



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

MOŽNOSTI VYUŽITÍ NETRADIČNÍCH SUROVIN PRO VÝROBU VAKUOVÝCH TEPELNÝCH IZOLACÍ S EXTRÉMNĚ NÍZKOU HODNOTOU TEPELNÉ VODIVOSTI

POSSIBILITIES OF USE OF NON TRADITIONAL RAW MATERIALS FOR THE
MANUFACTURE OF THE VACUUM THERMAL INSULATION WITH EXTREMELY LOW
THERMAL CONDUCTIVITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Růžena Kováriková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2018



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. Růžena Kováriková
Název	Možnosti využití netradičních surovin pro výrobu vakuových tepelných izolací s extrémně nízkou hodnotou tepelné vodivosti
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

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

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
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 pokročilých izolačních materiálů na bázi netradičních surovin (druhotných a přírodních surovin) a možnostem jejich využití pro výrobu vakuových izolací s použitím ve stavebnictví a průmyslu. Práce bude věnována možným surovinovým zdrojům, které je možné využít při výrobě vakuových izolací se zaměřením na alternativní suroviny (textilní vlákna, přírodní vlákna, další přírodní a druhotné suroviny). Cílem bude jednak zmapovat různé alternativní zdroje a určit jejich potenciál a případné koncové využití při výrobě vakuových izolačních panelů. Dále bude cílem navrhnout jádrové izolanty z alternativních surovin pro (minimálně) středně dobé aplikace. Provést návrh izolantů a na průmyslově vyrobených prototypch izolantů stanovit základní vlastnosti důležité z pohledu výroby vakuových izolačních panelů (především závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku, stanovení dlouhodobé stability a trvanlivosti, stanovení smrštění při vakuaci). Součástí práce bude také stanovení optimální objemové hmotnosti pro každou navrženou recepturu izolantu. V závěru práce bude provedeno také ekonomické zhodnocení konkurenceschopnosti alternativních izolantů na stavebním trhu v oblasti vakuových izolací.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování 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

Práce se bude věnovat studiu chování pokročilých izolačních materiálů na bázi druhotných surovin a možnostem jejich využití pro výrobu vakuových izolací s použitím ve stavebnictví a průmyslu. Práce bude věnovaná možným surovinovým zdrojům, problematice dlouhodobého chování izolantů na bázi vybraných druhotných surovin za sníženého tlaku, a také ekonomickému zhodnocení konkurenceschopnosti alternativních izolantů na stavebním trhu v oblasti vakuových izolací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vakuum, alternativní materiály, tepelná vodivost, izolace

ABSTRACT

The thesis deals with the study of the behavior of advanced insulating materials on the basis of secondary raw materials and the possibilities of their use in the production of vacuum insulation using in the construction and industry. The work will be devoted to possible raw material resources, problems of long-term behavior of insulators on the basis of selected secondary raw materials under reduced pressures as well as economic evaluation of the competitiveness of alternative insulators on the building market in the field of vacuum insulation.

KEYWORDS

Vacuum, alternative materials, thermal conductivity, insulations

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Růžena Kováriková *Možnosti využití netradičních surovin pro výrobu vakuových tepelných izolací s extrémně nízkou hodnotou tepelné vodivosti*. Brno, 2017. 96 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2017

Bc. Růžena Kováriková

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.....	11
1 TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 Základní principy šíření tepla.....	13
1.1.1 Způsoby přenosu tepla.....	13
1.1.2 Základní veličiny přenosu tepla.....	14
1.1.3 Fourierův zákon vedení tepla.....	14
1.2 Nové trendy a materiály v oblasti tepelné ochrany budov.....	15
1.3 Vakuové izolační panely (VIP) a jejich složení.....	16
1.3.1 Jádrový izolační materiál.....	16
1.3.1.1 Pěnové materiály	16
1.3.1.2 Práškové materiály	17
1.3.1.3 Vláknité materiály	18
1.3.2 Obálka.....	18
1.3.3 Getry a vysoušeče	19
1.4 Přenos tepla v jádrových materiálech	19
1.4.1 Vedení tuhými matricemi	20
1.4.2 Vedení plynými matricemi	23
1.4.3 Sálání	24
1.5 Konvekce pórovým systémem	25
1.6 Účinky aditiv PE v PS-jádru VIP.....	27
1.7 Účinek sušení jádrového materiálu na tepelnou vodivost.....	29
1.8 Efektivní getr pro použití ve vysoko-vakuové izolační nádrži	34
1.9 Možné druhy jader	39
1.9.1 Organické polymerní pěny.....	39
1.9.2 Vlákná z melamin-formaldehydové pryskyřice.....	39
1.9.3 Polyester.....	41

1.9.4	Akrylová vlákna.....	42
1.9.5	Bavlna	42
1.10	Metody měření tlaku plynu uvnitř VIP	43
1.11	Stárnutí	46
2	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	50
2.1	Metodika práce.....	50
2.1.1	Výběr vhodných surovin pro výrobu jádrových izolanů a návrh optimálního složení.....	51
2.1.2	Výroba jádrových izolanů.....	52
2.1.3	Návrh metodiky výroby VIP.....	53
2.1.4	Výroba vakuových izolačních panelů.....	54
2.2	Praktická experimentální část – stanovení vlastností jádrových izolanů a vyrobených VIP	55
2.2.1	Stanovení tloušťky a délky vláken.....	55
2.2.2	Stanovení tloušťky izolanů	56
2.2.3	Stanovení rozměrů	56
2.2.4	Stanovení objemové hmotnosti.....	56
2.2.5	Stanovení plošné hmotnosti	57
2.2.6	Stanovení součinitele tepelné vodivosti.....	57
2.2.7	Stanovení vlhkosti porézních materiálů.....	58
2.2.8	Stanovení zrychleného stárnutí	59
2.3	Vyhodnocení měření	60
2.3.1	Stanovení tloušťky a délky vláken.....	60
2.3.2	Studium chování izolanů při sušení	61
2.3.3	Stanovení vlastností na jádrových izolantech.....	70
2.3.4	Stanovení vlastností na VIP	76
	ZÁVĚR	80
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	90
SEZNAM GRAFŮ	91
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	93
SEZNAM TABULEK	95

ÚVOD

Slova tepelná izolace už v mnoha časopisech či člancích nenajdeme jinde než ve spojení s energetikou. V dnešní době dochází k neustálému vývoji. Každý hledá řešení, jak bydlet za méně, nebo alespoň kde všude by mohl ušetřit. Proto mnoho lidí už nechce kdejaké domy, ale pouze nízkoenergetické či pasivní. K tomu se využívají izolace, které mají tloušťku i přes 30 cm. Vakuové izolační panely však mají mnohem menší tloušťku, a přitom dosahují o tolik menší součinitele tepelné vodivosti. Proto jsou velmi slibnými nástupci nových izolačních materiálů. Vakuové izolační panely se již ve velkém používají především v chladírenství. Ve stavebnictví našly uplatnění s jádrovým materiálem oxidu křemičitého či skleněných vláken. A právě jádrový izolant je dělá tak dražší oproti běžným izolacím. Nalezením nového jádrového materiálu, levnějšího, a nejlépe z druhotných surovin, by snížilo celkovou cenu vakuových izolačních panelů, čímž by se zvýšila i jejich poptávka.

