reálných těles, C_{ξ} je součinitel sálaní černého tělesa [W/(m²·k)]

Platí, že čím je světlejší barva povrchu, tím je hodnota součinitele sálání nižší, povrch poté pohlcuje menší množství tepelné energie [5]

2.1 PŘENOS TEPLA V JÁDROVÝCH IZOLANTECH

Výborné izolační vlastnosti nabízejí tzv. vakuové izolační panely (VIP). Vakuované izolace mohou mít při stejné tloušťce až desetkrát vyšší tepelný odpor, než běžné izolanty jako jsou například polystyrenové nebo polyuretanové pěny. Ve struktuře VIP probíhá přenos tepla všemi třemi způsoby tedy: vedením, prouděním i sálání. Základem VIP je jádrový izolant, který musí mít takové mechanické vlastnosti, aby panel vydržel okolní atmosférický tlak po zavakuování. Materiál jádra musí být porézní a mít co nejmenší zastoupení pevné fáze (materiálové kostry), aby byl omezen přenos tepla vedením. Zároveň musí mít velmi jemnou pórovou strukturu, aby v jeho struktuře nedocházelo k přenosu tepla prouděním. Proto se materiály do jádra používají ve formě prášků, pěn a vláken.

Proudění zbytkových plynů závisí na tlaku plynu, který se zvyšuje časem infuzí atmosférických plynů a odplyněním plynů uvnitř materiálů. Přenos tepla závisí na struktuře a optických vlastnostech jádra. Celková efektivita vodivosti λ_{eff} vakuových izolačních panelů lze určit součtem vedení λ_s , proudění λ_g a sálání λ_r : [6]

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r [mW/(m \cdot K)] \quad (13)$$

2.1.1 VEDENÍ TUHOU MATRICÍ

Práškové izolace

Jako jádrový izolant materiál pro VIP se často používá práškový izolant, jako je například perlit, oxid křemičitý. Je obtížné popsat efektivní pevnou vodivost, kvůli náhodnému uspořádání struktur vrstev. Za pomoci dvou modelů můžeme zkoumat dva případy uspořádání vrstev. První model, řeší jednoduché kubické

uspořádaní kuliček a je považován za typický model (obr.3 vlevo) a druhý model řeší hexagonální uzavřený model kuliček. (obr.3 vpravo). [6]

Pro kubický model, lze vypočítat efektivní tepelnou vodivost $\lambda_{s,powder}$ dle:

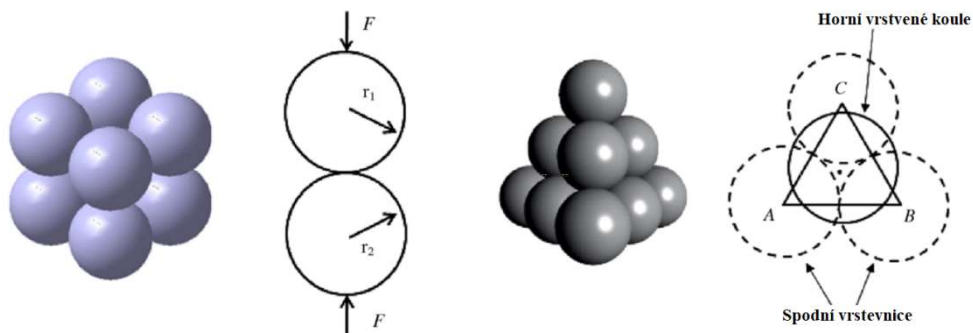
$$\lambda_{s,powder} = \lambda_p \cdot \left(\frac{3 \cdot (1-\nu^2) \cdot p_{atm}}{E} \right)^{1/3} \quad (14)$$

Kde: E je Youngův modul [GPa], ν je Poissonova konstanta, p_{atm} je atmosférický tlak [Pa], λ_p je tepelná vodivost prášku [W/(m·K)]

Pro hexagonální model, lze vypočítat efektivní tepelnou vodivost $\lambda_{s,powder}$ dle:

$$\lambda_{s,powder} = \lambda_p \cdot \left(\frac{96 \cdot (1-\nu^2) \cdot p_{atm}}{E} \right)^{1/3} \quad (15)$$

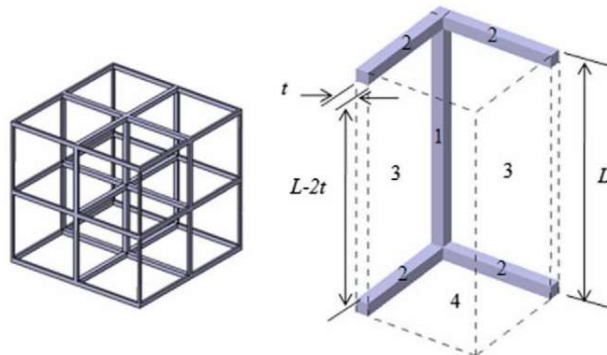
Pěnové izolace



Obrázek 3: Jednoduchý kubický model (vlevo) a šestiúhelníkový uzavřený model (vpravo) [6]

Pěnové izolace jsou jedny z nejpoužívanějších izolací vůbec, a to hlavně kvůli své jednoduché výrobě a nízkým výrobním nákladům (v přepočtu na jednotku objemu). Principem je uzavření plynu, který málo vede teplo do uzavřených buněk. Vedení tepla tedy nastává přes vzpěry a buněčnou stěnu. Jako materiál pro jádra vakuových izolačních panelů se obvykle používají pěny s otevřenými buňkami (např. polyuretany) díky svému snadnému vakuování. Proto se ohledně vakuových

izolačních panelů používá pouze typ s otevřenými buňkami. Máme tu znázorněn jednoduchý kubický model (obrázek č. 4). [6]



Obrázek 4: Jednoduchý kubický model pěny s otevřenými buňkami [6]

V důsledku tlakových sil, nedochází k vybočení vzpěry, protože se předpokládá, že pěna je tuhá. Celkový tepelný odpor se skládá ze čtyř částí, pokud je dráha proudění tepla rovnoběžná se svislou čarou elementárního článku.

Části celkového tepelného odporu jsou:

- odpor ve svislé vzpěře,
- odpor v horizontální vzpěře,
- odpor v plynu mezi vodorovnými vzpěrami,
- odpor v prázdném prostoru.

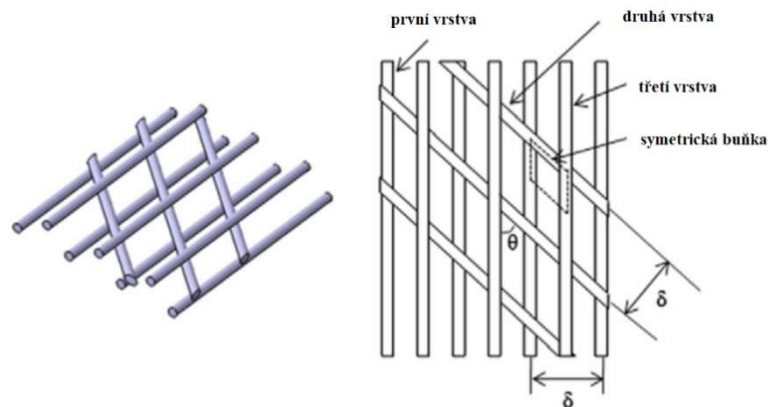
Efektivní tepelnou vodivost $\lambda_{s,foam}$ lze vyjádřit následovně:

$$\lambda_{s,foam} = \frac{4\lambda_{st}t^2 + \lambda_g(L-2t)^2}{L^2} + \frac{4\lambda_{st}\lambda_g(L-2t)t}{2L\lambda_g t + L\lambda_{st}(L-2t)} \quad (16)$$

Kde: λ_{st} – tepelná vodivost vzpěry [W/(m·K)], t je tloušťka vzpěry [m], L je délka buňky [m], λ_g je tepelná vodivost plynu ve volném prostoru [W/(m·K)]

Vláknité izolace

Vláknité materiály jsou velmi oblíbené pro své široké použití, hlavně kvůli své nízké hmotnosti a vysoké teplotní odolnosti. Efektivní tepelná vodivost závisí na mnoha parametrech, zejména na tepelné vodivosti tuhé fáze, na Youngovu modulu, pórovitosti, tlaku a orientaci vláken. Vlákna bývají orientována náhodně vůči směru proudění tepla. Dle modelu, který se skládá z rovinných vrstev rovnoměrně rozložených rovnoběžných vláken umístěných kolmo k hlavnímu směru proudění tepla (obrázek č. 5). První vrstva i druhá vrstva vláken kruhového průřezu jsou nakloněny pod úhlem θ a vlákna ve třetí vrstvě se považují za ideálně umístěné, a tím se maximalizuje cesta tepelného toku. [6]



Obrázek 5: Jednoduchý model vláknité izolace [6]

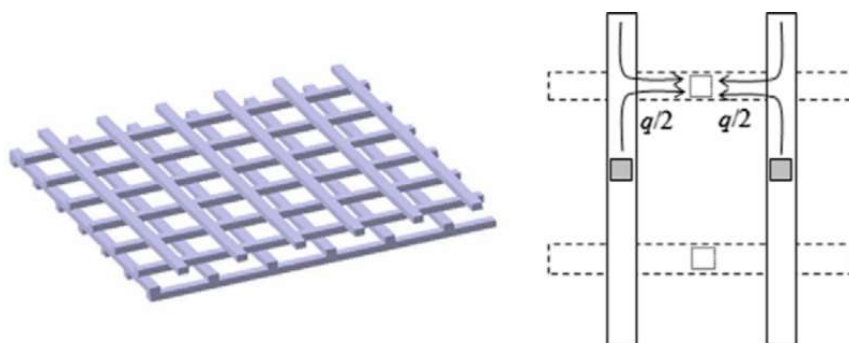
Efektivní tepelnou vodivost $\lambda_{s, fiber}$ lze vyjádřit následovně:

$$\lambda_{s, fiber} = 16\lambda_f \cdot \left[\left(\frac{\sqrt{2}\pi^4 E}{24p(1-\pi^4) \cdot (1-\nu^2)} \right)^{1/3} + \frac{\pi^2}{4(1-\pi)^3 \cdot \sin^2 \theta} \right]^{-1} \quad (17)$$

Stupňovitá struktura nosníku

Materiály pro vakuové izolační panely musí odolávat stlačení vnějšího atmosférického tlaku a mít tak minimální tepelnou vodivost. Pro snížení pevné vodivosti by dráha tepelné vodivosti měla být nepřímo dlouhá. Za tohoto předpokladu můžeme uvažovat stupňovitou nosníkovou strukturu. Kde v první vrstvě jsou rovnoběžné paprsky, které mají obdélníkový průřez a jsou umístěné

v pravém úhlu k druhé vrstvě. Paprsky ve třetí vrstvě jsou umístěné v polovině pole mezi první a druhou vrstvou paprsku. Obdélníkový průřez se používá pro zvýšení tuhosti svazku. [6]

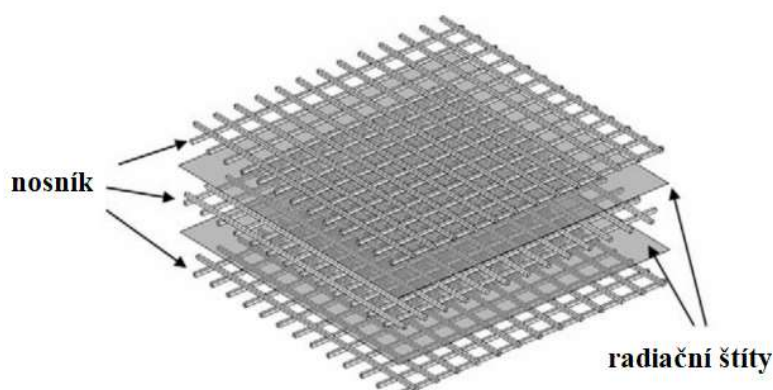


Obrázek 6: Rozložená struktura nosníku [6]

2.1.2 PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM (SÁLÁNÍM)

Důležité pro přenos tepla pro vakuové izolační panely je sálání při nízkém tlaku. Sálání z vnějšího povrchu je zeslabováno pomocí rozptylu a absorpce. Podle Petrovovova rozlišujeme dva přístupy pro popis přenosu sálání v izolačních strukturách. První přístup je založený na rovnici zářícího přenosu tepla (RTE - radiative transfer equation), to se může řešit číselně, pokud jsou známy hodnoty jako je index lomu, teplota, absorpční koeficient. Nebo je známý druhý přístup k řešení a v tomhle řešení se používá aproximace difuze a jedná se o nejpoužívanější metodu. Závisí to na koeficientu extinkce (což je součet koeficientu absorpce a rozptylu daného prostředí), teplotě jádra a hustotě. [6]

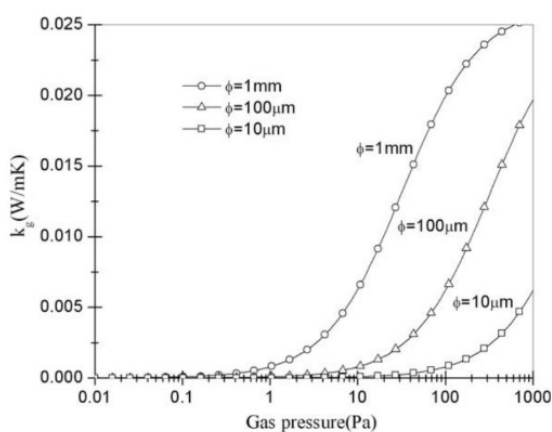
Snižování přenosu záření lze pomocí přidání reflexních povrchů do mezer, které fungují jako štíty radiace. Tím je možná vícevrstvý radiální štít mezi nosníky. Jako materiál se používá hliníková fólie, a to díky své nízké ceně. Tloušťka vakuového izolačního panelu je větší, než je tloušťka hliníkové fólie, proto lze zanedbat tepelný odpor, který proudí přes středovou část. Problém může nastat u vertikálního směru vedení obálkou, ten však není nijak ošetřen. [6]



Obrázek 7: Vícevrstvý střídaný paprsek s radičními štíty [6]

2.1.3 PŘENOS TEPLA PLYNNOU MATRICÍ

U vakuových izolačních panelů se ve vyskytuje ve vnitřních prostorech zbytkový plyn. Tepelná vodivost plynu je nezávislá na tlaku, když se jedná o plynné vedení, lze ho považovat za spojitě. Tepelná vodivost pro plyn se výrazně snižuje, pokud je cesta pro molekuly plynu přibližně stejná nebo větší než vzdálenost, přes kterou proudí teplo. Velikost pórů je zásadní, jelikož menší póry jsou více citlivé na změnu tlaku ve vakuu než větší póry. Na obrázku č. 8 jsou zaznačeny plynné tepelné vodivosti s různou velikostí pórů. [6]



Obrázek 8: Tepelné vodivosti v závislosti na různé velikosti pórů [6]

2.2 TEPELNÁ VODIVOST VAKUOVÝCH IZOLAČNÍCH PANELŮ

Izolační vlastnosti vakuových izolačních panelů jsou určeny efektivní tepelnou vodivostí. Izolační vlastnosti jsou lepší, když je tepelná vodivost nižší. [7]

$$\lambda_P = \lambda_{COP} + \lambda_{TB} [mW/(m \cdot K)] \quad (18)$$

Kde: λ_{TB} je součinitel tepelné vodivosti obálky [W/(m·K)], λ_{COP} je součinitel tepelné vodivosti jádra [W/(m·K)]

λ_{TB} se používá kvůli teplu vedeného obálkou (znám efekt jako tepelný most). Závisí na struktuře zapouzdřeného laminátu (metalizovaná folie nebo Al folie) a nemění se s časem (je konstantní). λ_{COP} se používá kvůli teplu přenášenému středem panelu (z horké strany na studenou). S časem se mění kvůli propustnosti atmosférických plynů. Rychlost změny závisí na vlastnostech fólií. [7]

Zvýšení λ_{COP} je závislé od specifických vlastností materiálu jádra a okolním tlaku vzduchu. Materiál pro jádra se používá organický i anorganický s porézní strukturou otevřených buněk. Zde se specifikuje tepelná vodivost jako funkce tlaku plynu.

V porézních materiálech se teplo šíří třemi způsoby, a to tepelnou vodivostí přes pevné jádro (λ_s), IR záření (λ_r) a tepelnou konvekci (λ_g) přes póry molekulami plynu dle rovnice:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_r + \lambda_g [mW/(m \cdot K)] \quad (19)$$

Kde λ_s a λ_r nezávisí na tlaku, a proto ho lze následovně popsat jako:

$$\lambda_{eff} = \lambda_0 + \lambda(p) [mW/(m \cdot K)] \quad (20)$$

Kde $\lambda_0 = \lambda_s + \lambda_r$ se rovná nule (bezprostředně po vakuování panelu).

Tlak uvnitř panelu se postupem času zvyšuje kvůli krátkodobému odplyňování a dlouhodobému pronikání plynu. Hustota molekul plynu určuje množství tepla přeneseného konvekcí, což pak dává četnost kolizí mezi jednotlivými částicemi a vnitřním tlakem. Vliv tlaku vzduchu na tepelnou vodivost porézních materiálů lze vyjádřit pomocí vzorce: [7]

$$\lambda(p) = \frac{\lambda_g}{1+2\beta Kn} \quad (21)$$

$$Kn = \frac{l_{mean}}{\delta} \text{ a } l_{mean} = \frac{k_B \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_g^2 \cdot P_g} \quad (22)$$

Kde: Kn – (číslo Knudsenova) je poměr mezi střední volnou cestou a znamená to průměrnou vzdálenost, kterou prochází molekula mezi dvěma srážkami s jinými molekulami vzduchu, δ – je charakteristická velikost pórů, d_g – je průměr molekul plynu, β – je konstanta mezi 1,5 až 2,0. Konstanta charakterizuje účinnost přenosu energie, když molekuly plynu narazí na pevnou strukturu porézního materiálu. A závisí na typu plynu, teplotě a pevném materiálu. [7]

Pro lepší zdůraznění hlavních tří parametrů pro vedení porézním materiálem, se vytvořila rovnice:

$$\lambda(p) = \frac{\lambda_g(T)}{1+C(T/\delta \cdot p_g)} = \frac{\lambda_g(T)}{1+C(p_{1/2,g} \cdot p_g)} \quad (23)$$

Kde: λ_g je tepelná vodivost plynu v otevřeném prostoru [W/(m·K)], $p_{1/2,g} = \frac{CT}{\delta}$ je tlak, při kterém tepelná vodivost plynu dosáhne hodnoty jedné poloviny λ_g .