Cílem diplomové práce bude zpracování detailní rešerše na téma vakuových izolací. V teoretické části se zaměříme především na jádrové izolanty, které jsou velmi důležitou částí. Zavedením nového jádrového izolantu nese mnoho zkoušek před jeho zabudováním do konstrukce. Proto je důležité o nich zmapovat veškeré dostupné informace a poznatky. Avšak jádrový izolant není jediný, co se musí prostudovat. Důležité parametry nesou také již vyrobené vakuové izolační panely a především jejich trvanlivost.

Při volbě jádrových izolantů se pokusíme o návrh druhotných surovin, abychom odlehčili životnímu prostředí. V praktické části poté navržené jádrové izolanty podrobíme měření. Hlavní roli hraje součinitel tepelné vodivosti především v závislosti na tlaku. Důležité jsou ale i okolní parametry jako tloušťka vláken či objemová hmotnost. Cílem bude najít vhodný jádrový izolant alespoň pro středně dobou trvanlivost.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Energetika používaná v budovách představuje významnou část celkových emisí uhlíku a národní spotřeby energie ve všech rozvinutých zemích. Použití tepelné izolace je jedním z klíčových opatření ke zlepšení energetické účinnosti zastavěného prostředí. Poptávka po vysoce výkonných izolačních prvcích budovy se v posledních letech výrazně zvýšila. Vakuový izolační panel (VIP) je považován za jeden z nejslibnějších a nejmodernějších řešení izolace budov. VIP se skládá z otevřeného, vysoce porézního jádrového materiálu a obalu z plynné bariéry. Na základě vytvoření vakua zapouzdřené desky tvořené jádrovými materiály vykazují vakuové izolační panely vynikající tepelnou izolaci (součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 2-8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$) ke snížení tepelných ztrát. Vakuový izolační panel dosáhne již při malé tloušťce (asi 20 mm) ekvivalentní tepelně izolační vlastnosti jako běžná minerální či skelná vlna nebo izolační deska z polymerové pěny tloušťky 120 nebo 185 mm. Má obrovský potenciál pomáhat dodržování přísných energetických standardů. Navíc použití VIP pro novostavbu nebo modernizaci staré budovy vede nejen k úspoře prostoru pro pohodlí bydlení, ale i k úsporám půdy. [1]

Zákon č. 225/2017 Sb. zákon o hospodaření energií se zabývá energetikou a průmyslem, hospodářstvím a hospodařením a ekonomikou. Předmětem jsou různé požadavky na spotřeby energie. Zákon vymezuje základní pojmy a energetické koncepce. Například Hlava III paragraf 5 odstavec 1 se zabývá úsporou energií a využitelností druhotných surovin a v odstavci 5 je rozepsáno konkrétně na co se dají využít dotace od státu. V paragrafu 7 pak zákon popisuje snižování energetické náročnosti budov. Dále se zabývá průkazy energetické náročnosti a energetickými štítky, energetickým auditem, ekodesignem. Také přestupky, kontrolami a inspekcemi.

1.1 Základní principy šíření tepla

1.1.1 Způsoby přenosu tepla

Teplu se může šířit několika způsoby:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- sáláním (radiací).

Přenos tepla vedením (kondukcí)

Nastává tehdy, pokud si částice látky, které spolu sousedí, vyměňují svou kinetickou energii. Podmínkou je existence spojitého látkového prostředí. Ve vakuu vedení tepla nenastane. Vedení tepla nastává v látkách všech skupenství. [24]

Přenos tepla prouděním (konvekcí)

Je způsobený pohybem tekutých látek, například pohybem vzduchu nebo vody. Proudící kapalina s sebou přenáší energii ve formě tepla. Teplá proudící kapalina teplo přináší (vytápění), chladná odebírá (ochlazování klimatizací). Podmínkou je existence látkového prostředí. Proudění tepla nastává často v kombinaci s vedením tepla. Zahříváme-li například kapalinu na plotýnce, částice kapaliny s nižší hustotou se přemísťují k hladině (přenos prouděním) a zároveň si částice srážkami předávají svou kinetickou energii (přenos vedením). Proudění látek může být volné nebo nucené podle toho, jaký je důvod pohybu částic.

- Volným prouděním vzniká pohyb v důsledku různých teplot v objemu kapaliny nebo plynu a tím různých hustot, které se vyrovnávají. Teplejší lehčí látka stoupá vzhůru a chladnější těžší látka klesá, přičemž se dostane na její místo. Tam se ohřeje a proces se může opakovat.
- Nucené proudění vznikne vnějšími silami (čerpadlem, ventilátorem). Užívá se především v technické praxi k zesílení přenosu tepla. Výhodou nuceného proudění je, že může nastat i proti teplotnímu spádu. Tedy lze prouděním i chladit. [24]

Přenos tepla zářením (sáláním, radiací)

Jako jediný nevyžaduje látkové prostředí. Teplu se přenáší elektromagnetickým zářením, i ve vakuu. Když je prostor mezi zářícím a ozařovaným tělesem vyplněn

látkou, její teplota může být libovolně nižší nebo vyšší než teplota těles, předávajících si teplo. Tak se dostává teplo ze Slunce na Zemi. Tímto způsobem jde vytápět pomocí infrazářičů, nebo tepelně zpracovávat potraviny. [24]

1.1.2 Základní veličiny přenosu tepla

Mezi základní veličiny patří tepelný tok a hustota tepelného toku při vedení tepla.

Tepelný tok Φ

Je definován jako diferenciální podíl tepla dQ , které projde nějakou plochou (průřezem) S za čas dt a tohoto času:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}] \quad (1)$$

Jednotka tepelného toku je shodný s jednotkou výkonu. Proto se někdy tepelný tok označuje jako tepelný výkon. [24]

Hustota tepelného toku při vedení tepla q

V případě přenosu tepla vedením můžeme hustotu tepelného toku pokládat za vektor, jehož směr se shoduje se směrem největšího teplotního spádu (rozdíl teplot), který určuje nejen směr vedení tepla, ale i jeho kvantitu. Směr vektoru je určen sdílením tepla, proto je kolmý k ploše. [24]

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

kde, $d\Phi$ je tepelný tok [W] a dS je elementární plocha [m^2].

1.1.3 Fourierův zákon vedení tepla

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

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (3)$$

kde, q je hustota tepelného toku [W/m^2], ∇T je gradient teploty [K/m] a konstanta úměrnosti λ je součinitel tepelné vodivosti, který vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo. Jeho jednotka je $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. [24]

1.2 Nové trendy a materiály v oblasti tepelné ochrany budov

V následující kapitole si představíme nejnovější trendy materiálů pro tepelnou ochranu budov.

Transparentní izolace

Jsou to materiály, které kombinují dvě základní vlastnosti požadované po zasklívacích prvcích v solární technice – dobrou propustnost slunečního záření a nízkou tepelnou ztrátu. Tím přispívají ke snížení potřeby tepelné energie v budovách. Jsou skleněné (amorfní oxid křemíku) nebo plastové. Plastové materiály mají nízkou měrnou hmotnost, jsou ale omezeny provozní teplotou do 140 °C. Sklo je levné, dostupné, odolné proti UV záření a má vynikající optické vlastnosti. [27]

Transparentní izolaci si můžeme představit jako velmi silný svazek tenkých trubiček, umístěných kolmo mezi dvě skla. Trubičky jsou velmi tenké, které propouští světlo. Izolační dílec o tloušťce 30 mm propustí až 50 % sluneční energie, respektive světla. V zimním období dopadající sluneční energie ohřívá stěnu domu, v noci díky izolaci stěna nevychladne. V letním období jsou instalovány vzduchové klapky, které brání přehřívání stěny. [28]

APM – pokročilé pórovité tepelně izolační materiály

Advanced porous materials, zkráceně APM, jsou v českém překladu pokročilé pórovité materiály, které mají pokročilou charakterizaci, strukturální vlastnosti a mnohonásobnou aplikaci nových mikro, mezo-, nano- a makroporézních materiálů. Obsahují informace o energetické a ekologické aplikaci pokročilých porézních materiálů, které se zabývají významnými environmentálními problémy v důsledku globálních klimatických změn. APM se zabývá materiálům včetně zeolitů, zeotypů, kovových organických rámců, vrstevnatých materiálů, porézních uhlíků, nitridů, kovů, polymerů, fosfidů, chalkogenidů, oxidů přechodných kovů, hydroxyapatitu, keramiky, skla, membrány a termoelektrickými materiály.

VIP – vakuové izolační panely

Vakuovými izolačními panely se zabývá tahle diplomová práce. Podrobněji si je představíme v následujících kapitolách.

1.3 Vakuové izolační panely (VIP) a jejich složení

Velmi zjednodušený princip izolace je ten, že vezmeme běžnou izolaci, zabalíme ji do vzduchotěsné obálky a odčerpáme z ní vzduch, který zaujímá většinu objemu. Ve skutečnosti je to mnohem obtížnější proces. [25]

Výhodami je nízký součinitel prostupu tepla, tepelně izolační vlastnosti nezávisající na tloušťce panelů a malá tloušťka materiálu. Nevýhodami je vysoká cena, nemožné dodatečné úpravy velikosti panelů přímo na stavbě, nesmí se poškodit při montáži a zhoršení tepelně izolačních vlastností s časem. [26]

Panel vakuové izolace se skládá z tuhého, vysoce porézního jádrového materiálu obaleného tenkou, plynotěsnou vnější obálkou, která je vakuována a utěsněna, aby se zabránilo vnikání vnějších plynů do panelu. [16]

1.3.1 Jádrový izolační materiál

Materiály jádra pro VIP vyžadují plně otevřenou porézní strukturu umožňující vakuaci a musí mít dostatečnou vysokou pevnost v tlaku, aby odolávaly mechanickému tlakovému zatížení. Základní materiály obsahují v podstatě tři struktury a to mikroporézní prášky, vlákna a pěny. Každá konstrukce má své vlastní mechanické vlastnosti. Minimální objemová hmotnost, která odolává zatížení atmosférickým tlakem, je charakteristická stejně jako hodnota středu panelu (COP – centre of panel) pro tepelnou vodivost, která závisí na pevném základu materiálu jádra. Materiál jádra by měl mít nejnižší možnou tepelnou vodivost, aby byl zajištěn nejlepší výkon VIP. Optimální materiály mají mikroporézní strukturu a jsou schopny absorbovat vlhkost, jinak musí být přidán getr. Nejběžnějším jádrovým materiálem je pyrogenní oxid křemičitý a skleněné vlákno. [16]

V současné době se používají:

- pěnové materiály (Polyuretanové pěny, pěnový polystyren)
- práškové materiály (pyrogenní oxid křemičitý, aerogely oxidu křemičitého, perlit)
- vláknité materiály (skleněná vlákna)

1.3.1.1 Pěnové materiály

Vyznačují se nízkou hustotou ($60-100 \text{ kg/m}^3$) a malou velikostí pórů ($30-250 \cdot 10^{-6} \text{ m}$). Kwon a kolektiv vypočítal hodnotu tepelné vodivosti polyuretanové pěny o velikosti

pórů 100 μm 0,0078 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ při 10^{-4} bar. Nicméně ji není možné udržet po dobu životnosti, která se ve stavebnictví očekává okolo 100let. Polyuretanová pěna má také vyšší požární toxicitu v důsledku uvolňování oxidu uhelnatého, kyanovodíku a dalších škodlivých emisí. Tepelná vodivost pěn může být snížena zmenšením velikostí pórů. V poslední době byla vyvinuta kaučuková směs polypropylenu a polyetylenů s nano/mikro buněčnou pěnou ($0,5\text{-}2\cdot 10^{-6}$ m) a je kandidátem na jádrový materiál pro VIP. [21]