Hodnota $p_{1/2,g}$ je závislá od průměru velikosti pórů jádrového materiálu. Čím menší je průměr póru, tím větší je $p_{1/2,g}$. Pro molekuly vzduchu je dán vztah mezi průměrnými póry průměru ϕ a $p_{1/2}$:

$$\phi = \frac{230}{p_{1/2}} \quad (24)$$

Byla vyvinuta metoda pro stanovení charakteristických hodnot λ_0 a $p_{1/2}$, která je založena na současném měření vnitřního tlaku a středu tepelné vodivosti panelu. Metoda spočívala v počátečním měření tepelné vodivosti poté, co proběhlo

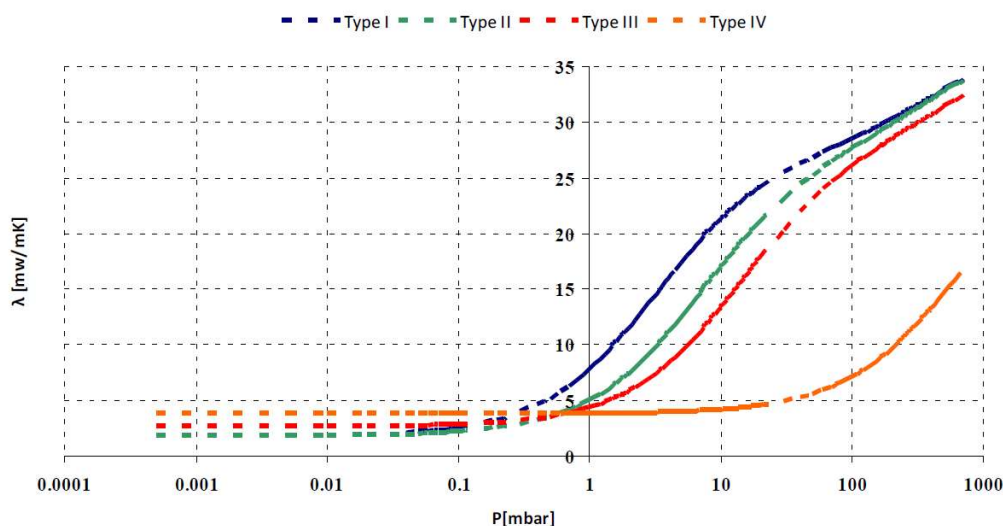
vakuování panelů, kde se později přes těsnící konektor stříkne řízené množství plynu a opět se začne měřit tepelná vodivost po každé injekci vzduchu s odpovídajícím tlakem. V tabulce číslo 1 lze vidět výsledky naměřených vzorků. [7]

Tabulka 1: Tabulka jednotlivých vzorků, pro porovnání vlastností [22]

Vzorek	Druh	λ_0 [mW/(m·K)]	$p_{1/2}$ [mbar]
I	Skleněná vlákna	1,75	3.2
II	Skleněná vlákna	1,8	7
III	Skleněná vlákna	2,65	14
IV	Pyrogenní oxid křemičitý	3,8	670

Graf číslo 1 ukazuje tepelnou vodivost jádrových materiálu jako funkce tlaku u tří typů skelných vláken a pyrogenního oxidu křemičitého:

Graf 1: Tepelná vodivost jádrových materiálů jako funkce tlaku [22]



3 VAKUOVÉ IZOLAČNÍ PANELY

Vakuové izolační panely (VIP) jsou tepelněizolační materiály, které se vyznačují extrémně nízkým součinitelem tepelné vodivosti. Jeho hodnota se pohybuje od 4 do 6 mW/(m·K). Tepelněizolační vlastnosti nezávisí na tloušťce panelu, ale na použitých materiálech v panelu. Vakuové izolační panely byly původně vyvinuty pro použití v chladničkách, mrazničkách nebo pro přepravní boxy. Výrobek byl představen v polovině 80. let, aby nahradil škodlivé materiály,

kteře ohrořovaly ozonovou vrstvou. Použití vakuovŕch izolačních panelŕ v oboru stavebnictvŕ je problematickŕ, protože pro použití v chladničkŕch se vyrábŕly panely, kde jejich ŕivotnost nepřesahovala 20 let, což u stavebnictvŕ nestačí, zde se ŕivotnost navrhuje ař na 100 let. Potenciál ve stavebnictvŕ je velkŕ, z architektonického hlediska, jsou pořad vŕtřŕ nŕroky na zmenření tlouřtky tepelnŕch izolací. U tradičních tepelnŕch izolantŕ (expandovanŕ, extrudovanŕ polystyrŕn, pŕnovŕ polyuretan, minerální vlna atd.) by tlouřtka musela bŕt 30 ař 50 cm, abychom dosáhli tepelnŕ izolačních vlastností jako u VIP. Porovnání zŕvisí na dodrření specifickŕch klimatickŕch podmŕnek. U vakuovŕch izolačních panelŕ je mořnost danŕ tlouřtky zmenřit. [8][9]



Obrázek 9: Vakuovŕ izolační panel [8]

3.1 VŕVOJ VAKUOVŕCH IZOLAČNŕCH PANELŕ

První patent popisujŕcí vakuovŕ izolační panely byl udŕlen v roce 1930 v Nŕmecku, patent popisuje pŕovitŕ jŕdro s gumovŕm obalem. Další patent byl udŕlen asi o 20 let pozdŕji v USA, kde vyrábŕnŕ VIP mŕly jŕdro ze skelnŕ vlny a kovovŕho obalu. První jŕdro s nanostrukturou materiálu bylo patentovŕno v roce 1963. Další pokračovŕnŕ ve vŕvoji vakuovŕch izolačních materiálŕ se vŕnovalo ŕkolu, najŕt a experimentálně vyzkouřet ideální materiály pro jŕdro a obal panelŕ. Vŕvoj posŕlily takŕ čím dŕl vŕc rostoucí pořadavky na potravinŕřskŕ, farmaceutickŕ a elektrickŕ průmyslu, kde byla potřeba vyvinout materiál s nízkou propustností.

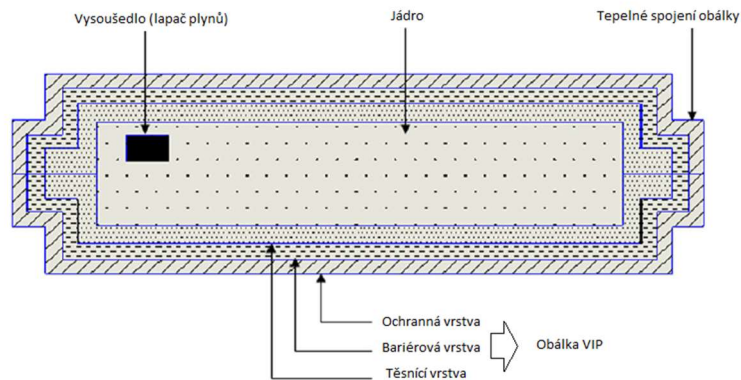
Další vývoj se věnoval použití aerogelů, bohužel se však v roce 1970 aerogely přestaly vyrábět, a proto byl výzkum pozastaven. [8]

V devadesátých letech se pro výrobu vakuových izolačních panelů začal používat oxid křemičitý, který byl utěsněn plastovou obálkou. Dále se do jader také používala vlákna, která byla uzavřena v tenkém svařeném plechu. Tento produkt byl určen hlavně pro chladírenský průmysl, kde se tepelná vodivost pohybuje v rozmezí 2 až 7 mW/(m·K). V dnešní době se 60 % vakuových izolačních panelů používá právě pro chladírenský průmysl, další uplatnění našly v přepravních boxech a minimální uplatnění je ve stavebnictví. Ovšem různé použití ve více odvětvích také znamená různé požadavky na životnost. U chladírenského průmyslu se jedná cca o 20 let tak u stavebnictví až o několik stovek let. Rozvoj vakuových izolačních panelů byl velmi rychlý a zabýval se i levnějšími materiály pro jádro, které snižují finální cenu vakuových panelů, a tak zvyšuje konkurenceschopnost na trhu. [8] [10]

3.2 SLOŽENÍ VAKUOVÝCH IZOLAČNÍCH PANELŮ

Vakuové izolační panely tvoří obalová fólie a výplňové jádro. V průběhu výroby je vzduch odsáván z vnitřního prostoru panelu. Vnitřní vakuovaný prostor panelů nemůže být prázdný, protože by se panel zdeformoval vlivem atmosférického tlaku v průběhu vakuování. Materiál pro jádro musí držet tvar panelu a zároveň nesmí vést teplo skrze vakuovou izolaci. Materiály pro jádra jsou vysoce porézní sypké materiály (pyrogenní oxid křemičitý, skleněná vlákna, polyuretanová pěna atd.). Jako materiál pro obalovou fólii se používají fólie na bázi polyuretanů, polyesterů i dalších plastů. Vrchní část vakuových panelů je opatřena hliníkovou fólií, která snižuje vedení tepla sáláním. [11]

Vakuové izolační panely se klasifikují na základě listu (vnější kovový obal) nebo filmu (vnější polymerní fólie). Takto vyrobené VIP se nazývají tzv. jako statické vakuové izolační panely. VIP se tak nazývají proto, že vakuum lze vytvořit jen při výrobě a znovu je vakuovat nejde. Vakuum vytvořené při výrobě musí vydržet po celou dobu životnosti panelů. [12]



Obrázek 10: Skladba vakuového izolačního panelu [12]

3.2.1 JÁDRO

Jádra jsou vyrobena z porézního materiálu s vhodnými velikostmi pórů. Jeho funkcí je fyzicky podporovat stabilitu obálky. Materiály pro jádro vakuových izolačních panelů bývají obvykle jemné prášky, pěny nebo vlákna, z kterých se pomocí atmosférického tlaku odstraní vzduch a vznikne vakuum. Nejvíce používaný materiál pro jádro je pyrogenní oxid křemičitý, skleněná vlákna a polyuretany. Dále materiály musí splnit různé požadavky jako je malý průměr pórů, velké množství otevřených buněk, odolnost proti stlačení atmosférickým tlakem a omezení propustnosti infračervenému záření. [8] [12]

Průměr otevřených pórů je důležitý pro vznik nízkého tlaku v jádru a kvůli snížení vodivosti plynu v izolačních materiálech. Proto se používá kombinace nanostrukturního jádrového materiálu. Pro vakuování je potřeba mít v materiálu otevřené buňky, aby bylo možné rychlé odstranění plynu ze struktury. Po vakuování se v jádru nachází velmi nízký tlak. Kvůli tomu je důležité, aby byl materiál stabilní a díky otevřeným buňkám vytvářejících póry ve struktuře

se vlivem vnějšího zatížení nedeformoval. V dnešní době už jsou k dispozici materiály jak organické, tak anorganické s otevřenou strukturou buněk, přímo pro výrobu vakuových izolačních panelů. [9]

Vlákna se připravují a suší při vhodné teplotě, aby se odstranila vlhkost. Vysušené jádro je pak lisováno do jádrových desek. Tlak pro různé výroby jádrové desky se liší v závislosti na zvoleném materiálu. Abe a kol. uvádějí použití tlaku v rozmezí 0,6 až 1,5 MPa, aby získal oxid křemičitý a vláknité kompozitní desky dostatečné manipulační pevnosti. Pro jádro na bázi oxidu křemičitého se používá krycí polymerní rouno, aby se zabránilo kontaminaci těsnící části obálky. [14]

Jedním ze způsobů výroby daného druhu jádra je použití stlačeného skleněného vláknitého materiálu nebo směsného prášku včetně křemíku. Jádro se tvaruje tak, že se do formovacího odlitku aplikuje práškový stlačený materiál. Následně se práškový stlačený materiál lisuje s tvářecím strojem, čímž se vytvoří jádro s určitou hustotou, velikostí a tloušťkou. [13]

Materiály na bázi pěny

Největšími zástupci jsou polyuretanová pěna (PUR) a pěnový polystyren (EPS). Oba materiály mají velikost pórů v rozmezí 30 až 250 x 10⁻⁶ m, a proto jsou vhodné k použití pro jádro do vakuových izolačních panelů. Vyznačují se svou nízkou tepelnou vodivostí při vakuu, díky nízké objemové hmotnosti (60-100 kg/m³) a malé velikosti pórů. U stanovení tepelné vodivosti u materiálů na bázi pěn je pro vakuum požadován nízký tlak pod 1 x 10⁻⁴ bar. Pan Kwon se svým kolektivem vypočítali hodnotu celkové tepelné vodivosti polyuretanové pěny z velikosti pórů 100 μm jako 7,8 mW/(m·K) při tlaku 1x10⁻⁴ bar. Tak nízký tlak nelze udržet po celou dobu životnosti panelů. Ve stavebnictví se předpokládá životnost až 100 let, a proto se tlak v panelech použitých v objektech postupně zvyšuje. [12]

Pěny o objemové hmotnosti 70 kg/m³ dosahovali tepelné vodivosti 2,7 mW/(m·K) a v kombinaci s pevnou látkou 5,7 – 9,7 mW/(m·K). Obě hodnoty jsou nepřijatelné pro vakuové izolační panely, jelikož se požaduje tepelná vodivost pod 4 mW/(m·K). Dosáhnout požadované tepelné vodivosti bude obtížné,

ale u komerčních materiálů tepelných izolací obdobné tloušťky je součinitel tepelné vodivosti vyšší než hodnoty uvedené výše. [12]

Materiály na bázi prášku

V současnosti se jako prášek nejčastěji používá pyrogenní oxid křemičitý a expandovaný perlit nebo jejich směsi. Pyrogenní oxid křemičitý se používá pro jeho nízkou hustotu, vysokou specifickou plochou, velmi nízkou tepelnou vodivost 3-6 mW/(m·K) a kvůli příznivé velikosti pórů o rozměrech 300×10^{-9} m. Objemová hmotnost se pohybuje okolo 150 až 200 kg/m³. První výroba pyrogenního oxidu křemičitému proběhla v Německu v roce 1942. [12]

Dalším práškovým materiálem jsou křemenné aerogely, ty byly vyvinuty v roce 1931 pomocí křemičitanu sodného. Jedná se tedy o materiál s velikostí pórů přibližně 20 nm a hustotou 3 až 350 kg/m³. Aerogely se mohou vyrábět ve dvou stupních, první je tvorba vlhkého gelu kyselou kondenzací nebo sol-gelovým procesem a druhý postup je sušením mokrého gelu za použití oxidu křemičitého. Tepelná vodivost aerogelu je přibližně 1 až 3 mW/(m·K) a při vakuování může dosáhnout až na 4 mW/(m·K) při tlaku 50 mbar nebo méně. Vzhledem k jeho vysoké ceně nebyl používán. [12]

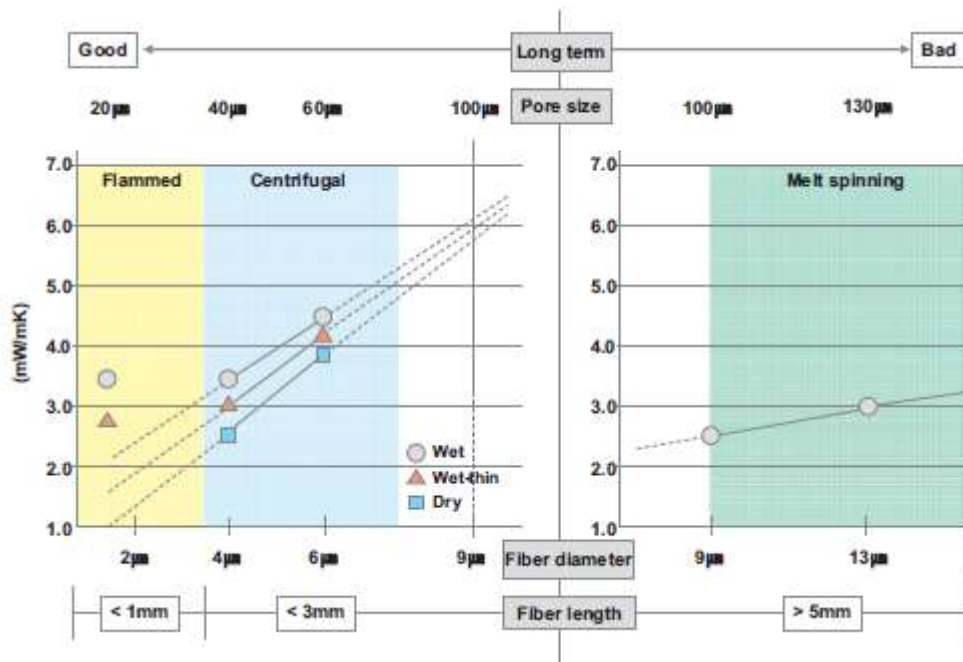
Expandovaný perlit má velmi porézní otevřenou strukturu. A díky tomu v kombinaci s oxidem křemičitým může způsobit velmi nízké tepelné vodivosti a při poměrně vysokém tlaku zaručuje poměrně dlouhou životnost vakuových izolačních panelů. [12]

Vláknité materiály

První návrh bylo použití skelných či minerálních vláken s pemzou a zeolitovým práškem jako jádro. Tepelná vodivost byla srovnatelná s pyrogenním oxidem křemičitým, ovšem tahle kombinace měla pomoci životnosti izolací, tak jak vyžadují. [12]