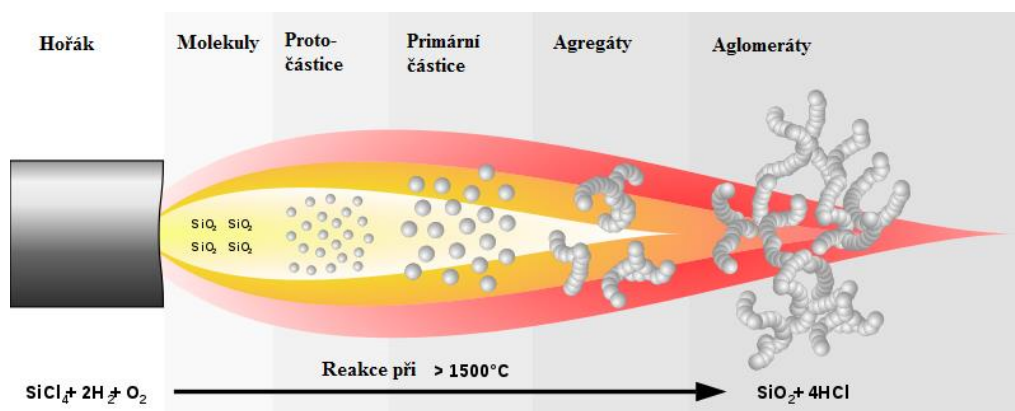
1.3.1.2 Práškové materiály

Pyrogenní oxid křemičitý se používá především kvůli jeho nízké hustotě ($150\text{-}200$ kg/m^3), vysokému specifickému povrchu ($5\text{-}60\cdot 10^{-2}$ m^2/kg) a nízké tepelné vodivosti ($0,004$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Jeho výrobu můžeme vidět na obr. 1. [21]

Křemenné aerogely jsou nanoporézní materiály s velikostí pórů cca 20 nm a objemovou hmotností $3\text{-}350$ kg/m^3 . Při těchto vlastnostech dosahují tepelné vodivosti $0,001\text{-}0,003$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Výhodou je, že jsou nereaktivní a nehořlavé. Nevýhodou je však vysoká cena. Aerogely se vyrábějí ve dvou stupních:

- Tvorbou vlhkého gelu kyselou kondenzací nebo sol-gelovým procesem
- Z kapalného gelu odpařením kapalně složky za nadkritické teploty a tlaku

Expandovaný perlit je méně účinný než pyrogenní oxid křemičitý, nebo ve formě aerogelu, především protože vyžaduje velmi nízký tlak (pod 0,1 mbar), aby dosáhl požadované tepelné vlastnosti. Proto se používá v kombinaci v různých poměrech s pyrogenním oxidem křemičitým. [21]



Obrázek 1: Úprava pyrogenního oxidu křemičitého v ohni [30]

1.3.1.3 Vlákenné materiály

Skleněná vlákna mají hustotu okolo 250 kg/m^3 a průměr vlákna $0,5-0,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ při 300 K. Mají vysokou tepelnou stabilitu ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$) a dosahují tepelné vodivosti od $0,0012 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ po $0,004 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. [21]

Zvažovány jsou také alternativy jako kompozit z dřevovláknitých vláken s pemzovým práškem, avšak prozatím nebyla zjištěna účinnost. [21]

1.3.2 Obálka

Nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje výběr obalových materiálů pro VIP, je nepropustnost plynů. Pokud jde o očekávanou životnost VIP, je také důležitá její nepropustnost pro vodní páru. Dále je také nutná nízká tepelná vodivost, aby se podél okrajů panelů zachoval co nejmenší účinek tepelného mostu. Vzhledem k mechanickému zatížení, ke kterému dochází během konstrukce, by obalové materiály měly mít také dostatečnou odolnost proti propíchnutí. Obalové materiály používané pro termosky, jmenovitě nerez, hliník a sklo, jsou také vhodné pro ploché izolační panely. V kombinaci s plnidly, jako jsou pěny a vlákna, jsou vhodné pouze materiály, které dosáhnou požadované vysoké nepropustnosti pro plyny, která je požadována pro trvanlivé výrobky. Obecně se používá polymer a kovový laminovaný film. Existují dva druhy bariérových materiálů:

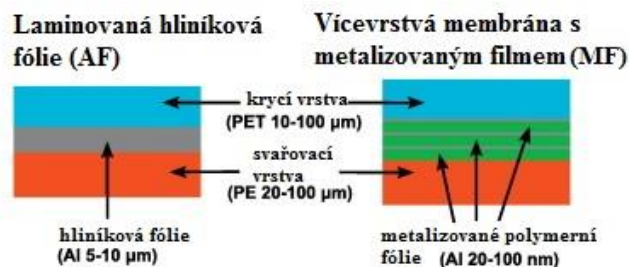
- Laminátová fólie s nepřetržitou kovovou fólií
- Metalizovaná laminovaná fólie

Většina výrobců používá hliníkově plastové lamináty s vysokou bariérou, hliníkové kompozitní fólie nebo fólie z nerezové oceli. [16] [23]

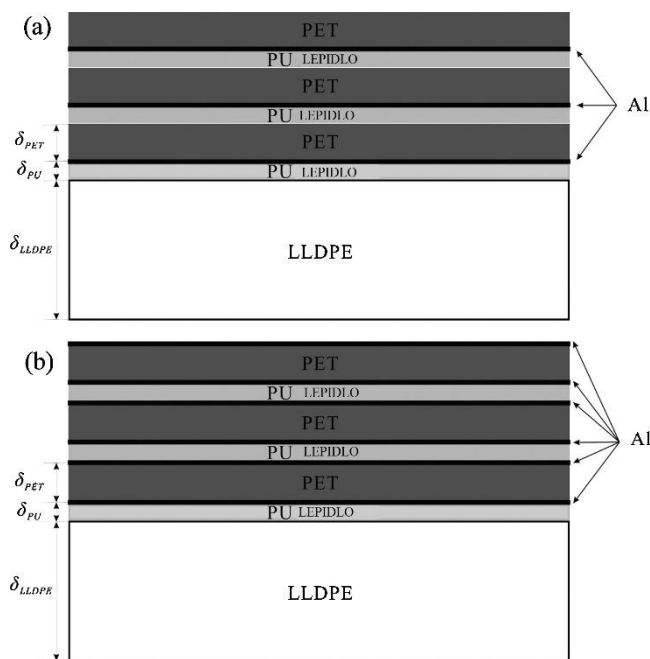
Struktury typických obálek jsou zobrazeny na obrázcích 2 až 5, kde vidíme různou skladbu obálek VIP:

FGC	Sklená tkanina (340 - 350 μm)
PU	Polyuretanové lepidlo (2 μm)
PET	Polyethylentereftalát (12 μm)
PU	Polyuretanové lepidlo (2 μm)
Al fóil	Hliníková fólie (7 μm)
PU	Polyuretanové lepidlo (2 μm)
PA	Polyamin (15 μm)
PU	Polyuretanové lepidlo (2 μm)
mLLDPE	Metalocenový lineární nízkohustotní polyethylen (80 μm)