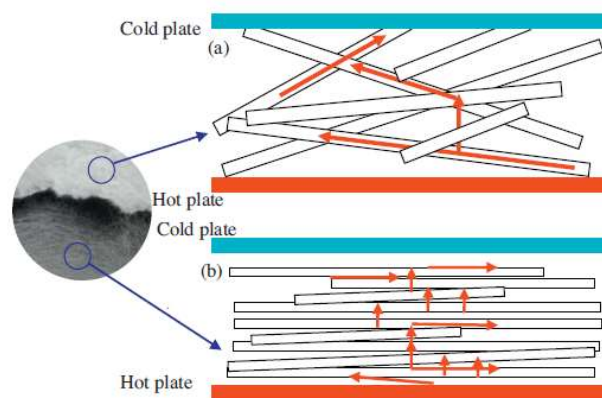
U vláken se začal řešit vliv průměru vláken, velikost pórů a způsob výroby. Výroba byla odstředováním taveniny a jen se měnili velikosti pórů. Kde na obrázku

č. 11 lze pozorovat, že pravá strana VIP je vyrobená s většími póry, kde se dosáhlo nižší tepelné vodivosti. Zjistilo se, že velikost pórů má vliv na zvyšování tepelné vodivosti se zvyšujícím se tlakem (při stárnutí VIP), což není vhodné pro dlouhodobou životnost. Na levé straně se jedná o menší póry, u kterých lze pozorovat, že je tu možnost dlouhodobé životnosti. [15]



Obrázek 11: Vliv tloušťky vláken a pórovitosti izolantu na tepelnou vodivost VIP na bázi skleněné vlny [15]

Důležité je i uspořádání a tloušťka vláken. Výzkumy ukázaly, že více vrstev tenčích vláken zarovnané směrem kolmo k tepelnému toku vede k nižší vodivosti než neuspořádaná tlustší vlákna. [15]



Obrázek 12: Přenos tepla skleněných vláken na dvou modelech a) neuspořádaná vlákna, b) uspořádaná vlákna [15]

Alternativní materiály pro jádro

Diatomit (DE) neboli kosterní zbytky, jednobuněčné řasy, co obývají slané i sladké vody. Složení DE je převážně amorfni křemík, ten má relativně nízkou tepelnou vodivost. Dále DE má vysoce porézní strukturu a obsahuje i nanopóry. Pórovitost a chemická inertnost činí DE vhodným materiálem pro vakuové izolační panely. Je to dostupný materiál, proto se jeví jako levná alternativa pro VIP. [16]

Sodnoborosilikátové sklo, které se zpracovává do dutých mikrosfér a vzniká tak materiál jménem skleněné bubliny. Materiál je vysoce porézní s nízkou hustotou částic a má velmi nízkou tepelnou vodivost. Proto se jeví jako ideální materiál pro jádro vakuových izolací. [16]

3.2.1.1 TECHNOLOGIE POJENÍ VLÁKEN JÁDRA

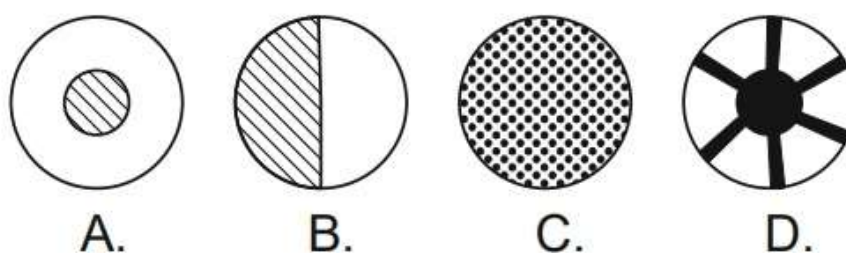
Je mnoho způsobů netkaného spojování vláken. Technologie pojení vláken jsou vhodné i pro výrobu izolačních materiálů. Mezi tři základní druhy pojení vláken patří:

- Mechanické
- Chemické
- Termické

Termické pojení se provádí jako teplovzdušné pojení a zpracovává se vlákenná vrstva základních a pojivých vláken. Principem teplovzdušného pojení je průchod promíchané a rovnoměrně rozvrstvené směsi vláken horkovzdušnou pojící komorou s horkým vzduchem. Ohřev vrstvy probíhá velmi rychle (10 sekund). Po ohřátí zpravidla dochází ke zpevnění pojiva ochlazením. [17]

Mezi nejčastější formy pojiva patří nízkotavitelná monokomponentní a bikomponentní vlákna. Kde se pro účely stavebnictví se nejčastěji používají bikomponentní vlákna, které se použili i u diplomové práce. [17]

Bikomponentní vlákna bývají také často označována jako vícekomponentní vlákna nebo zkráceně BiCo vlákna. Vyrábí se zvlákňováním nejčastěji dvou různých polymerů pomocí zvláštní zvlákňovací hubice. Nejčastěji se tvoří jádrem ze dvou polymerů, a to z výše tavitelného polymeru (např. polyester) a níže tavitelným pláštěm (např. kopolyester nebo polypropylen). [17]



Obrázek 13: Tvary příčných řezů bikomponentních vláken (A – jádro, plášť; B – bok po boku; C – vlákna typu ostrovy v moři; D – vlákna s průřezem několika jemných fibril) [17]

Bikomponentní vlákna se používají pro pojení, kde by vlákna měla mít vhodnou teplotu tavení. Vlákno se díky své tající složce nezbotí a výrobky mají vyšší objemnost. Adhezní spoje se vytvářejí v místech křížení vláken a jsou nazývány jako bodové. Množství přidávaných pojivých vláken závisí na požadavcích na mechanické vlastnosti, pro účely výroby stavebních izolačních hmot postačí přídavek do 15 %. [17]



Obrázek 14: Bikomponentní vlákna [18]

3.2.2 GETRY A VYSOUŠEDLA

Getry a vysoušedla se umísťují do vnitřku jádra, aby prodloužily životnost vakuových izolačních panelů. Děje se to za pomoci adsorpce vodní páry (v případě vysoušedel) a dalších plynů (v případě getrů). Ty se do vakuových izolačních panelů mohou dostat po celou dobu životnosti, a to buď proniknutím z vnějšího prostředí, uvolňováním plynů z jádrového materiálu nebo kombinací obou možností. [16]

3.2.3 OBÁLKA

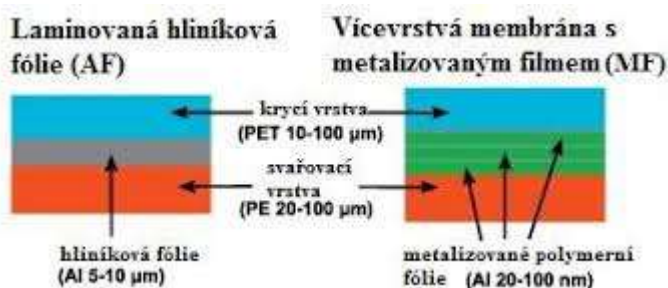
Funkce obálky je chránit jádro před vodní párou a vzduchem. Také celé izolaci dodává potřebnou mechanickou pevnost, která je potřeba během přepravy a instalace. Obálka musí odolávat také atmosférickému tlaku a její schopnosti musí být odolnost proti tepelnému přemostění přes okraj. U ideálního materiálu pro obálky s použitím ve stavebnictví se očekává, že rychlost přenosu vodní páry bude přibližně $0,0001 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ a rychlost přenosu kyslíku $0,001 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, tyto dvě vlastnosti by měly zaručit životnost na potřebnou délku pro stavebnictví asi 100 let.

Obálky pro VIP se dělí na dva druhy (laminátové a hliníkové). Laminátové obálky se používají pro výrobu VIP s budoucím použitím ve stavebnictví. Oproti tomu hliníkové obálky se používají u výrobků pro izolaci chladíren, ledniček a podobně. Jako materiál pro obálku se používají kombinace polymerů a tenkých metalizovaných filmů nebo kovových fólií. Obecně platí, že propustnost vícevrstvé obálky závisí na teplotě, relativní vlhkosti a velikosti panelu. Typickou obálkou pro panely je polymer se třemi vrstvami metalizovaných filmů a vykazuje vlastnosti rychlosti přenosu vodní páry přibližně $0,003$ až $0,005 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ a rychlost přenosu kyslíku $0,001$ až $0,002 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ při teplotě $23 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 50% . Výzkumy ukázaly, že hliníková fólie lépe udržuje nižší tepelné vodivosti než vícevrstvé metalizované polymerní obálky. Lineární tepelná propustnost pro metalizovanou obálku je $10 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ a pro hliníkovou fólii $70 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$. [12]

Klasickou obálkou se rozumí vícevrstvá fólie, u které má každá vrstva svou požadovanou funkci. Nejčastěji používané obálky se skládají ze tří vrstev:

- vnější ochranná vrstva,
- bariérová vrstva,
- vnitřní těsnící vrstva.

Vrstvy jsou mezi sebou slepeny lepidly, nejčastěji na bázi polyuretanu. Pan Kwon a kol. navrhl dvojitý obal s porézním jádrovým materiálem uvnitř pro nižší propustnost plynu skrz obálku (obrázek č. 15), ovšem to může znamenat zvětšení tloušťky a zvýšení nákladů na výrobu. [12]



Obrázek 15: Druhy obálek vakuových izolačních panelů [12]

Obálka je tvořena dvěma nebo třemi vrstvami metalizovaných polymerních fólií spojených s vhodným lepidlem ve formě laminátů. Dva lamináty jsou vzájemně tepelně utěsněny ze tří stran, abyste vytvořili obálku, která je otevřená z jedné strany.

Vnější ochranná vrstva

Její funkcí je chránit vakuovou izolaci před okolními vlivy, také před manipulačními tlaky. V současné době se používají materiály jako je polyethylentereftalát (PET), díky svým nízkým nákladům a dobrým vlastnostem. [12]

Bariérová vrstva

Jedná se o střední vrstvu, která plní funkci bariéry pro přenos vzduchu a vodní páry. Materiály bariérové vrstvy mohou být například hliníkové fólie, metalizované vrstvy polymerů v kombinaci s hliníkem. Provádí se buď jako

jednovrstvé, dvouvrstvé nebo třívrstvé v závislosti na požadované tloušťce a vlastnostech. Čím více vrstev, tím menší propustnost pro páru a vzduch. Jako substráty jsou využívány polypropylen (PP) a polyethyltereftalát (PET). Použití polyethyltereftalátu potaženého SiO_x a SiN_x v bariérových vrstvách má velký potenciál, ale jeho použití vyžaduje další výzkumy. Nanovlákná jsou také potenciální materiály pro bariérovou vrstvu, a to díky své vysoké tepelné stabilitě a dobré hydrofobicitě, ale také je potřeba dalších výzkumů. [12]

Těsnící vrstva

Jedná se o vrstvu v obálce nejbližší k jádru, její funkcí je utěšňovat materiál jádra. Je známo, že nedokonalost utěsnění materiálu jádra přispívá k permeaci plynu. Běžný proces pro utěšňování laminátu je tepelné zpracování, které se provádí mezi dvěma horkými tyčemi o dané teplotě pod určitým tlakem. Tím se vytváří vazba mezi dvěma vrstvami polymeru díky difúzi.

Dle výzkumů materiály pro těsnící vrstvu by měly být vybrány na základě jeho propustnosti pro vzduch a vodní páru. Polyethylen s nízkou hustotou a polyethylen s vysokou hustotou se také hodí pro těsnící vrstvu. Pro vysokoteplotní aplikaci vakuových izolačních panelů se pro těsnící vrstvu dá použít polybutylen (PBT) nebo vysokotlaký polypropylen (HR – CPP). [12]

3.2.4 VÝROBA VIP

U výroby vakuových panelů je nutná velmi přesná a řízená výroba, aby bylo dosaženo co nejlepších finálních vlastností panelů a jejich dobré trvanlivosti. První fází výroby je příprava jádrového materiálu a obálky. Důležité kritérium pro splnění požadovaných vlastností je minimální množství vlhkosti v materiálu jádra, což se provádí sušením v sušárně na požadovanou teplotu u každého materiálu. Před sušením se desky jádra naformátují na požadované rozměry. Po odstranění vlhkosti se jádro nechá vychladnout a následně je umístěno do obálky. Ihned po zabalení dochází k vakuování. Při pomalém postupu výroby

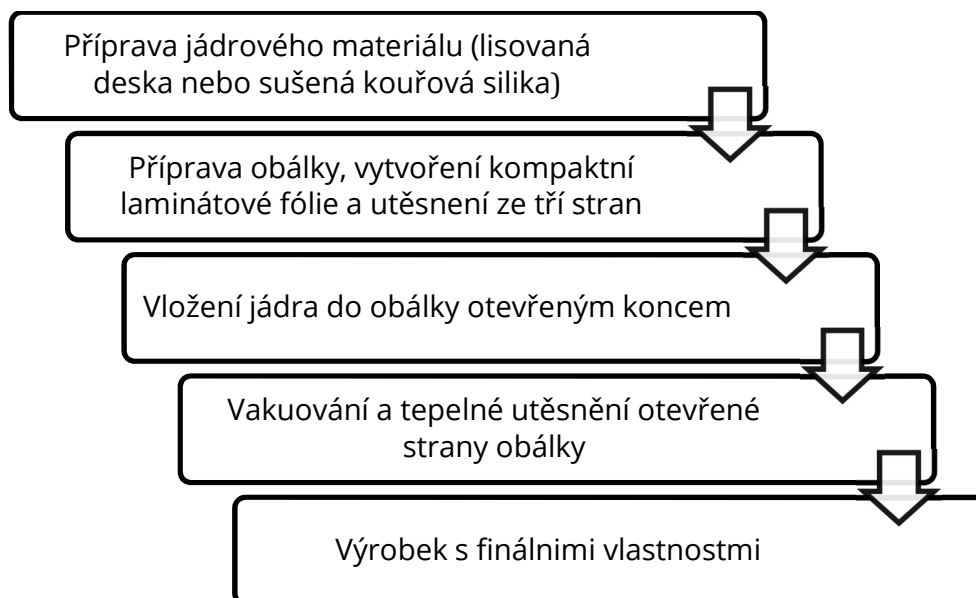
by vysušené jádro odebíralo vlhkost ze vzduchu a tím se výrazně zhoršily jeho vlastnosti. [14]

Po přípravě jádra se nachystá materiál pro vytvoření obálky. Pro vytvoření obálky se používají dva kusy speciálních fólií, mezi které se následně vloží jádro. Používaná technologie pro výrobu obálek funguje na principu utěsnění tří stran pomocí svářecího stroje. Teplota svaru pro spojení fólií je v rozmezí 160–170 °C.



Obrázek 16: Svářecí stroj

Následně se jádro vloží přes otevřený konec do obálky a poté se připravený polotovár vloží do vakuovacího zařízení. Po spuštění stroje dochází k extrémnímu snížení tlaku. Po dosažení cílového tlaku (většinou okolo 5 Pa) dojde k uzavření otevřené strany obálky pomocí svařovacího zařízení uvnitř stroje. Po ukončení procesu vakuování je výrobek odebrán ze zařízení a je připraven pro použití. [14]



Obrázek 17: Vakuovací stroj pro vakuové izolační panely [14]

4 ŽIVOTNOST VIP

Riziko spojené s použitím VIP je jejich trvanlivost a životnost po zabudování do stavební konstrukce. Problémem u VIP je skutečnost, že řada výrobků ztrácí své velmi dobré tepelně izolační vlastnosti v čase (v závislosti na parametrech VIP i prostředí, do něhož je VIP zabudován – viz. níže). Dále je nutné zabezpečit, že po dobu předpokládané životnosti VIP v konstrukci nedojde k jejich mechanickému poškození. Největší vliv na degradaci tepelně izolačních vlastností VIP má průnik plynů z atmosférického vzduchu obálkou k jádru (především vodní

páry a kyslíku). Při přepravě, skladování a manipulaci s VIP musí být zacházeno tak, aby nedocházelo k jejich poškození a tím ke ztrátě tížených vlastností. [19]

Výzkumy zabývající se vývojem a stárnutím VIP uvádí, že hlavními faktory pro životnost VIP a jejich degradaci je teplota a relativní vlhkost prostředí.

Efektivní tepelná vodivost vakuových izolačních panelů je ovlivněna nejen produktem samotným, ale také faktory tepelného mostu, který se tvoří sousedními prvky. Změny tepelné vodivosti závisí na vnitřním tlaku a vlhkosti v panelu. Čím vyšší je vnitřní tlak a vlhkost, tím vyšší je výsledná tepelná vodivost. Průzkumy ukázaly, že větší velikost panelů funguje lépe, protože tepelná vodivost je nižší a lépe odolává stárnutí. Tím lze říci, že tepelná vodivost na okraji panelu je nižší než tepelná vodivost uvnitř plochy panelu. [19][20]

Výzkumy se zabývaly hlavně zrychlenou metodou stárnutí, kdy se jedná o velmi rychlé testování v simulovaných podmínkách v laboratořích. U této metody je důležité vybrat vhodné zatížení a dodržet degradaci v různých časových obdobích. Nejdůležitější zatížení ohledně vakuových izolačních panelů je zvýšená teplota a vlhkost. Samostatně nebo společně vedou ke zvýšení průchodu plynů a vlhkosti, a to výrazně zvyšuje tepelnou vodivost. [19] [20]

Při vyhodnocení výzkumu bylo zjištěno, že během životnosti se v průběhu let plyny a vlhkost pomalu dostávají do panelů, a to pomocí těsnících vícevrstevných folií. Kvůli tomu se zvyšuje tlak par v panelu, a to vede k nárůstu tepelné vodivosti. Pro eliminaci degradace VIP vlhkostí se při výrobě do jádra přidávají getry a vysoušedla (viz výše). [19]

Výsledky výzkumu byly založeny na měření tlaku uvnitř panelu. Pro stanovení tohoto tlaku se nejčastěji používá nepřímá metoda (LIFT-OF metoda), která měří klíčové parametry panelu závislé na podtlaku v panelu vůči prostředí. Princip metody je, že se VIP uloží do komory s kontrolovatelným tlakem a sleduje se změna tloušťky. V komoře se postupně snižuje tlak, až do té doby, než se tlaky v komoře a v panelu vyrovnají a tím dojde k expanzi (změně tloušťky).