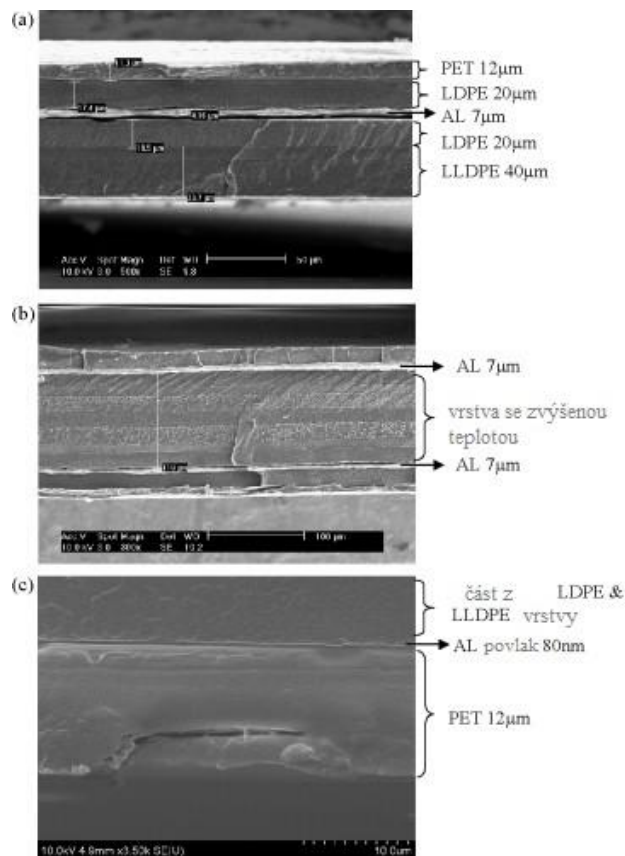
Obrázek 3: Struktura obálky VIP



Obrázek 2: Struktura obálky VIP



Obrázek 4: Struktura obálky VIP



Obrázek 5: Struktura obálky VIP

1.3.3 Getry a vysoušeče

Getry a vysoušedla jsou umístěny uvnitř jádra pro prodloužení životnosti VIP pomocí adsorpce vodních par (desikantů) a plynů (getrů), které se do něj můžou dostat po celou dobu životnosti buď pronikáním z vnějšího prostředí, uvolňováním plynu z jádrového materiálu nebo účinkem obojího. [21]

1.4 Přenos tepla v jádrových materiálech

Transport tepla do VIP probíhá vedením, prouděním a sáláním. Vedení závisí na struktuře a vlastnostech jádra. Proudění zbytkovými plyny závisí na tlaku plynu, které se časem zvyšuje infuzí atmosférických plynů a odplyněním vnitřního materiálu. Sálání závisí na struktuře a optických vlastnostech jádra. [3]

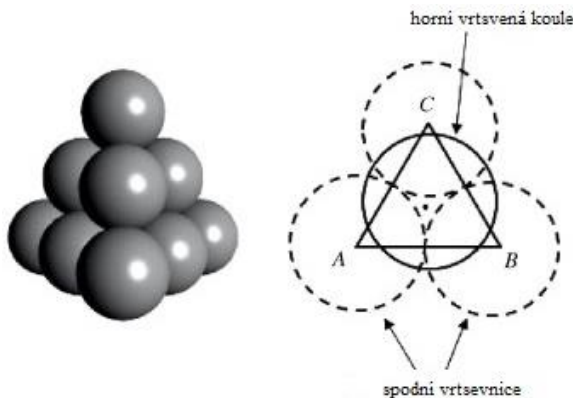
Celková efektivní vodivost λ_{eff} může být stanovena součtem vedení λ_s , proudění λ_g a sálání λ_r jako:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})] \quad (4)$$

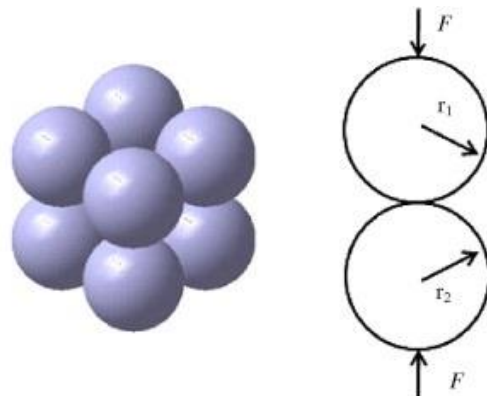
1.4.1 Vedení tuhou maticí

- Práškové izolace

Práškové materiály jsou často využívány jako výplňový materiál pro nízkoteplotní aplikace. Materiály, jako je perlit či oxid křemičitý, jsou upraveny na jemné granulované částice. Kvůli náhodnosti konstrukce vrstvy je obtížné zcela popsat efektivní pevnou vodivost. Proto se zkoumá při dvou případech, první se za typický model považuje jednoduché krychlové uspořádání balených kuliček (obr. 6) a jako druhý je analyzován šestiúhelníkový uzavřený model (obr. 7). [3]



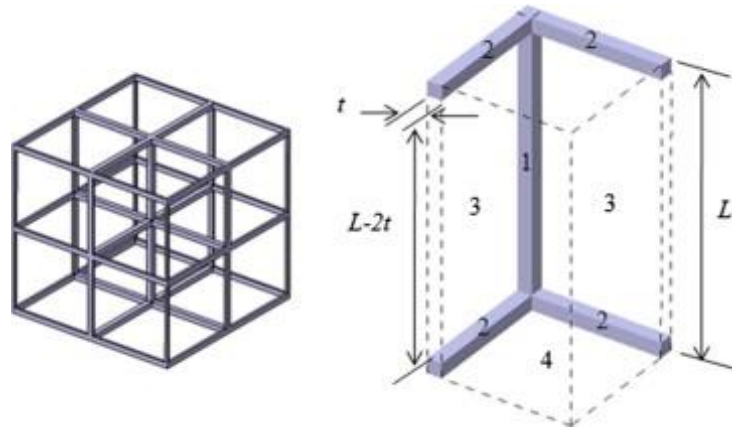
Obrázek 7: šestiúhelníkový uzavřený model [3]



Obrázek 6: jednoduchý kubický model [3]

- Pěnové izolace

Pěnové izolace jsou nejrozšířenějším materiálem vzhledem k nízké ceně a snadné výrobě. Obecně jsou klasifikovány uzavřenými a otevřenými buňkami. První z nich má stěny buněk, které uvnitř zachycují nízký tepelně vodivý plyn. Vedení tepla dochází přes vzpěry a buněčnou stěnu. Pěny s otevřenými buňkami, jako je tuhý polyuretan, se standardně používají jako jádrový materiál VIP díky snadnému vakuování. Vzhledem k tomu, že se zaměřujeme na VIP, pracujeme pouze s typem pěny s otevřenými buňkami. Máme znázorněn jednoduchý kubický model (obr. 8). [3]



Obrázek 8: Jednoduchý kubický model pěny s otevřenými buňkami [3]

Předpokládá se, že pěna je tuhá, takže nedochází k vybočení vzpěry v důsledku tlakové síly. Pokud je dráha proudění tepla rovnoběžná se svislou čarou elementárního článku, celkový tepelný odpor se skládá ze čtyř částí:

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

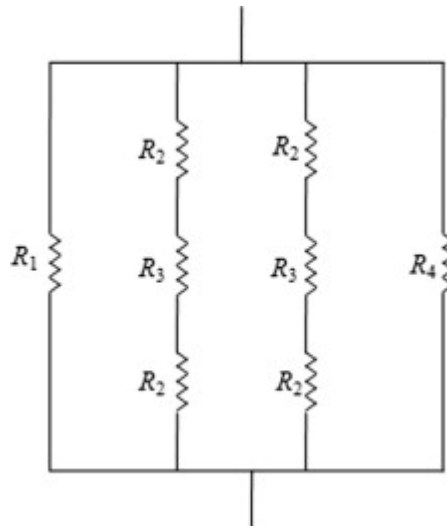
Tyto čtyři odpory a celkový odpor lze vyjádřit jako:

$$R_1 = \frac{L}{\lambda_{st} \cdot t^2}; R_2 = \frac{2}{\lambda_{st}(L-2t)}; R_3 = \frac{2}{\lambda_g \cdot t}; R_4 = \frac{4L}{\lambda_g(L-2t)^2}; R_{th} = \frac{4}{\lambda_{s,foam} \cdot L} \quad (5)$$

kde λ_{st} je pevná vodivost vzpěry [W/(m·K)], λ_g je tepelná vodivost plynu ve volném prostoru [W/(m·K)], L je délka buňky [m] a t je tloušťka vzpěry [m]. Znázorněn je na obr. 9. [3]

Takže efektivní tepelná vodivost může být odvozena jako:

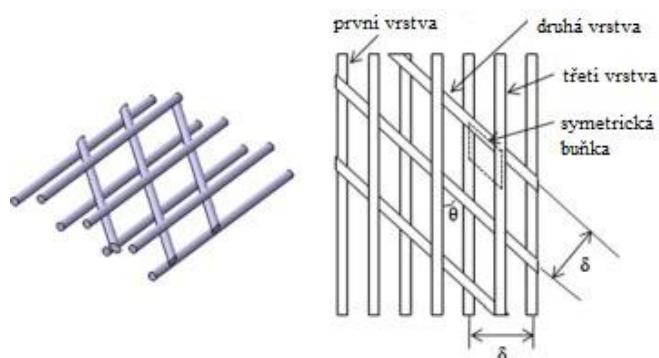
$$\lambda_{s,foam} = \frac{4\lambda_{st} \cdot t^2 + \lambda_g(L-2t)^2}{L^2} + \frac{4\lambda_{st} \cdot \lambda_g(L-2t)t}{2L \cdot \lambda_g \cdot t + L \cdot \lambda_{st}(L-2t)} \quad (6)$$



Obrázek 9: Síť tepelné odolnosti elementární buňky [3]

- Vlákenné izolace

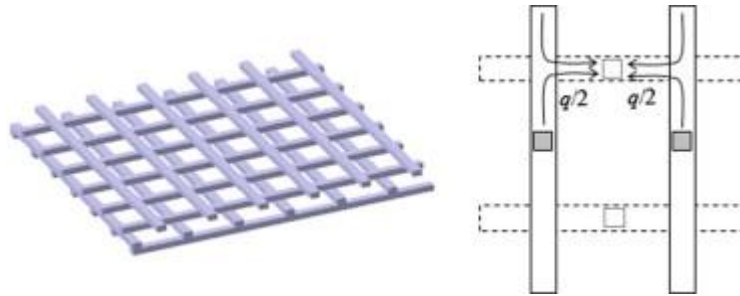
Vlákenné materiály jsou široce používány pro svou nízkou hmotnost a vysokou teplotní odolnost. Podle Frickeho je účinná vodivost závislá na řadě parametrů: pevné vodivosti vláken, Youngova modulu, pórovitosti, požadujícího tlaku a orientaci vláken. Vlákna jsou obvykle orientována náhodně, vzhledem k hlavnímu směru toku tepla. Na obr. 10 uvažujeme o stejně vzdálených rovnoběžných vláknech, umístěných kolmo k hlavnímu směru tepelného toku. Vlákna první a druhé vrstvy jsou nakloněna pod úhlem θ . Vlákna ve třetí vrstvě jsou ideálně umístěna v polovině rozteče vzhledem k první vrstvě, aby maximalizovala dráhu tepelného toku. [3]



Obrázek 10: Jednoduchý model vláknité izolace [3]

- Stupňovitá nosníková struktura

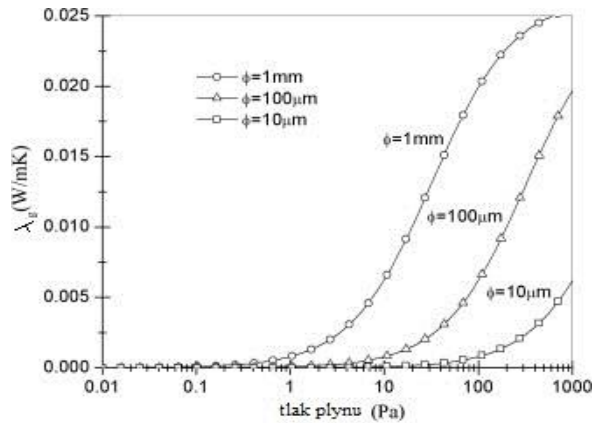
Plnicí materiály VIP musí odolávat stlačení vnějším atmosférickým tlakem s minimálním pevnou vodivostí. Aby se pevná vodivost snížila, měla by být dráha tepelné vodivosti nepřímo dlouhá. S ohledem na tyto požadavky je struktura navržena Kawaguchim a Nagaim (obr. 11). Paralelní paprsky, které mají v první vrstvě obdélníkový průřez, jsou umístěny do pravého úhlu k profilům druhé vrstvy. Třetí vrstva je v polovině první vrstvy. [3]



Obrázek 11: Rozložená struktura nosníku [3]