Vakuové izolační panely nespádají pod harmonizovanou normu, ale Evropská unie vydala evropský dokument pro hodnocení – EAD. Metody hodnocení v dokumentu vycházejí z předpokladu, že vakuové izolační panely nebyly poškozeny a byly chráněny před vlhkostí, povětrnostními vlivy a slunečním světlem. EAD uvažuje trvanlivost vakuových izolačních panelů na základě výrobců 25 let. Vakuové izolační panely se tedy zkouší i hodnotí aktuálně dle EAD 040011-00-1201 (evropská norma byla v době vypracování této práce v přípravě). Dle evropského dokumentu pro hodnocení (EAD) se u VIP zkouší: [21]

- **Tepelná vodivost** při střední teplotě 10 °C se stanovuje dle zásad popsaných v EN 12667. Stárnutí se hodnotí na dobu 25 let. Zkouška se provádí nejméně na třech vzorcích, kde se provádí zkoušky za podmínek stárnutí buď na vnějším nebo vnitřním použití nebo jen vnitřní aplikace tepelně izolačních desek. [21]

Vnější a vnitřní použití tepelných izolačních desek je myšleno jako použití pro izolaci budov a musí být splněny podmínky:

- Výdrž nejméně 72 hodin při (23±2) °C a (50±5) % relativní vlhkosti
- Stanovení počáteční tepelné vodivosti
- Cyklování při změně klimatu (+70±3) °C / (-15±3) °C–8 cyklů, každý cyklus 24 hodin)
- Výdrž na 90 dnů při (70±3) °C, bez relativní vlhkosti (v suchu)
- Stanovení střední tepelné vodivosti
- Výdrž dalších 90 dní při (50±3) °C a (80±5) % relativní vlhkosti
- Výdrž nejméně 72 hodin při (23±2) °C a (50±5) % relativní vlhkost
- Stanovení tepelné vodivosti po stárnutí

Vnitřní aplikací tepelně izolačních desek je myšleno pouze vnitřní použití pro izolaci budov a podmínky stárnutí jsou:

- Výdrž nejméně 72 hodin při (23±2) °C a (50±5) % relativní vlhkosti
- Stanovení počáteční tepelné vodivosti
- Výdrž na 90 dnů při (70±3) °C, bez relativní vlhkosti (v suchu)
- Stanovení střední tepelné vodivosti

- Výdrž dalších 90 dní při (50±3) °C a (80±5) % relativní vlhkosti
- Výdrž nejméně 72 hodin při (23±2) °C a (50±5) % relativní vlhkosti
- Stanovení tepelné vodivosti po stárnutí

Tepelná vodivost λ_D VIP se stanovuje s ohledem na vliv stárnutí $\Delta\lambda_a$, a účinek tepelných mostů F_{tb} . Tepelná vodivost λ_D se zaokrouhlí směrem nahoru s přesností na 0,0001 W / (m·K). Tepelná vodivost λ_D se určí takto:

$$\lambda_D = (\lambda_{90/90} + \Delta\lambda_a) \cdot F_{tb} \quad (25)$$

Kde: λ_D je tepelná vodivost, $\lambda_{90/90}$ je tepelná vodivost před stárnutím a bez lineární propustnosti hran [21]

- **Propustnost kyslíku vícevrstvé fólie s vysokou bariérou** se stanovuje v souladu se zásadami v normě DIN 53380-3: 1998 s mezními podmínkami 23 °C a 50 % relativní vlhkosti nebo 23 °C a 0 % relativní vlhkosti. [21]
- **Vnitřní tlak** se stanovuje po 24 hodinách, od okamžiku vyrobení VIP za použití tzv. Lift-off metody. Vzdálenost mezi jádrem a fólií lze měřit pomocí laserového zařízení pro měření vzdálenosti a slouží k určení vnitřního tlaku vakuových izolačních panelů. [21]

5 POUŽITÍ VAKUOVÝCH IZOLAČNÍCH PANELŮ

V současnosti vakuové izolační panely mají mnohem větší využití než kdy dříve a jejich roční spotřeba neustále roste. Vakuové izolační panely se jeví jako velká konkurence dnes už tradičním tepelným izolacím, jako jsou anorganické nebo organické materiály. Mezi anorganické izolační materiály se řadí skelná vlna, minerální vlna nebo pěnobeton, mezi organické pak pěnový polystyrén, polyuretanové pěny. A v porovnání s VIP mají vyšší tepelné vodivosti a horší fyzikálně mechanické vlastnosti. Velmi podstatná vlastnost VIP je jejich tloušťka, kdy oproti tradičním izolantům je 5 až 10krát menší. Při využití VIP ve stavební praxi (i v jiných odvětvích) se musí klást důraz na správné dodržení pracovních postupů, jelikož práce s těmito výrobky není snadná. Při nedodržení správných

postupů se mohou přednosti těchto izolací otočit v negativa. Výhody a nevýhody těchto VIP jsou přehledně znázorněny v tabulce číslo 2. [22] [8]

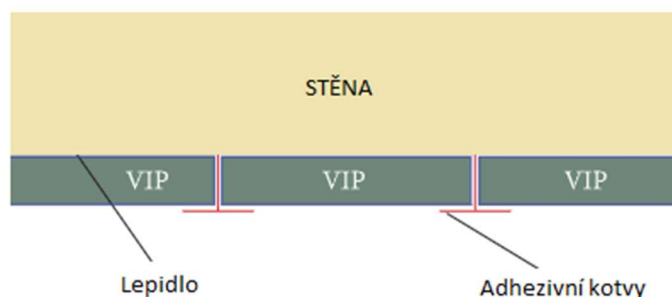
Tabulka 2: Přehled výhod a nevýhod VIP pro stavební účely [22]

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> - Vysoce výkonná tepelná izolace. - Zvýšená podlahová plocha při vnitřním zateplování - Vhodné renovace stávajících budov s vysokými omezeními. - Může být použita jako tepelná izolace na místech, kde není k dispozici dostatek místa. - Dosud jediný materiál, pro který je 4 cm dost, splňuje (většinu) vnitrostátních stavebních předpisů. - Nižší provozní teplota zvyšuje tepelné výkony, což je výhodné v severských zemích. 	<ul style="list-style-type: none"> - Velmi křehká a ochrana proti propíchnutí fólie je nutná. - Snížení tepelných výkonů v čase. - Omezená životnost může vyžadovat výměnu. - Účinný tepelný výkon bude snížen tepelným přemostěním VIP obálky. - Zvýšené strukturální tepelné přemostění díky obálce. - Méně vhodné pro tradiční dřevěné konstrukce. - Neflexibilní: Úpravy na místě (řezání panelů) nejsou možné. - Produkční nepřesnost velikostí panelů

V budovách se dají použít v podlahách, ve dveřích, u okenních rámu, ve vnějších stěnách, v rámových dřevěných stěnách nebo i dokonce v betonu, kde je možnost sendvičového panelu a v prefabrikátech, v podkroví nebo schodištích. Další použití lze nalézt v plochých střeších, lodžiích, terasách, kde malá tloušťka izolační vrstvy umožňuje jednoduchou konstrukci, nebo také je lze použít pro izolace potrubí, teplovodních nádrží nebo izolace pro podlahové topení. Nejčastější použití však nejspíše bude jako hlavní izolace obvodového pláště budov. [22] [8]

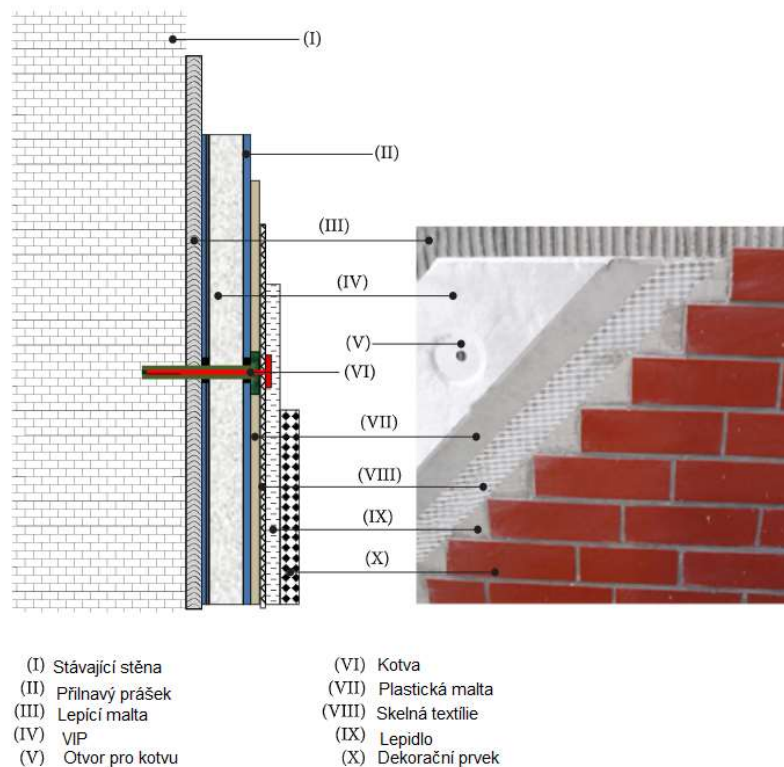
Zabudování vakuových izolačních panelů do budov má své obtíže. Jeden z problémů při použití je ten, že vyrobené vakuové panely již po výrobě nejdou řezat. Proto při procesu aplikace na stěny je obtížná výroba panelů pro zvláštní pozice (například rohy, okolí oken). Proto před výrobou samotných panelů, je potřeba udělat důkladný návrh velikostí panelů. Což je pro aplikace VIP jedna

z velkých nevýhod. Další z nevýhod je vůbec při dopravě a skladování VIP na stavbách, kde lze snadno panely propíchnout a ztrácí pak vakuum, což má za následek zvýšení tepelné vodivosti. Kotvení a zabudování je také komplikované, proto se v současnosti provádí zabudování pomocí lepení nebo v kombinaci lepení a ukotvení. [23]



Obrázek 18: Aplikace vakuových izolačních panelů pomocí lepení a kotvení na budovách [23]

Vzhledem k tomu, že VIP nelze perforovat (s výjimkou míst k tomu určeným), nelze mít kotvicí polohu pružnou jako u běžných materiálů. Proto je kotvení realizováno na hranicích a vznikají tak větší mezery mezi VIP, a to má za následek zhoršení tepelně izolačních vlastností. V praxi se proto používá někdy i kombinace s jinými tepelnými izolanty. Při použití v interiérech je velká nevýhoda, že po zabudování VIP do konstrukce nelze kotvit do stěny žádné předměty jako pomůcky pro domácí spotřebiče, závěsné skříně či dekorace. Při porušení VIP kotvicími prvky by docházelo k jejich degradaci a vzniku tepelných ztrát v místech kotvení. Boafu a kol. navrhly vylepšené řešení, které by dané problémy v domácnosti mohlo řešit, návrh lze vidět na obrázku č. 19. [23]



Obrázek 19: Montáž vakuového izolačního systému v interiéru [23]

Použití VIP ve stavebnictví

Využívání VIP ve stavebnictví je teprve v zárodku. Je snaha o zabudování těchto druhů izolantů do stávajících i nových objektů a stále se hledají další způsoby využití VIP.

Izolace podlah

Vakuové izolační panely se do podlah používají například tam, kde jsou vysoké nároky na maximální tloušťku podlahy a zároveň na vysoký tepelný odpor podlah. Často se jedná o rekonstrukce, kde není možné navyšovat výrazně tloušťku podlahy, a pokud je snahou při stávajících tloušťkách vrstev výrazně zlepšit tepelně izolační vlastnosti konstrukce, jsou VIP ideálním řešením. VIP se dají využít i pro zvýšení účinnosti podlahového vytápění. V případě podlah se VIP často kladou ve dvou vrstvách a kombinují s klasickým izolantem (např. XPS nebo PUR), přičemž kladení izolantu začne v jednom rohu místnosti a pokračuje napříč a konce se doloží klasickou izolací. Druhá vrstva se začne pokládat naopak z opačného

konce místnosti a doloží se znovu na konci klasickým izolantem. Tímto způsobem lze řešit pokládku VIP ze standardních formátů a minimalizovat tak i vznik tepelných mostů.



Obrázek 20: Použití vakuových izolačních panelů na podlahy [24]

Využívají se v podlahách v místnostech s extrémními teplotními nároky, jako jsou chladírenské nebo mrazící prostory. [8]

Izolace dveří

Dveře patří do konstrukcí s omezeným prostorem pro izolaci, proto se vakuové izolační panely skvěle hodí, protože jsou schopny zlepšit tepelný odpor. Dle výzkumů se ukázalo, že integrované vakuové izolační panely ve dveřích zlepšily úsporu energie v oblasti dveří včetně rámu o 25 %. [8]

Střešní okna

Vikýře a arkýře jsou další prostory, které jsou omezené svou tloušťkou pro použití tepelných izolací. Ve Švýcarsku bylo u dvou budov dodatečně přiděleno do prefabrikované konstrukce vikýřů 30 mm vakuových izolačních panelů, které byly chráněny jen dřevěnými deskami. Po aplikaci byla naměřena hodnota součinitele prostupu tepla $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. [8]

Zateplení obvodového pláště budov

Požadavky na obvodové konstrukce u nových budov jsou vysoké, a to hlavně díky energetickým požadavkům dle ČSN 730540.[30] Budovy vyžadují stěny s vysokým tepelným odporem, to snižuje náročnost na vytápění budov po celou dobu jejich životnosti. V současnosti se izoluje nejčastěji buď minerální vlnou, nebo pěnovým polystyrenem. Vakuové izolační panely mohou nahradit některé z tradičních materiálů pro snížení požadovaných tloušťek stěn. Panely se mohou umístit do rámu nosných dřevěných latí ve stěnách nebo jako přídatná vrstva na vnější stranu nosné konstrukce. Výhoda jsou tloušťky konstrukcí, kde stěna s vakuovou izolací může dosahovat tloušťky cca 14 cm, což je asi polovina tloušťky stěny s klasickou izolací. Jednou z nevýhod je kotvení panelů tak aby nevznikaly tepelné mosty.

V Německu byly zkoumány různé technologie kotvení VIP do obvodových konstrukcí pro použití na zateplení obvodového pláště. Jednou z možností je vakuová izolace zapouzdřená v polystyrenu a vznikne tak sendvič o tloušťce 20 mm, nebo také kombinace PUR s vakuovými izolačními panely, kde panely byly umístěny na stěnu a následně byly potažené PUR. [8]



Obrázek 21: Sendvičový panel (polystyrén + VIP) [8]

Vnitřní zateplení interiéru je náročnější než zateplení exteriéru. Výhodou je, že to lze dodatečně, bez zásahu do exteriéru a porušení již stávající fasády. Jsou případy, kdy se musí exteriér zachovat např. kvůli historické funkci. U vnitřního

zateplení je potřeba si dávat pozor na možné tepelné mosty a šíření vlhkosti, aby se nevytvořilo prostředí vhodné pro růst plísní. [8]

Izolace střeš a teras

Při navrhování teras na střeše budovy je obtížné dosáhnout rovnoměrného přechodu mezi venkovní a vnitřní úrovní podlahy. Podlahu na terase je potřeba izolovat pro snížení přenosu tepla střechou. Pro aplikaci vakuových izolačních panelů je potřeba využít i ochranné vrstvy nad i pod panely. [8]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo studium chování vláknitých organických izolantů za vysoce sníženého tlaku (po vakuu). Cílem bylo popsat princip přenosu tepla a navrhnout (i ověřit) vláknité izolanty z možnosti využití pro výrobu vakuových izolačních panelů /VIP. Cílem bylo především navrhnout využití odpadních textilních vláken (jako jsou například odprachy z recyklace bavlněného textilu apod.), případně využití vláken pocházejících ze zemědělství, pro výrobu vakuových izolací. Cílem bylo především provedení teoretického návrhu těchto izolantů, provedení laboratorní výroby zkušebních vzorků a ověření chování experimentálně vyrobených izolantů za normálního i sníženého tlaku (po vakuu).

7 METODIKA PRÁCE

V praktické části diplomové práce byly navrženy čtyři druhy materiálů pro výrobu jádrových izolantů. Snaha byla o využití alternativních způsobů výroby jádrových izolantů za použití odpadních vláken. Na vyrobených zkušebních vzorcích byly ověřeny tepelně izolační vlastnosti za normálního i sníženého tlaku. Praktická část byla rozdělena do několika částí:

- výběr vhodných surovin pro výrobu jádrových izolantů,
- návrh výroby a výroba jádrových izolantů,
- stanovení vlastností vyrobených jádrových izolantů,
- vyhodnocení měření.

Při výběru surovin pro výrobu jádrového izolantu byla snaha o využití alternativních/odpadních vláken s vysokým potenciálem pro použití. Jako materiály pro jádrové izolanty byla použita vlákna z recyklovaného textilu a vlákna pocházející ze zemědělství. Konkrétně se jednalo o odprašky z bavlny, lnu a recyklované textilie. Pro pojení vláken byla použita bikomponentní vlákna, která se používají pro termické pojení (viz výše).

Pro výrobu všech vzorků byl zvolen stejný poměr (90 % vláken a 10 % přidaných bikomponentních vláken). Cílem bylo vyrobít vzorky o rozměrech 200x200x10 mm. Navrženy byly čtyři postupy, pomocí nichž se vyrobily zkušební vzorky. Jako nejefektivnější způsob výroby byl zvolen čtvrtý postup (viz níže). U navrhovaných postupů se při výrobě ukázalo, že navrhovaná tloušťka těsně po vyrobení odpovídala 10 mm, ale po chvilkové zpětné relaxaci vzorku, došlo k expanzi, proto se tloušťky u jednotlivých postupů a vzorků liší.

Před vyrobením zkušebních vzorků se stanovovaly vlastnosti jako tloušťka a délka použitých vláken. Po vyrobení vzorků jádrových izolantů pak objemová hmotnost, plošná hmotnost a součinitel tepelné vodivosti za normálního i sníženého tlaku.

7.1 POUŽITÉ SUROVINY A MATERIÁLY

Pro výrobu zkušebních vzorků byl použitý odpad vzniklý při zpracování z vláken lnu a bavlny od spolku SK TEX Senice. Dalším materiálem byly zpracované desky z textilního odpadu od firmy RETEX. A pro termické pojení vláken byly zvoleny bikomponentní vlákna.