1.4.2 Vedení plynou maticí

Tepelný transport u VIP dochází v důsledku zbytkového plynu ve vnitřním prostoru. Tepelná vodivost plynu je nezávislá na tlaku, jelikož plynné vedení může být označeno jako kontinuum. Tento jev je výsledkem inverzního vztahu mezi tlakem a střední volnou cestou. Tepelné plynné vedení je však výrazně sníženo, pokud je střední volná dráha molekul plynu přibližně stejná nebo větší než vzdálenost, přes kterou je teplo transportováno. Plynné tepelné vodivosti s různou velikostí pórů jsou zaznačeny v grafu 1. Čím menší póry, tím méně citlivé jsou na zvyšující se tlak ve vakuu. V porovnání s většími póry. [3]

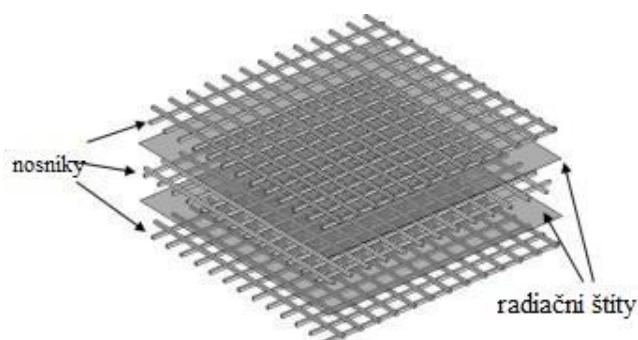


Graf 1: Plynná vodivost s různými velikostmi pórů jako funkce tlaku plynu [3]

1.4.3 Sálání

Radiace při nízkém tlaku je dalším důležitým mechanismem přenosu tepla pro VIP. Záření z horkého povrchu je zmírněno rozptylem absorpcí / emisí jádrové struktury. Pro popis přenosu tepla radiací v tepelně izolačních strukturách se považují dva přístupy. První je založen na rovnici radiálního přenosu (RTE – radiative transfer equation). Druhý je použitím aproximace difúze, což je nejčastěji používanou metodou. [3]

Slibným způsobem snižování přenosu záření je instalace reflexních povrchů do mezer, pracující jako štíty radiace. Výhodou střídavého paprsku je možnost instalace vícevrstvých radiálních štítů mezi nosníky, viz obr. 12. Především díky nízké emisivitě a nízké ceně se používá tenká hliníková fólie (6 nebo 7 mikrometrů). Tepelný odpor přes tenkou hliníkovou fólii ve středové části lze zanedbat, protože tloušťka fólie je mnohem menší než tloušťka VIP. Avšak vertikální směr vedení obálkou (zejména přes hliníkovou vrstvu) může být vážný problém, přestože není nijak ošetřen. [3]



Obrázek 12: Vícevrstvý střídavý paprsek s radiálními štíty [3]

Tabulka 1: Tepelná vodivost různých jádrových materiálů pro VIP [3]

Vlastnost	Práškový izolant	Pěnový izolant	Vláknitý izolant	Stupňovitý nosník
	Práškový oxid křemičitý	Polyuretanová pěna	Skleněné vlákno	Polykarbonát
Pórovitost	0,48	0,94	0,90	0,84
Objemová hmotnost [kg/m ³]	1140	70	250	190
Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]	1,38	0,26	1,30	0,20
Součinitel tepelné pevné vodivosti [W/(m·K)]	0,021	0,0050	0,0021	0,00090
Součinitel tepelné plynné vodivosti [W/(m·K)]	8,12	7,88	7,88	0,015
Součinitel tepelné vodivosti sáláním [W/(m·K)]	0,00020	0,0027	0,00070	0,033 (bez ochranných štítů)
				0,00030 (s ochrannými štíty)

Účinné pevné vedení je spojeno s porézností, čistým pevným vedením a mechanickými vlastnostmi. Plynné vedení při nízkém tlaku závisí na velikosti pórů a tlaku jádra. Radiační přenos v různých izolačních materiálech se získá pomocí aproximace difúze. Závisí to na specifickém koeficientu extinkce (součet koeficientu absorpce a koeficientu rozptylu daného prostředí), hustotě a teplotě jádra. [3]

1.5 Konvekce pórovým systémem

Tepelná vodivost v závislosti na tlaku plynu je vlastností, která je úzce spojena s otevřenou porézností a velikostí pórů porézní pevné látky. Teplený transport přes plynnou fázi se mění s tlakem plynu, když je velikost pórů v pořadí střední volné dráhy molekul plynu. Vzhledem k tomu, že se střední volná dráha mění s tlakem plynu, může být použita systémová změna tlaku pro zkoušení velikosti pórů otevřeného porézního systému. U tlaků pod 1 bar je transport plynu citlivý na póry 100 nm a více. [4]

Experimentálně byly zkoumány vzorky s ohledem na jejich tepelné vodivosti. Cílem bylo porovnat průměrnou velikost pórů stanovenou na základě závislosti tlaku na

teplných vodivostech pomocí rovnice pro materiály s různými typy morfologie a chemického složení. [4]

$$\lambda_{gas} = \frac{\lambda_{gas,0}\Phi}{(1+2\beta K_n)} = \frac{\lambda_{gas,0}\Phi}{(1+2\beta l_{gas}(p_0)p_0/pD)} = \frac{\lambda_{gas,0}\Phi}{(1+p_{1/2}/p)} \quad (7)$$

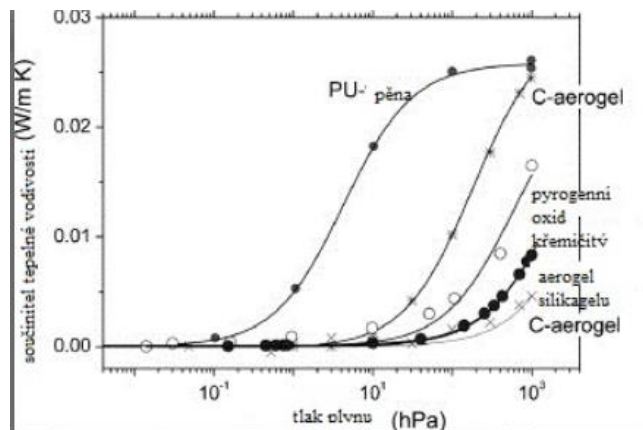
Kde, λ_{gas} je tepelná vodivost v plynné fázi [W/(m·K)], Φ je mezo a makro pórovitost, $p_{1/2}$ je tlak plynu na polovinu plné plynné vodivosti [Pa], p je tlak plynu [Pa].