Len – pro tvorbu zkušebních vzorku byl použitý odpad vzniklý při zpracování vláken lnu od SKTEX Senice. Jedná se o rostlinu pěstovanou pro lněné vlákno a olejnaté semeno. Pěstování nejen v České republice má dlouholetou tradici, ale i ve světě. Len se pěstuje jako len přadný a olejný. Pro stavebnictví se používá ten přadný, z kterého vyrobeno textilní vlákno. Složení lnu je ze 75 % celulóza 20 % je tvořeno hemicelulózou a zbytek tvoří pektiny a ostatní složky. Len se používá hlavně jako izolační vláknitý materiál. Z environmentálního hlediska není škodlivý pro životní prostředí. Při zpracování vláken z lnu, vzniká odpad nazýván jako pazdeří. To se využívá pro výrobu deskových stavebních materiálů. [25]



Obrázek 22: Lněná vlákna [25]

Bavlna – pro tvorbu zkušebních vzorku byl zvolen odpad ze zpracování vláken bavlny od SKTEX Senice. Jedná se o jemné odprachy z filtrů, které vznikají při trhání a rozvlákňování textilu s vysokým obsahem bavlny. Při tomto mechanickém rozvlákňování dochází i druhotně ke štěpení bavlněných vláken, proto tento odprach vykazuje vysokou jemnost (viz. níže) a jevil se proto jako potenciálně zajímavá vstupní surovina pro výrobu jádrových izolantů pro VIP.

V případě bavlny se jedná o světovou zemědělskou plodinu, která je ve světě zastoupena velkým množstvím, a proto výrobky z ní jsou poměrně levné. Bavlněné vlákno je tvořeno z 96 % celulózu a díky tomu je to nejčistší přírodní zdroj celulózy. Ovšem bavlna a její pěstování, má dopad i na životní prostředí, protože pro její pěstování se používá mnoho chemických pesticidů, herbicidů a defoliantů. Pro stavební účely má velmi dobré vlastnosti. Má dobré tepelně a akusticky izolační vlastnosti, poté taky dokáže regulovat vlhkost ve vnitřním prostředí. Ve stavebnictví se využívá spíše v zahraničí pro zateplování budov. Z bavlny se vyrábějí například pletence, rohože, těsnící vaty. Využívá se také jako tepelná izolace šikmých střech a stěn v tloušťce 50 až 120 mm nebo do příček jako akustické izolace. [26]



Obrázek 23: Čistá bavlněná vlákna [10]

Polyesterová vlákna a izolanty z nich vyrobeny – dále byly použity dva typy vláknitých izolantů od firmy RETEX a.s. vyrobené z odpadních PES vláken vysoké jemnosti metodou termického pojení přídatkem 15 % bikomponentních vláken. Vzorek PES 2 byl tvořen klasickými recyklovanými polyesterovými vlákny a druhý vzorek PES 1 byl tvořen vlákny s vyšší jemností. V obou případech byla použita velmi jemná PES vlákna, proto byly tyto vzorky zvoleny pro výrobu jádrových izolantů.

7.2 VÝROBA JÁDROVÝCH IZOLANTŮ

Výroba jádrových izolantů byla provedena metodou termického pojení pomocí bikomponentních polyesterových vláken. Ve všech případech byla použita bikomponentní PES vlákna s jemností 2,1 dTex v množství 15 %. Výroba vzorků PES 1 a PES 2 byla provedena na výrobní lince firmy Retex a vzorky ze lnu a bavlny byly vyrobeny v laboratoři.

Pro výrobu jádrových izolantů z bavlny a lnu byly použity mírně odlišné postupy, protože se jednalo o krátká vlákna a samotná optimální technologie výroby těchto izolantů byla předmětem praktické části této práce – viz níže. U všech materiálů jsme vyráběli vzorky o rozměrech 200x200x10 mm.

7.2.1 VÝROBA VZORKŮ Z ODPRACHŮ BAVLNY A LNU

Prvním bodem praktické části bylo řádné rozvláknění jednotlivých vláken. (bavlny, lnu a bikomponentního vlákna) Rozvláknění se provádělo ručně v nádobách. Následně byla bavlna a bikomponentní vlákna smíchána dohromady a byla snaha je co nejvíce zhomogenizovat. To samé bylo provedeno i s lněnými vlákny. Po promíchání byla připravena směs pro výrobu vzorku.



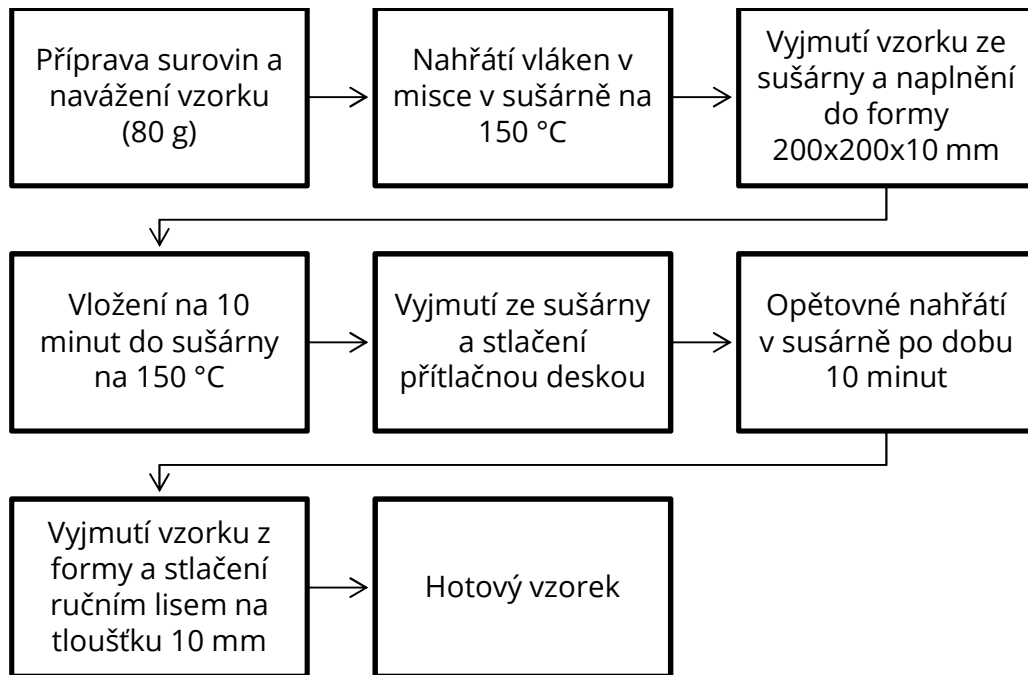
Obrázek 24: Směsi z odpadu ze zpracování bavlny a lnu pojené bikomponentním vláknem

Pro výrobu vzorku z bavlny a lnu byly použity 4 postupy, pro zvolení vhodného postupu výroby i pro výrobu vzorku z lnu. Postupy byly následující:

Postup číslo 1:

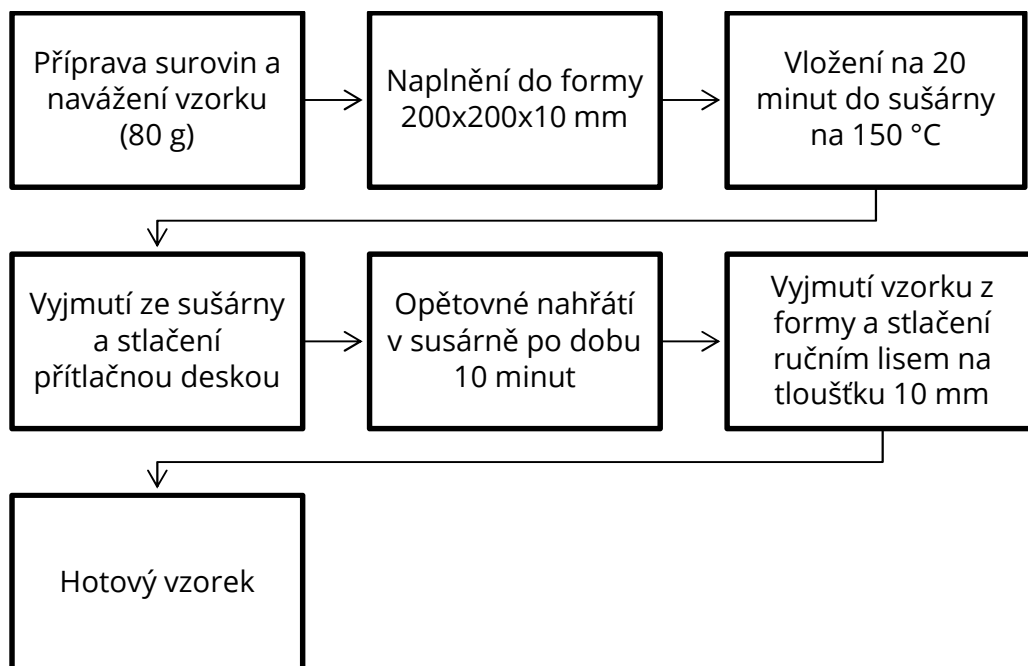
První postup pro vyrobení zkušebních vzorků byl proveden po přichystání směsi z bavlny a bikomponentních vláken. Odvážilo se 80 g směsi pro jednu formu 200 x 200 x 10 mm. Následně se navážená směs vložila i s miskou do sušárny na 150 °C po dobu 10 minut. Po vyndání směsi se naplnila forma a opět, ale teď už i s formou byla vložena do sušárny na 10 minut. Po vyndání se sušárny se za pomoci přítlačné desky směs stlačila více do formy a opět byla vrácena do sušárny na 10 minut. Po vyjmutí ze sušárny byl vzorek odebrán z formy a byl vložen ještě teplý pod ruční lis, pomocí kterého byl stlačen na 10 mm,

po odebrání z lisu byl zkušební vzorek vyhotoven. Nakonec byl vzorek zvážen a změřen pro stanovení objemové a plošné hmotnosti.



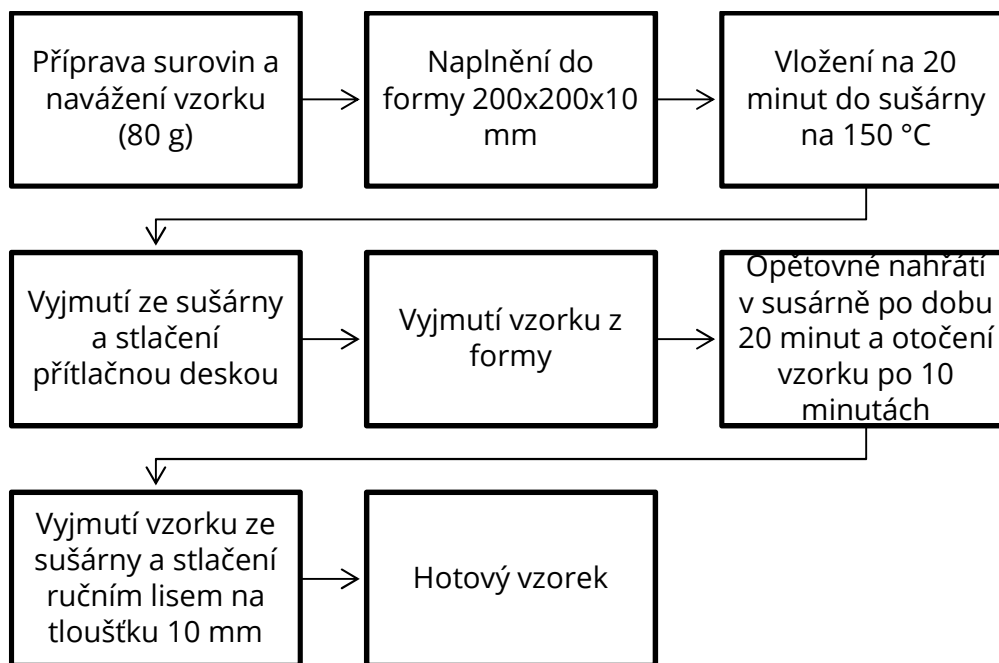
Postup číslo 2:

Druhý postup pro vyrobení zkušebních vzorků byl proveden po přichystání směsi z bavlny a bikomponentních vláken. Odváženo bylo 80 g směsi pro jednu formu 200 x 200 x 10 mm. Po odvážení směsi byla forma naplněna a vložena do sušárny na 150 °C na 20 minut. Po vyjmutí ze sušárny se za pomoci přítlačné desky směs stlačila více do formy a opět byla vrácena do sušárny na 10 minut. Po odebrání ze sušárny byl vzorek vyjmutý z formy a byl vložen ještě teplý pod ruční lis a kde byl stlačen na 10 mm, po vyjmutí byl zkušební vzorek vyhotoven a byl zvážen a změřen.



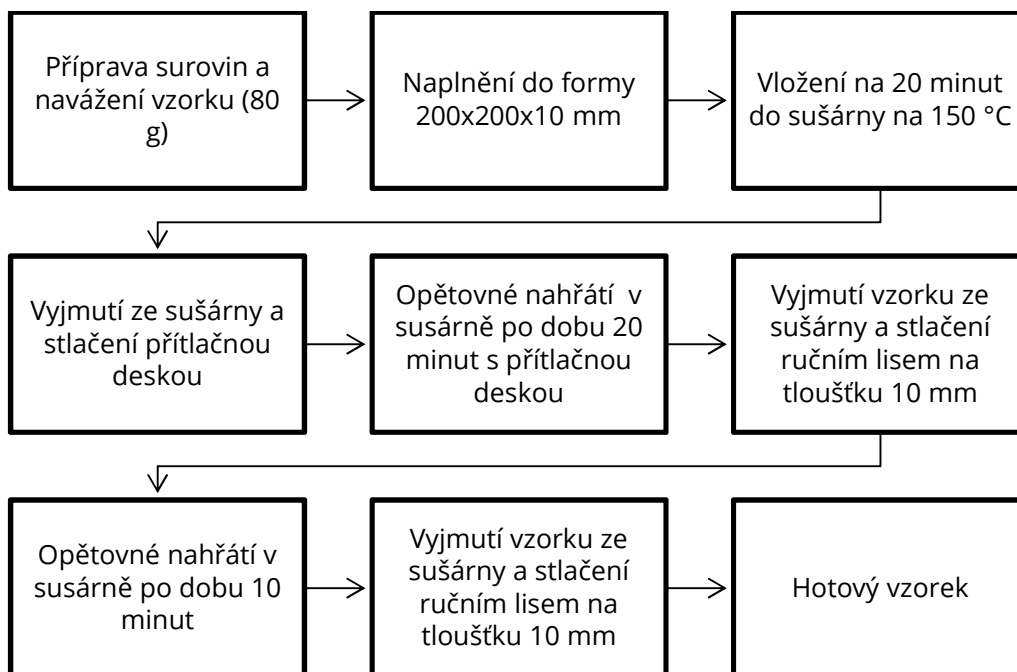
Postup číslo 3:

Třetí postup pro vyrobení zkušebních vzorků byl proveden po přichystání směsi z bavlny a bikomponentních vláken. Bylo odváženo 80 g směsi pro jednu formu 200 x 200 x 10 mm. Po odvážení směsi byla forma naplněna a vložena do sušárny na 150 °C na 20 minut. Po vyjmutí se sušárny byla za pomoci přítlačné desky směs stlačena více do formy. Následně byl vzorek odebrán z formy a opět vrácen do sušárny na 20 minut, ale po 10 minutách byl vzorek otočen. Po vyjmutí ze sušárny byl vzorek vložen ještě teplý pod ruční lis a stlačen na 10 mm. Po vyjmutí byl zkušební vzorek vyhotoven a byl zvážen a změřen.



Postup číslo 4:

Čtvrtý postup pro vyrobení zkušebních vzorků byl proveden po přichystání směsi z bavlny a bikomponentních vláken. Bylo odváženo 80 g směsi pro jednu formu 200 x 200 x 10 mm. Po odvážení směsi byla naplněna forma a vložena do sušárny na 150 °C na 20 minut. Po vyjmutí se sušárny byla za pomoci přítlačné desky směs stlačena více do formy. Po stlačení přítlačnou deskou, byl vzorek i s formou i přítlačnou deskou vložen do sušárny na 20 minut. Po vyjmutí ze sušárny byl vzorek vložen ještě teplý pod ruční lis a stlačen na 10 mm. Poté byl vzorek odebrán z formy a vložen znovu do sušárny na 10 minut. Po vyjmutí byl vzorek opět stlačen na ručním lise na 10 mm a po vyjmutí byl zkušební vzorek vyhotoven a byl zvážen a změřen.



Výběr vhodného postupu

Postup číslo 1 se ukázal jako nevhodný, kvůli špatnému spojení bavlny a bikomponentního vlákna, kde se pak velmi rychle zvyšovala tloušťka vzorku (díky relaxaci materiálu). Druhý postup se jevil stejně, třetí postup se ukázal jako vhodná varianta, kde k expanzi tloušťky již moc nedocházelo, ale homogenita mezi bikomponentními vlákny a bavlnou nebyla moc znát viz obrázek 25.



Obrázek 25: Zkušební vzorky vyrobené prvním postupem

Po zkušenostech z předchozích třech postupů bylo zjištěno, že za nehomogenitu vzorku může příliš velká délka bikomponentních vláken, proto bylo rozhodnuto o jejím zkrácení, a to na cca 5 mm, vlákna byla zkracována ručně za pomoci nůžek.



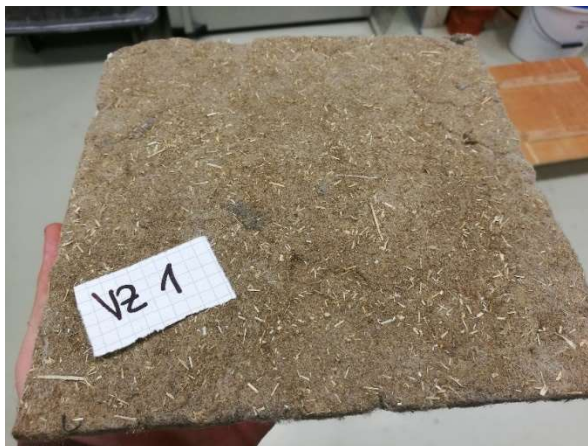
Obrázek 26: Směs odpadu ze zpracování bavlny pojené zkrácenými bikomponentními vlákny

Po zkrácení pojících bikomponentních vláken byly vyrobeny nové desky postupem číslo 4, ten se ukázal jako velmi vhodný, jelikož se bavlna a bikomponentní vlákna krásně spojili viz obr. 27. Na vyrobených vzorcích se dále testovaly jejich vlastnosti.



Obrázek 27: Vyrobený zkušební vzorek z bavlny čtvrtým postupem

Pro výrobu vzorku z lnu byl zvolen postup 3 a 4. Výroba nebyla tak komplikovaná jak u bavlny, jelikož u lněných a bikomponentních vláken došlo k efektivnímu zhomogenizování a u vzorků pak nebyla tendence expandovat a zvětšit tak svoji tloušťku.



Obrázek 28: Vyrobenný zkušební vzorek z lnu

7.2.2 VÝROBA VZORKŮ Z RECYKLOVANÉ TEXTILIE

Vzorky pro výrobu z recyklované textilie byly již vyrobeny firmou RETEX, kde byly zvoleny dva druhy a to PES 1 a PES 2. Vzorky byly nejprve zváženy a určeny jejich rozměry, následně byly vzorky uloženy do sušárny na 150 °C na 15 minut. Po vyjmutí vzorků ze sušárny byly vzorky stlačeny pomocí ručního lisu na 10 mm. Po odtížení došlo k mírné relaxaci vzorku (zvětšení tloušťky). Kvůli této skutečnosti byly vzorky opět uloženy do sušárny na 15 minut. Po 15 minutách byly vzorky opět lisovány na tloušťku 10 mm. Po vyjmutí vzorků z ručního lisu byly vzorky připraveny pro zkoušení požadovaných vlastností viz obrázek 29.



Obrázek 29: Zkušební vzorky z odpadu z textilií od firmy RETEX (vlevo PES 2 a vpravo PES 1)

7.3 STANOVENÍ VLASTNOSTÍ VYROBENÝCH JÁDROVÝCH IZOLANTŮ

7.3.1 STANOVENÍ TLOUŠŤKY A DÉLKY VLÁKEN

Tloušťky a délky vláken byly stanoveny za pomoci optického mikroskopu Levenhuk D670T 5.1M. Na čisté podkladní sklíčko bylo uloženo několik vláken daného vzorku a ty byly zakápnuty kapkou vody. Snaha byla od sebe vlákna co nejvíce oddělit, pro lepší viditelnost při zvětšení. Poté byla vlákna překryta krycím sklíčkem. Takhle připravený vzorek byl uložen pod mikroskop, nastavilo se světlo, přiblížení a vhodné rozlišení pro nejlepší měření velikosti vláken. Délka a tloušťka vláken byla naměřena na stolním počítači propojeným s mikroskopem, a to z důvodu zdokumentování jednotlivých vláken pomocí fotografií.



Obrázek 30: Optický mikroskop Levenhuk D670T 5.1M

7.3.2 STANOVENÍ TLOUŠŤKY IZOLANTŮ

Dle požadavků a postupů normy ČSN EN 823 byla stanovena tloušťka zkušebních vzorků. Tloušťky jednotlivých zkušebních těles byly určeny pomocí zkušebního zařízení sestávajícího z tuhého rámu, tuhé rovinné základní desky,

přítlačné čtvercové desky s přítlakem 50 Pa a digitálního úchylkoměru. Pomocí úchylkoměru se měří vzdálenost základní desky a přítlačné čtvercové desky, mezi nimiž je umístěno zkušební těleso. Tloušťka zkušebních vzorků se měří v milimetrech.



Obrázek 31: Příklad pro stanovení tloušťky zkušebních vzorků

7.3.3 STANOVENÍ ROZMĚRŮ

Dle požadavků a postupů normy ČSN EN 12085. Kde se zkušební vzorek měří pomocí zařízení, které dosahuje požadované stupnice přesnosti. Rozměry byly stanoveny za pomoci pravítka, kdy zkušební vzorky byly umístěny na pevnou rovinnou plochu. Tloušťka zkušebních vzorků se měří v milimetrech.



Obrázek 32: Měření rozměrů zkušebních vzorků

7.3.4 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI

Objemová hmotnost se pro tepelně izolační výrobky stanovuje dle ČSN EN 1602, za použití i normy ČSN EN 12085 a ČSN EN 823. Kde pro stanovení objemové hmotnosti musí být známá šířka, délka, tloušťka a hmotnost zkušebního vzorku. Objemovou hmotnost se stanoví dle:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

kde: m je hmotnost zkušebního vzorku [kg], V je objem zkušebního vzorku [m³].

7.3.5 STANOVENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI

Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven za pomoci přístroje FOX200 vacuum v souladu s ČSN EN 12667 a ISO 8301. Příklad obsahuje hermeticky uzavřenou pracovní komoru a umožňuje stanovení součinitele tepelné vodivosti při různých tlacích.

Před prvním měřením se musí přístroj kalibrovat. Poté se vzorek v přístroji uzavře mezi dvě desky, které jsou v průběhu vytápěny na různou teplotu (teplotní spád byl zvolen vždy 10 °C). Pro měření za sníženého tlaku je celý přístroj zaklopen ocelovým poklopem, čímž je měřicí prostor zcela oddělen od okolního prostoru laboratoře. Následně se nasadí kryt, který musí být velmi dobře utěsněn, vypne

se přívod vzduchu a zapne vakuová trubice. Výsledkem je hodnota součinitele tepelné vodivosti λ [$W/(m \cdot K)$].



Obrázek 33: Měřicí přístroj FOX200 vacuum

7.4 VYHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ JÁDROVÝCH IZOLANTŮ

Na vyrobených zkušebních vzorcích jádrových izolantů byly stanoveny rozměry, tloušťky a vypočítaná objemová a plošná hmotnost. Dále byl stanoven součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku a teplotě.

7.4.1 STANOVENÍ TLOUŠŤKY A DÉLKY VLÁKEN

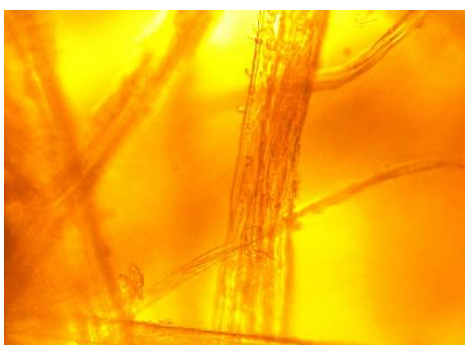
Pro diplomovou práci byly vybrány materiály, na kterých se jako první stanovovala tloušťka a délka vláken. Tloušťka a délka vláken se stanovila na optickém mikroskopu. Tloušťka vláken bavlny a lnu byla stanovena ze 100 měření, ze kterých následně byla spočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Délka vláken bavlny a lnu byla stanovena z 50 měření, ze kterých následně byla spočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Ze vzorků od firmy RETEX se tloušťka stanovila ze 30 měření a délka z 15 měření. Výsledky stanovení tloušťky a délky vláken jsou uvedeny v tabulce číslo 3.

Tabulka 3: Výsledné hodnoty tloušťky a délky vláken

Druh vlákn	Průměrná tloušťka vláken d [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	Průměrná délka vláken [cm]	Směrodatná odchylka [cm]
Bavlna	11,28	3,45	1,6	0,10
Len	19,03	11,66	1,2	0,05
PES 1	13,10	2,08	5,7	0,71
PES 2	12,75	1,08	4,5	0,63



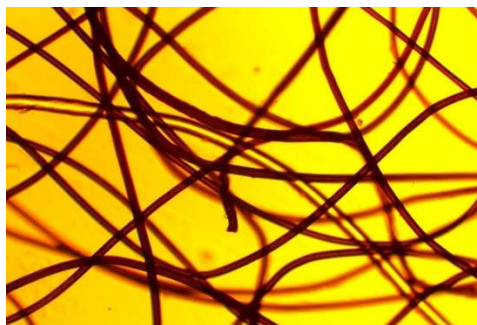
Obrázek 34: Bavlněné vlákno při 40tinásobném zvětšení



Obrázek 35: Lněné vlákno při 40tinásobném zvětšení



Obrázek 36: PES 2 vlákno při 10tinásobném zvětšení



Obrázek 37: PES 1 vlákna při 10tinásobném zvětšení

Při makroskopickém a mikroskopickém zhodnocení vláken čtyř druhů použitých vláken byly zjištěny tyto výsledky. Největší tloušťku měla vlákna z odpadního lnu, která byla 19,3 μm . Naopak nejtenčí byla vlákna z odpadní bavlny 11,28 μm . Uměle vyráběná polyesterová vlákna měla tloušťku, která se pohybovala na hranici 13 μm . Na obrázcích 34 až 37 vidíme rozdíl mezi bavlněným, lněným a polyesterovým vláknem při čtyřicetinásobném/desetinásobném zvětšení. Lněná vlákna byla více roztřepená, průsvitná a zakřivená. Při stanovení délky vláken se přírodní odpadní vlákna pohybovala do 2 cm naopak u polyesterových vláken byla délka větší, a to 4 až 6 cm.

7.4.2 STANOVENÍ ROZMĚRŮ, TLOUŠŤKY, OBJEMOVÉ A PLOŠNÉ HMOTNOSTI

Dle ČSN EN 1602, ČSN EN 823 a ČSN EN 12085 byly stanoveny rozměry, tloušťka a objemová hmotnost zkušebních vzorků. Z vybraných materiálů bylo vyrobeno různé množství vzorků.

Při výrobě byla snaha o vyrobení vzorků s tloušťkou 10 mm a objemovou hmotností 200 kg/m^3 . Při některých vzorcích docházelo po výrobě k expanzi tloušťky.

V praktické části byly vyrobeny jádrové izolanty ze čtyř druhů vláken. Byla použita odpadní vlákna (bavlna, len) a polyesterová vlákna. Na jádrových izolantech vyrobených z těchto vláken byly zkoušeny výše popsané vlastnosti.

Tabulka 4: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z bavlny z první výroby

Vzorek	Hmotnost m [g]	Šířka h [mm]	Délka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	80,89	205	205	16,41	117	1,92
2	75,22	200	200	13,67	138	1,88
Průměr:	78,06	202,50	202,50	15,04	127	1,90

Tabulka 5: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z bavlny z druhé výroby

Vzorek	Hmotnost m [g]	Šířka h [mm]	Délka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	77,78	205	204	12,50	149	1,86
2	77,30	201	202	11,56	165	1,90
Průměr:	77,54	203,00	203,00	12,03	157	1,88

Tabulka 6: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z bavlny ze třetí výroby

Vzorek	Hmotnost m [g]	Šířka h [mm]	Délka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	77,62	200	200	19,86	98	1,94
2	77,14	200	201	20,02	96	1,92
Průměr:	77,64	200,67	201	18,97	102	1,92

Tabulka 7: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z bavlny ze čtvrté výroby

Vzorek	Hmotnost m [g]	Šířka h [mm]	Délka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	76,4	205	205	14,6	125	1,82
2	77,70	201	204	16,60	114	1,89
Průměr:	77,05	203	204,5	15,6	119	1,86

Dalším krokem v postupu prací bylo stanovení plošné hmotnosti, objemové hmotnosti a tloušťky. Pro vyrobení ideálního jádrového materiálu byly zvoleny 4 druhy výroby. Po stanovení výsledných vlastností a zkušenosti s technologií byla určena jako nejlepší technologie 4. druh výroby. Snaha byla přiblížit se co nejnižší tloušťce a zároveň mít minimální objemovou hmotnost. Při výrobním postupu

1 a 2 byla příliš vysoká objemová hmotnost a u 3. postupu výroby byla velká tloušťka (důvodem byla velká relaxace vzorků díky nedokonalému rozmísení bikomponentních a použitých vláken, dalším důvodem extrémní relaxace těchto vzorků je použití bikomponentních vláken větší délky, kdy tato vlákna nebyla schopna vydržet napětí od relaxace). Z tohoto důvodu se dále tyto tři druhy výroby už nepoužívaly. U čtvrté technologie výroby byla tloušťka 15,6 mm při objemové hmotnosti 119 kg/m³, což bylo vyhodnoceno jako nejefektivnější výrobek.

Tabulka 8: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z Inu

Vzorek	Hmotnost m [g]	Šířka h [mm]	Délka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	71,67	200	200	10,69	168	1,79
2	76,29	200	200	10,22	187	1,91
Průměr:	73,98	200	200	10,46	178	1,85

Tabulka 9: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků PES 1

Vzorek	Hmotnost m [g]	Šířka h [mm]	Délka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	137,17	200	201	12,64	270	3,41
2	135,96	201	203	13,18	253	3,33
Průměr:	136,57	200,5	202	12,91	261	3,37

Tabulka 10: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků PES 2

Vzorek	Hmotnost m [g]	Šířka h [mm]	Délka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	70,77	200	197	11,01	163	1,80
2	71,43	200	196	10,67	171	1,82
Průměr:	71,10	200	196,5	10,84	167	1,81

Při porovnání jednotlivých jádrových izolantů s rozličnými druhy vláken byly patrné vysoké rozdíly. Jádro vyrobené z odpadního Inu dosahovalo nejnižších tlouštěk při zachování poměrně přijatelné objemové hmotnosti. U vláken z odpadní bavlny byla nižší objemová hmotnost na úkor zvýšení tloušťky. Vzorky

z polyesterových vláken měly požadovanou tloušťku, u PES 2 odpovídala i objemová hmotnost ale u vzorku PES 1 byla objemová hmotnost výrazně vyšší než ostatní. Po vyhodnocení těchto vlastností se jako potenciálně efektivní jeví vzorky z odpadní bavlny, lnu a PES 2.

7.4.3 STANOVENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI

Na vzorcích jádrových izolantů se stanovila závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku při teplotním spádu 10 °C. Součinitel tepelné vodivosti se stanovil za normálního tlaku ($p=1013,25$ mbar) a poté ve vakuu při 0,05 mbar, 0,5 mbar, 1 mbar, 10 mbar.

Tabulka 11: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u vzorků z bavlny

Tlak [mbar]	Tloušťka [mm]	λ [mW/(m·K)]			Průměr λ [mW/(m·K)]
0,05	15,06	5,26	5,14	5,04	5,15
0,5	14,39	10,18	10,36	10,54	10,36
1	14,45	14,25	14,30	14,35	14,30
10	14,36	30,06	30,04	30,04	30,05
normální tlak	14,78	41,97	41,89	41,85	41,90

Tabulka 12: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u vzorků ze lnu

Tlak [mbar]	Tloušťka [mm]	λ [mW/(m·K)]			Průměr λ [mW/(m·K)]
0,05	10,30	4,55	4,45	4,35	4,45
0,5	9,92	9,05	9,14	9,23	9,14
1	9,89	12,40	12,46	12,54	12,47
10	9,87	28,72	28,70	28,69	28,70
normální tlak	9,61	43,51	43,41	43,35	43,42

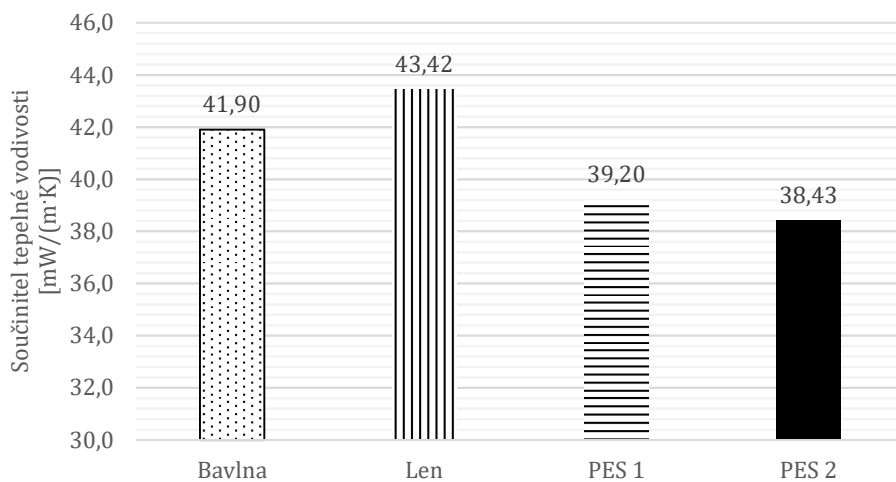
Tabulka 13: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u vzorků PES 1

Tlak [mbar]	Tloušťka [mm]	λ [mW/(m·K)]			Průměr λ [mW/(m·K)]
0,05	9,04	2,84	2,89	2,91	2,88
0,5	9,06	8,24	8,31	8,41	8,32
1	9,07	11,62	11,72	11,87	11,74
10	9,09	25,40	25,42	25,43	25,42
normální tlak	9,04	33,46	33,45	33,45	33,45

Tabulka 14: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u vzorků PES 2

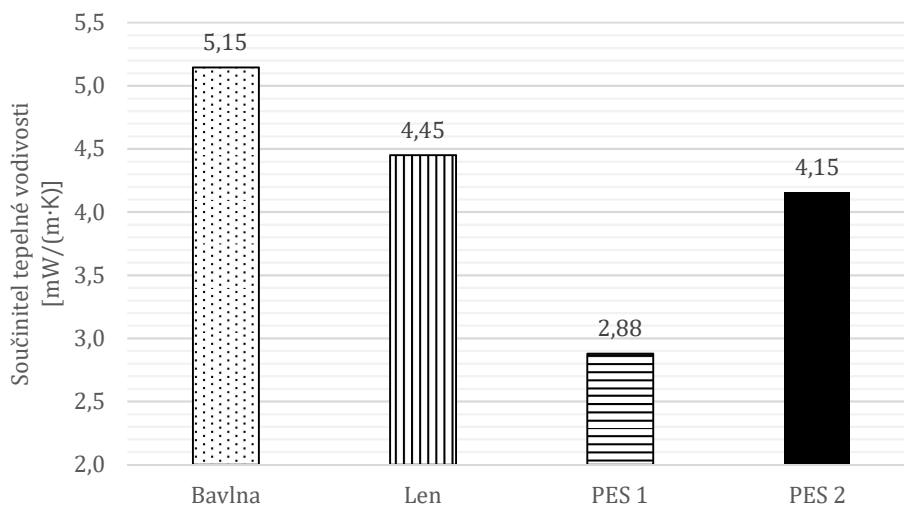
Tlak [mbar]	Tloušťka [mm]	λ [mW/(m·K)]			Průměr λ [mW/(m·K)]
0,05	12,35	4,22	4,15	4,09	4,15
0,5	12,33	9,14	9,10	8,71	8,99
1	12,27	12,20	12,31	11,68	12,06
10	12,24	26,05	26,09	26,09	26,08
normální tlak	11,60	38,43	38,43	38,44	38,43

Graf 2: Srovnání součinitele tepelné vodivosti za normálního tlaku



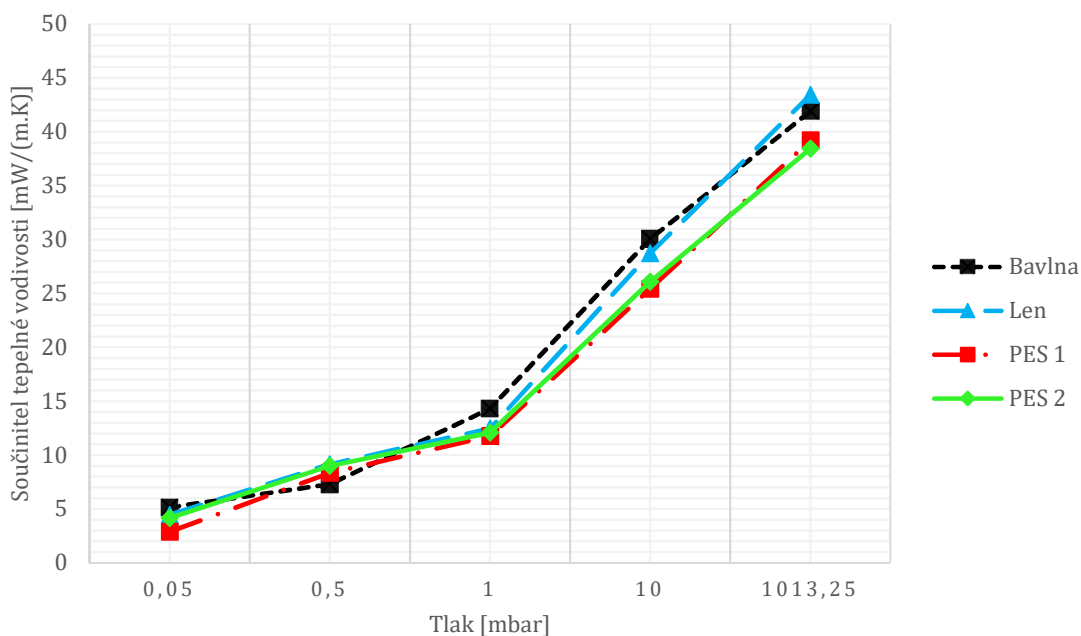
Při stanovení součinitele tepelné vodivosti při normálním tlaku (101,3 kPa) nebyly výrazné rozdíly u zkoušených vzorků zjištěny. Vzorky z umělých vláken měly součinitel tepelné vodivosti mírně nižší (PES 1 - 39,20 mW/(m·K), PES 2 - 38,43 mW/(m·K)) než vzorky vyrobené z odpadních přírodních vláken (len - 43,42 mW/(m·K), bavlna 41,9 mW/(m·K)).

Graf 3: Srovnání součinitele tepelné vodivosti při vakuu



Při podrobení zkoušených vzorků téměř vakuovému prostředí (5 Pa) došlo k výraznému snížení součinitele tepelné vodivosti. Nejnižší hodnotu 2,88 mW/(m·K) zaznamenal vzorek PES 1, u kterého byla hodnota téměř o polovinu nižší jak u vzorků z bavlny. Nejvyšší hodnotu měly vzorky vyrobené z bavlny 5,15 mW/(m·K). Mezi těmito hodnotami se pohybovaly poslední dva vzorky.

Graf 4: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku



Při stanovení závislosti tepelné vodivosti na tlaku vyšlo najevo, že se snižujícím se tlakem výrazně klesá součinitel tepelné vodivosti a tím byl

potvrzen princip výroby VIP. Polyesterová vlákna se pro použití jeví mírně efektivnější, ale rozdíly oproti vzorkům z přírodních odpadů byly minimální. Otázkou je ekonomické zhodnocení použitých vláken na úkor zjištěných vlastností.

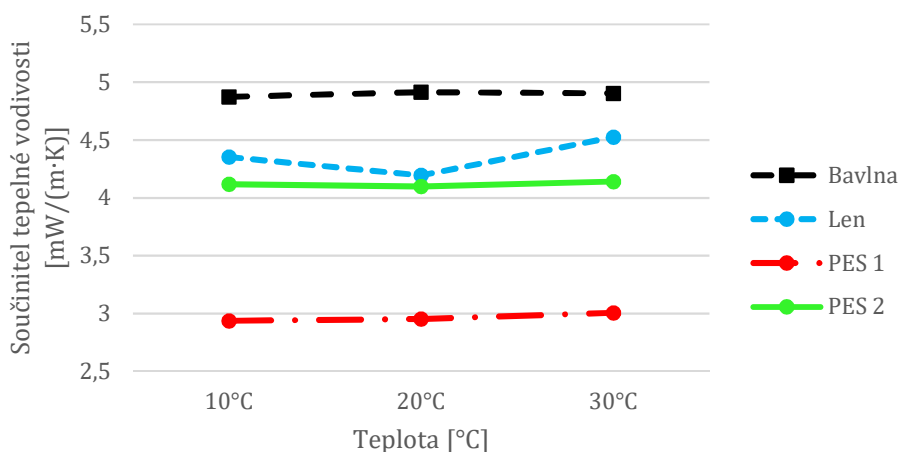
7.4.4 STANOVENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI NA TEPLOTĚ

Na vyrobených zkušebních jádrových izolantech byl stanoven součinitel tepelné vodivosti v závislosti na teplotě, při teplotním spádu 10 °C, 20 °C a 30 °C a tlaku 5 Pa.

Tabulka 15: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na teplotě u vyrobených vzorků

Vzorek	Tlak [Pa]	λ [mW/(m·K)]		
		10 °C	20 °C	30 °C
Bavlna	5	4,87	4,91	4,90
Len		4,35	4,19	4,53
PES 1		2,94	2,95	3,01
PES 2		4,12	4,10	4,14

Graf 5: Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě u jednotlivých vzorků



Při porovnání součinitele tepelné vodivosti se vzrůstající se teplotou byla patrná závislost. Se zvyšující se teplotou byl zaznamenán mírný nárůst součinitele tepelné vodivosti. Nejvyšší nárůst tepelné vodivosti byl u vzorků vyrobených ze lnu. U ostatních vzorků byl nárůst součinitele tepelné vodivosti minimální.

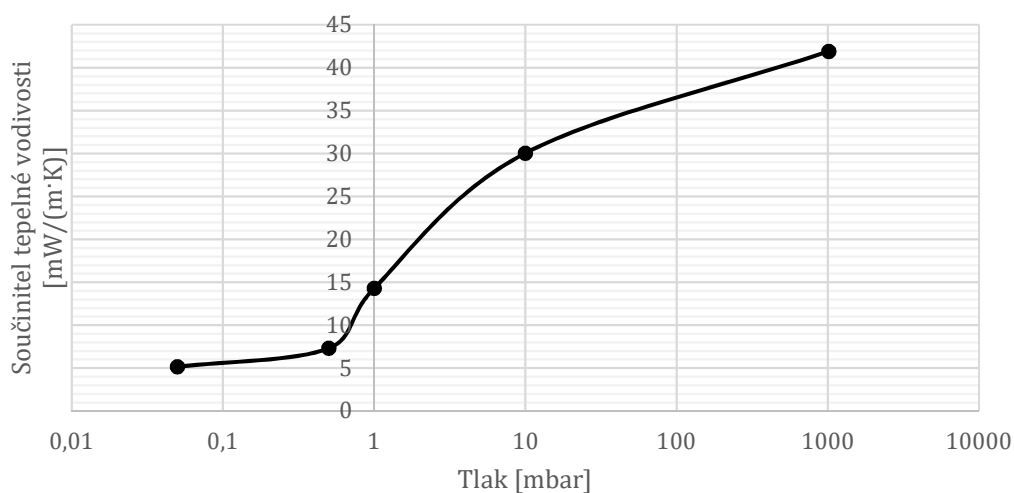
7.4.5 STANOVENÍ HODNOTY $p_{1/2}$ [MBAR]

Pro porovnání jednotlivých jádrových izolantů pro výrobu VIP byla zavedena veličina $p_{1/2}$, která je založena na současném měření vnitřního tlaku a středu tepelné vodivosti panelu.

Tabulka 16: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a $p_{1/2}$ pro vzorky z bavlny

λ_{vakuum} [mW/(m·K)]	$\lambda_{\text{normální tlak}}$ [mW/(m·K)]	$p_{1/2}$ [mbar]
5,146	41,903	5,5

Graf 6: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u vzorků z bavlny

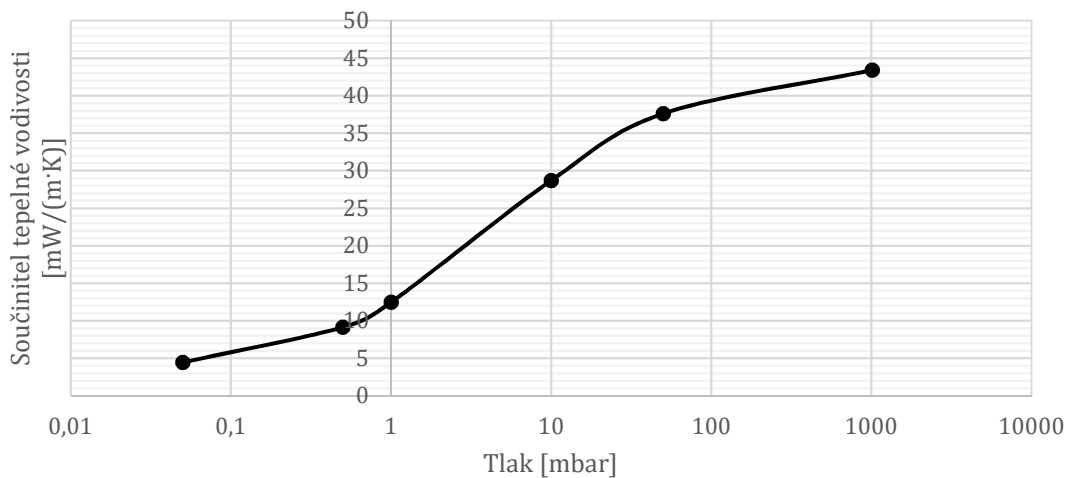


Při stanovení hodnoty $p_{1/2}$ se vychází z maximální a minimální hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Hodnota u vzorků z odpadní bavlny vyšla 5,5 mbar.

Tabulka 17: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a $p_{1/2}$ pro vzorky ze lnu

λ_{vakuum} [mW/(m·K)]	$\lambda_{\text{normální tlak}}$ [mW/(m·K)]	$p_{1/2}$ [mbar]
4,451	43,423	7,2

Graf 7: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u vzorků ze lnu

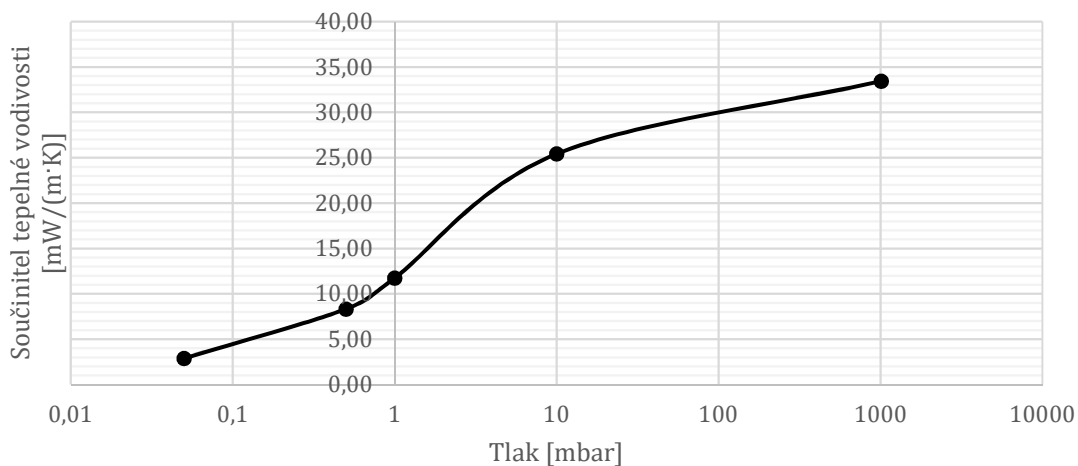


Hodnota $p_{1/2}$ u vzorků z odpadního lnu vyšla 7,2 mbar, což vykazuje lepší výsledek než u bavlny.

Tabulka 18: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a $p_{1/2}$ pro vzorky PES 1

λ_{vakuum} [mW/(m·K)]	$\lambda_{\text{normální tlak}}$ [mW/(m·K)]	$p_{1/2}$ [mbar]
2,88	33,45	3,7

Graf 8: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u vzorků PES 1

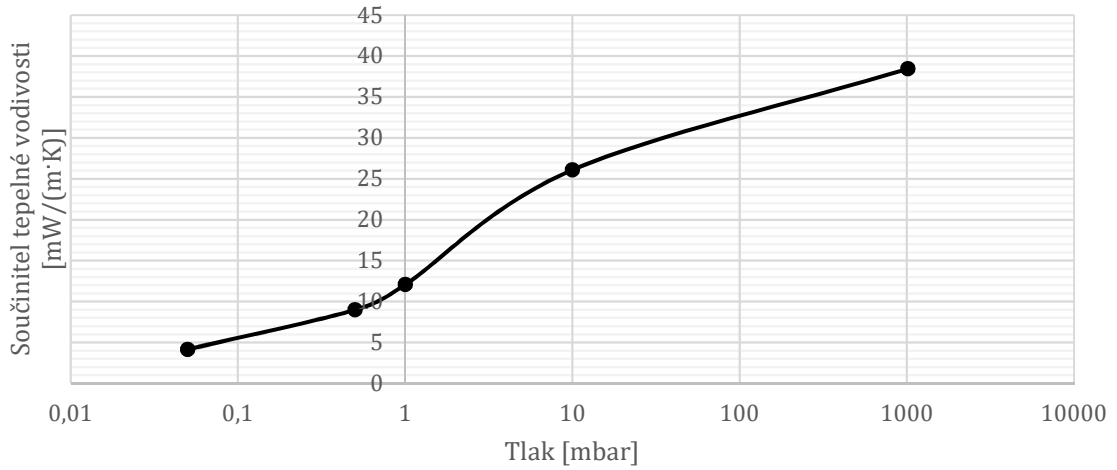


U vzorku z polyesterových vláken PES 1 vyšla hodnota $p_{1/2}$ 6,4 mbar.

Tabulka 19: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a $p_{1/2}$ pro vzorky PES 2

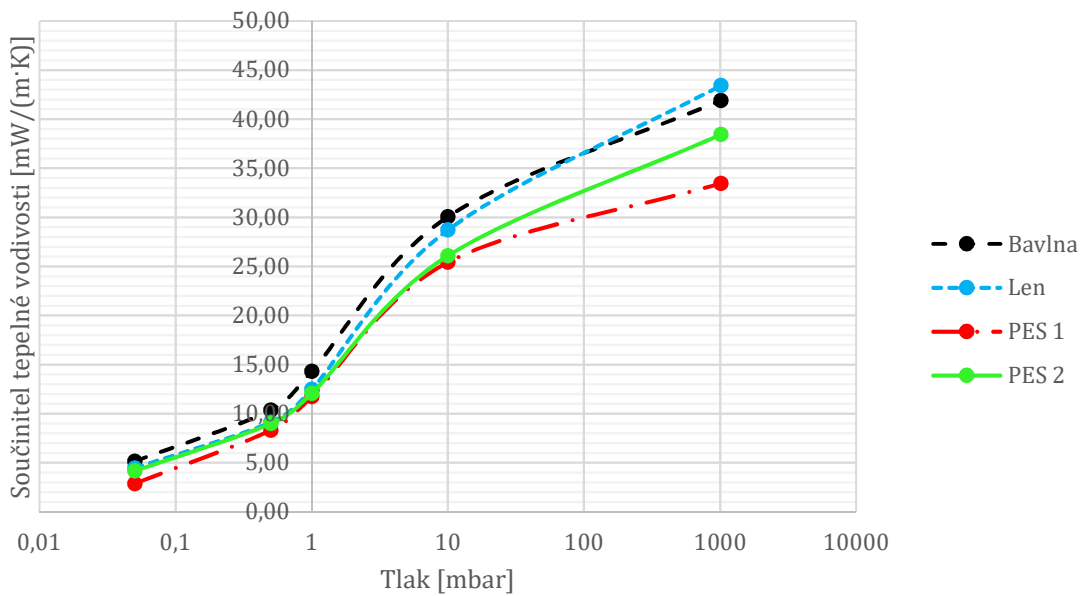
λ_{vakuum} [mW/(m·K)]	$\lambda_{\text{normální tlak}}$ [mW/(m·K)]	$p_{1/2}$ [mbar]
4,154	38,430	6,0

Graf 9: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u vzorků PES 2



U vzorku PES 2 byla stanovena hodnota $p_{1/2}$ na 6,0 mbar.

Graf 10: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u jednotlivých vzorků



Při porovnání všech křivek bylo patrné že nejnižší tepelnou vodivost při všech tlacích měly vzorky PES 1 a naopak nevyšší vzorky z bavlny. Při stanovení hodnoty $p_{1/2}$ se jako nejzajímavější jeví vzorky vyrobené z odpadního lněného vlákna, kdy hodnota byla 7,2 mbar. Při zjišťování $p_{1/2}$ je snaha docílit co nejvyšší hodnoty, jelikož to vyjadřuje, že součinitel tepelné vodivosti se při tomto tlaku zvýšil přesně o polovinu.

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Pro výrobu jádrového izolantu jsou klíčovým bodem vstupní suroviny. V praktické části byly použity tři druhy sekundárních (druhotných) vláken. Jednalo se o bavlněná, lněná a polyesterová vlákna.

Pro zkoumání vlivu těchto vláken na výsledný výrobek jádrového izolantu byly ověřeny vlastnosti jednotlivých vláken (tloušťka, délka). Nejjemnější vlákno (11 μm) měla vlákna z odpadní bavlny. Polyesterová vlákna měla mírně vyšší tloušťku (okolo 13 μm). Nejtlustší vlákna byla z odpadního lnu (19 μm). Při stanovení délky vláken byla vlákna z bavlny a lnu výrazně kratší (1 až 2 cm), a to z důvodu, že se jednalo o odprachy z vláken zachycených na filtrech při výrobním procesu. Polyesterová vlákna byla vyrobena uměle a zkracovaná na požadovanou délku (4 až 6 cm).

Z připravených vláken byly vyrobeny desky jádrových izolantů, na kterých byla zkoušena objemová hmotnost, popřípadě plošná hmotnost. Společně s tloušťkou desek jádrových izolantů byly tyto vlastnosti rozhodujícím kritériem při hodnocení použitých technologií výroby. Nejlépe se jevila čtvrtá technologie výroby, a to z důvodu nejmenší zpětné relaxace vzorků (nárůst tloušťky) a byla následně použita pro výrobu všech jádrových izolantů v této práci. Nejmenší tloušťku vyrobených desek měly vzorky ze lnu a PES 2 (okolo 10,5 mm) při objemové hmotnosti v rozmezí 167 až 178 kg/m^3 . Největší tloušťku (15,6 mm) a nejnižší objemovou hmotnost (119 kg/m^3) měly vzorky z odpadní bavlny. Bylo to způsobeno horším rozdužením bavlněných vláken a nedokonalou homogenizací s bikomponentními pojíci vlákny. Největší objemovou hmotnost (261 kg/m^3) měly vzorky z PES 1. Plošná hmotnost se u bavlněných, lněných a PES 2 vláken pohybovala podobně (1,81 až 1,86 kg/m^2), z důvodu stejného množství vstupních surovin. U PES 1 byla plošná hmotnost téměř dvojnásobná (3,37 kg/m^2), plošné hmotnosti všech vzorků korespondovaly s objemovými hmotnostmi.

Při vyhodnocení závislosti součinitele tepelné vodivosti na tlaku se prokázalo, že se snižujícím se tlakem výrazně klesá tepelná vodivost.

Při normálním tlaku byla nejnižší tepelná vodivost naměřena u polyesterových vláken (PES 1 39,2 mW/(m·K), PES 2 38,43 mW/(m·K)). U přírodních vláken byl součinitel tepelné vodivosti mírně vyšší (bavlna 41,9 mW/(m·K) a len 43,42 mW/(m·K)). Při postupném snižování tlaku až po vakuum mají hodnoty součinitele podobnou tendenci jako u normálního tlaku, avšak hodnoty jsou 10krát nižší. Minimální hodnota byla naměřena u PES 1 2,88 mW/(m·K) a maximální u bavlny 5,15 mW/(m·K).

Při stanovení součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotním spádu 10 °C, 20 °C, 30 °C a při tlaku 5 Pa byla zjištěna mírná závislost, že se zvyšující se teplotou dochází k navýšení tepelné vodivosti. Největší nárůst součinitele tepelné vodivosti byl u vzorků vyrobených z odpadního lnu, avšak i tento nárůst byl velmi nízký (pouze 0,173 mW/(m·K)).

Při zhodnocení veličiny $p_{1/2}$, která popisuje závislost součinitele tepelné vodivosti na vnitřním tlaku. Nejzajímavěji se jeví vzorky vyrobené z odpadního lnu ($p_{1/2} = 7,2$). výsledek byl zapříčiněn použitými vlákny, která byla velice jemná, nesdružovala se do shluků a při smíchání s bikomponentními vlákny tvořily nejvíce homogenní směs. Naopak nejnižší hodnotu ($p_{1/2} = 5,5$) měly vzorky z bavlny, a to z důvodu nedokonalého rozdělení velmi jemných vláken a neefektivní homogenizace s bikomponentními vlákny. Vzorky vyrobené z polyesterových vláken se pohybovaly v rozmezí mezi bavlnou a lnem. Rozdíly mezi všemi vyrobenými vzorky v hodnotách $p_{1/2}$ jsou minimální.

Při porovnání experimentálně vyrobených jádrových izolantů s komerčními produkty používaných v praxi bylo zjištěno, že součinitel tepelné vodivosti, u již používaných VIP se pohybuje v rozmezí 5 až 7 mW/(m·K). Vyrobené jádrové izolanty v praktické části diplomové práce dosahovaly nižších hodnot (až na vzorky z bavlny) než komerčně prodávané VIP.

9 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla zpracována rozsáhlá literární rešerše zabývající se principy vedení tepla a problematikou vakuových izolačních panelů (VIP). V teoretické části byly popsány suroviny pro výrobu, technologie výroby, problém s životností a trvanlivostí VIP. Praktická část práce byla zaměřena na výrobu jádrových izolantů vakuových izolačních panelů. Cílem bylo využití především odpadních materiálů z průmyslové výroby textilu a v zemědělství (bavlna, len) pro výrobu jádrového izolantu.

Důležitým krokem bylo stanovení optimální technologie výroby. Dohromady byly zvoleny čtyři postupy výroby jádrového izolantu. Následně byla vybrána nejefektivnější z nich a pokračovalo se ve výrobě. Celkově byly v práci vyrobeny čtyři druhy vzorků, na kterých se vyzkoušely požadované vlastnosti. Dva druhy vzorků byly vyrobené z přírodních odpadních surovin (odprašky z bavlny a lnu) a dva druhy byly z uměle vyrobených průmyslových vláken. Všechny druhy vzorků byly pojeny bikomponentním vláknem. Při srovnání vzorků vyrobených z přírodních vláken s umělými byly hodnoty součinitele tepelné vodivosti nepatrně nižší u průmyslově vyráběných polyesterových vláken.

V práci byl potvrzen princip výroby vakuových izolací, kdy s klesajícím tlakem v materiálu výrazně klesá tepelná vodivost (v našem případě až 10krát). Při srovnání námi vyrobených izolantů s ostatními izolanty v praxi se jeví použití vláken z odprašků ze lnu velice perspektivně, jelikož hodnota $p_{1/2} = 7,2$ se vyrovnává některým skleněným vláknům dosud v praxi využívaných.

Součinitel tepelné vodivosti vyrobených jádrových izolantů pro VIP dosahoval nižších hodnot než u VIP používajících se v současné době a díky tomu má výroba VIP z odpadních surovin do budoucna velký potenciál. Při zdokonalení technologie výroby (lepší homogenizace směsi) jádrových izolantů se dají očekávat výrazně nižší výsledky součinitele tepelné vodivosti výsledných výrobků VIP.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN 73 540-1. Tepelná ochrana budov Část 1: Terminologie. Český normalizační institut, 2005.
- [2] Tepelný odpor R [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/312-tepelny-odpor-r>
- [3] SCHAUER, Pavel. *Aplikovaná fyzika: Přenos tepla*. Brno, 2006.
- [4] Aplikovaná fyzika: Přenosové jevy [online]. VŠB-TU Ostrava [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://imhfyzikafbi.wz.cz/prednaskyAFpdf/transport.pdf>
- [5] ŠŤASTNÍK, Stanislav. Tepelné toky ve vybraném objektu zemědělskopotravinářského komplexu. Brno, 2017. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Mareček, DrSc., dr. h. c..
- [6] KWON, Jae-Sung, Choong Hyo JANG, Haeyong JUNG a Tae-Ho SONG. Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009, 52(23-24), 5525-5532. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.029. ISSN 00179310. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931009003937>
- [7] HANITA COATINGS. Thermal Conductivity of VIPs as a Function of Internal Pressure. 2015.
- [8] JOHANSSON, PÄR. Vacuum Insulation Panels in Buildings. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Göteborg, Sweden, 2012.
- [9] SIMMLER, Hans, Samuel BRUNNER, Ulrich HEINEMANN, et al. Vacuum Insulation Panels: Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A). 2005. IEA/ECBCS Annex 39.
- [10] ZACH, Jiří a Jitka HROUDOVÁ. Vývoj vakuových izolací v průmyslu a stavebnictví [online]. 23.10.2017 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: [8]

<https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/16449-vyvoj-vakuovych-izolaci-v-prumyslu-a-stavebnictvi>

- [11] DVOŘÁK, Richard. STUDIUM VAKUOVÝCH TEPELNÝCH IZOLACÍ PRO VYUŽITÍ VE STAVBÁCH. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce PROF. RNDR. ING. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSC.
- [12] Applied Energy. 2011, 88(11). ISSN 03062619. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261911002753>
- [13] System for Manufacturing Core of Vacuum Insulation Panel [online]. 05/08/2014 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/y2014/0127346.html>
- [14] MAHMOOD, Alam. DEVELOPMENT OF VACUUM INSULATION PANEL WITH LOW COST CORE MATERIAL: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy [online]. Department of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering College of Engineering, Design and Physical Science Brunel University London, 2015 [cit. 2019-01-02].
- [15] BRUNNER, Samuel, Karim GHAZI WAKILI, Thomas STAHL a Bruno BINDER. *Vacuum insulation panels for building applications—Continuous challenges and developments. Energy and Buildings* [online]. 2014, 85, 592-596 [cit. 2019-01-02]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.09.016. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814007075>
- [16] Boyce Sek Koon Chang. *Vacuum insulation panel core materials and modelling the thermal conductivity of granular materials* [online]. 2015 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=5787&context=etd>
- [17] JIRSÁK, Oldřich a Klára KALINOVÁ. Netkané textilie [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/938/mod_resource/content/1/Oldrich%20Jirsak%20a%20Klara%20Kalinov%C3%A1.pdf

- [18] Bikomponentní vlákno [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: https://www.google.com/search?tbm=isch&q=non+woven-fabric-synthetic-fiber-bikomponentn%C3%AD&spell=1&sa=X&ved=0ahUKEwi_7PeG28_fAhVkonEKHT8qClSQBQgrKAA&biw=681&bih=616&dpr=1#imgrc=6c_8jLs7mf82hM:
- [19] Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering. 2012, 58(10). ISSN 00392480. Dostupné také z: <http://www.sv-jme.eu/article/vacuum-insulation-panels-vip-an-assessment-of-the-impact-of-accelerated-ageing-on-service-life/>
- [20] Case Studies in Construction Materials. 2017, 7. ISSN 22145095. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509517301109>
- [21] Bbb Vacuum insulation panels (VIP) with factory applied protection layers. In: European Assessment Document, EAD 040011-00-1201.
- [22] BAETENS, Ruben, Bjørn Petter JELLE, Jan Vincent THUE, Martin J. TENPIERIK, Steinar GRYNNING, Sivert UVSLØKK a Arild GUSTAVSEN. Vacuum insulation panels for building applications. Energy and Buildings. 2010, 42(2), 833-842. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.09.005. ISSN 03787788. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778809002199>
- [23] PENG, Changhai a Jianqiang YANG. Structure, Mechanism, and Application of Vacuum Insulation Panels in Chinese Buildings. Advances in Materials Science and Engineering. 2016, 2016, 1-12. DOI: 10.1155/2016/1358072. ISSN 1687-8434. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2016/1358072/>
- [24] PROPASIV S.R.O. Vakuová izolace pro snadné řešení rekonstrukce podlahy [online]. 8.3.2016 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/13881-vakuova-izolace-pro-snadne-reseni-rekonstrukce-podlahy>

- [25] RAKOUSKÝ, Slavomír. Len [online]. 2003 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Len_sety.htm
- [26] CHYBÍK, Josef. Přírodní stavební materiály. Praha: Grada, 2009. Stavitel. ISBN ISBN978-80-247-2532-1.
- [27] Zákon 406/2000 Sb., ze dne 29.11.2000, o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů. ISSN 1211-1244.
- [28] Vyhláška č. 78/2013 Sb., ze dne 22.03.2013, vyhláška o energetické náročnosti budov
- [29] Vyhláška č. 268/2009 Sb., ze dne 12.08.2009, vyhláška o technických požadavcích na stavby
- [30] ČSN 73 0540-2, Tepelná ochrana budov. Část 2: Funkční požadavky, Český normalizační institut, 2011.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma proudění vzduchu a teploty na povrchu tělesa [14].....	17
Obrázek 2: Schéma rozdělení sálavé energie dopadající na povrch tělesa [5].....	18
Obrázek 3: Jednoduchý kubický model (vlevo) a šestiúhelníkový uzavřený model (vpravo) [6]	20
Obrázek 4: Jednoduchý kubický model pěny s otevřenými buňkami [6]	21
Obrázek 5: Jednoduchý model vláknité izolace [6]	22
Obrázek 6: Rozložená struktura nosníku [6].....	23
Obrázek 7: Vícevrstvý střídavý paprsek s radiačními štíty [6]	24
Obrázek 8: Tepelné vodivosti v závislosti na různé velikosti pórů [6].....	24
Obrázek 9: Vakuový izolační panel [8]	28
Obrázek 10: Skladba vakuového izolačního panelu [12]	30
Obrázek 11: Vliv tloušťky vláken a pórovitosti izolantu na tepelnou vodivost VIP na bázi skleněné vlny [15].....	33
Obrázek 12: Přenos tepla skleněných vláken na dvou modelech a) neuspořádaná vlákna, b) uspořádaná vlákna [15]	33
Obrázek 13: Tvary příčných řezů bikomponentních vláken (A – jádro, plášť; B – bok po boku; C – vlákna typu ostrovy v moři; D – vlákna s průřezem několika jemných fibril) [17].....	35
Obrázek 14: Bikomponentní vlákna [18]	35
Obrázek 15: Druhy obálek vakuových izolačních panelů [12].....	37
Obrázek 16: Svářecí stroj	39
Obrázek 17: Vakuovací stroj pro vakuové izolační panely [14].....	40

Obrázek 18: Aplikace vakuových izolačních panelu pomocí lepení a kotvení na budovách [23].....	45
Obrázek 19: Montáž vakuového izolačního systému v interiéru [23].....	46
Obrázek 20: Použití vakuových izolačních panelu na podlahy [24].....	47
Obrázek 21: Sendvičový panel (polystyrén + VIP) [8].....	48
Obrázek 22: Lněná vlákna [25]	52
Obrázek 23: Čistá bavlněná vlákna [10]	53
Obrázek 24: Směsi z odpadu ze zpracování bavlny a lnu spojené bikomponentním vláknem	54
Obrázek 25: Zkušební vzorky vyrobené prvním postupem.....	58
Obrázek 26: Směs odpadu ze zpracování bavlny spojené zkrácenými bikomponentními vlákny	59
Obrázek 27: Vyrobený zkušební vzorek z bavlny čtvrtým postupem	59
Obrázek 28: Vyrobený zkušební vzorek z lnu	60
Obrázek 29: Zkušební vzorky z odpadu z textilií od firmy RETEX (vlevo PES 2 a vpravo PES 1)	60
Obrázek 30: Optický mikroskop Levenhuk D670T 5.1M	61
Obrázek 31: Příklad pro stanovení tloušťky zkušebních vzorků.....	62
Obrázek 32: Měření rozměrů zkušebních vzorků	63
Obrázek 33: Měřicí přístroj FOX200 vacuum	64
Obrázek 34: Bavlněné vlákno při 40tinásobném zvětšení.....	65
Obrázek 35: Lněné vlákno při 40tinásobném zvětšení	65
Obrázek 36: PES 2 vlákno při 10tinásobném zvětšení	65
Obrázek 37: PES 1 vlákna při 10tinásobném zvětšení.....	66

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Tepelná vodivost jádrových materiálů jako funkce tlaku [22].....	27
Graf 2: Srovnání součinitele tepelné vodivosti za normálního tlaku.....	70
Graf 3: Srovnání součinitele tepelné vodivosti při vakuu	71
Graf 4: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku	71
Graf 5: Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě u jednotlivých vzorků.....	72
Graf 6: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u vzorků z bavlny	73
Graf 7: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u vzorků ze lnu	74
Graf 8: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u vzorků PES 1	74
Graf 9: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u vzorků PES 2	75
Graf 10: Tepelná vodivost jako funkce vnitřního tlaku u jednotlivých vzorků	75

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Tabulka jednotlivých vzorků, pro porovnání vlastností [22]	27
Tabulka 2: Přehled výhod a nevýhod VIP pro stavební účely [22]	44
Tabulka 3: Výsledné hodnoty tloušťky a délky vláken	65
Tabulka 4: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z bavlny z první výroby	67
Tabulka 5: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z bavlny z druhé výroby	67
Tabulka 6: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z bavlny ze třetí výroby	67
Tabulka 7: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z bavlny ze čtvrté výroby	67
Tabulka 8: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků z lnu	68
Tabulka 9: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků PES 1	68
Tabulka 10: Vlastnosti jádrového izolantu vzorků PES 2	68
Tabulka 11: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u vzorků z bavlny	69
Tabulka 12: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u vzorků ze lnu	69
Tabulka 13: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u vzorků PES 1	70
Tabulka 14: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u vzorků PES 2	70
Tabulka 15: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na teplotě u vyrobených vzorků	72
Tabulka 16: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a $p_{1/2}$ pro vzorky z bavlny	73
Tabulka 17: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a $p_{1/2}$ pro vzorky ze lnu	73
Tabulka 18: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a $p_{1/2}$ pro vzorky PES 1	74
Tabulka 19: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a $p_{1/2}$ pro vzorky PES 2	75