Zkoumané vzorky:

- System pevných skleněných kuliček o průměru 1 mm,
- Otevřené porézní pěny o velikosti asi 60 μm ,
- Vzorek z granulí oxidu křemičitého s širokým a úzkým rozměrem a průměrnou velikostí pórů asi 30 nm,
- Pyrogenní prášek oxidu křemičitého ve směsi s několika objemovými procenty vláken a kalici přísadou (specifický povrch asi 300 m^2/g),
- Monolitický oxid křemičitý s průměrnou velikostí pórů 70 nm,
- Dva uhlíkové aerogely o průměrné velikosti pórů 1 μm a 100 nm. [4]

Tabulka 2: Hustota, porozita a průměrná velikost pórů odvozená analýzou závislosti tlaku na tepelnou vodivost [4]

Vzorek	Objemová hmotnost [g/cm^3]	Pórovitost [%]	Průměrná velikost pórů [nm]
Pyrogenní prášek oxidu křemičitého	0,162	93	300 \pm 50
Monolitický oxid křemičitý	0,087	96	100 \pm 10
1. uhlíkový aerogel	0,344	75	85 \pm 35
2. uhlíkový aerogel	0,305	78	1100 \pm 100
Úzké granule oxidu křemičitého	0,13	94	(2,3 \pm 0,4) $\cdot 10^6$
Široké granule oxidu křemičitého	-	-	(0,65 \pm 0,06) $\cdot 10^6$
Porézní pěna	0,056	96	(0,049 \pm 0,002) $\cdot 10^6$
Pevné skleněné kuličky	-	-	(4,95 \pm 0,62) $\cdot 10^6$



Graf 2: Tepelná vodivost jako funkce tlaku dusíku při RT pro různé otevřené porézní materiály [4]

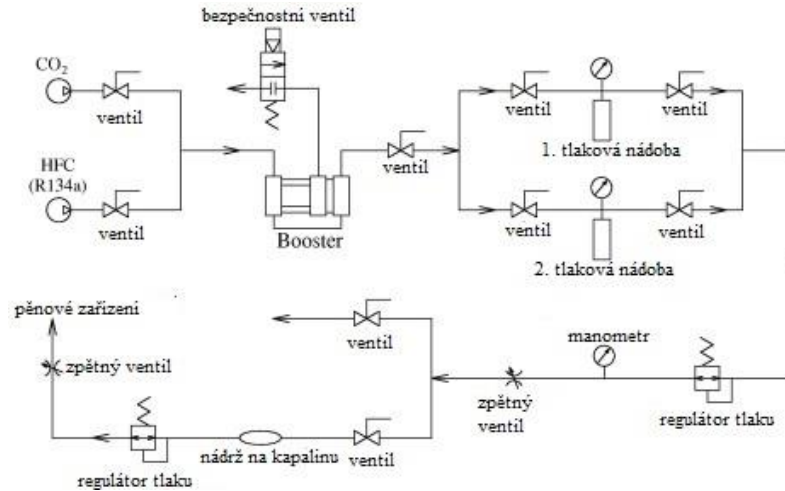
1.6 Účinky aditiv PE v PS-jádru VIP

Pórovité buňky musí být do značné míry otevřeny, to znamená, že jsou rozbité a spojené tak, že vytvářejí takovou síť, aby všechny plyny mohly být účinně vakuovány. Bylo zjištěno, že poměr zlomených buněk a velikost buněk jsou rozhodujícími faktory při snižování tepelného přenosu. V tomto experimentu jsou zkoumány možnosti zvýšení poměru zlomených buněk přidáním polyethylenu (PE) do polystyrenu (PS) při jeho výrobě. Polyetylen má vyšší teplotu tuhnutí a k vytvrzení dochází nad teplotou tání polystyrenu. Pevné částice PE působí na roztavený polystyren smykovými silami, aby jejich expanzí v pěnivém procesu zvýšili lámání uzavřených buněk. Pomocí aditiv PE je také zkoumána možnost modulace velikosti buněk. Malá velikost buněk znamená větší přenos pevných vodičů, zatímco velká velikost buněk zlepšuje přenos záření. [5]

V této studii bylo vyrobeno celkem 42 vzorků s různým obsahem PE – 0, 2 a 5% hmotnostně. [5]

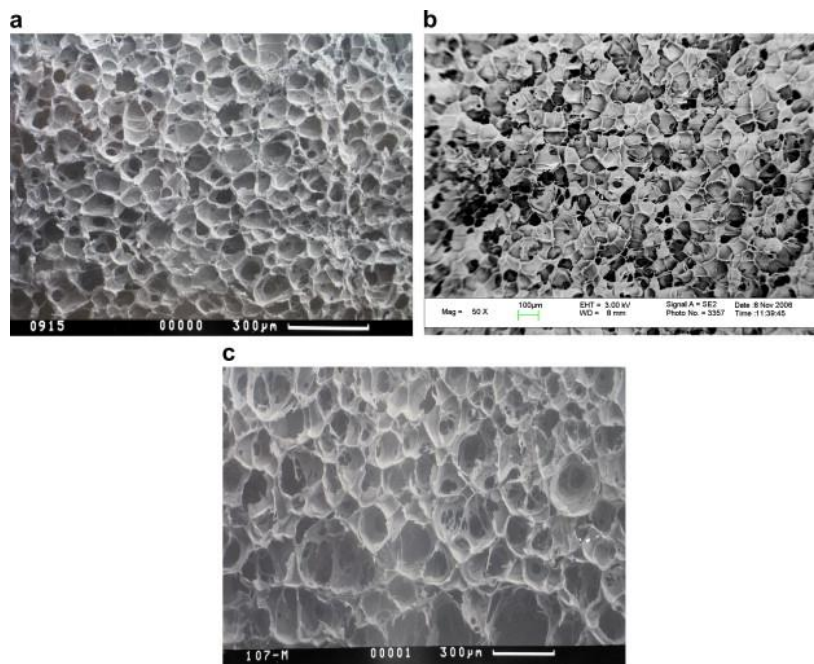
Vzorky byly připraveny směsí polystyrenu, polyethylenu, sazí a stearátu vápenatého. Směs byla vložena do dávkovacího lisu o průměru 400 mm a podrobena 40 tunovému lisu. Po smísení s roztavenou směsí se pění provádí zavedením CO₂ a R-134 do tvarovací formy, tím se vytvoří superkritická tekutina. Vysokotlaký plyn v lisovnici byl uvolněn po 6 hodinách, čímž vznikla hladká deska o tloušťce (250 x 250 x 6-26) mm. Po asi hodinovém zahřívání byl materiál uzavřen obalem z kovové fólie, který se utěsnil

po zavakuování na 4 až 10 torry. Během formovacího procesu byl tlak plynu v rozmezí 2500 – 3300 psi. Zesilovač tlakuje směsný plyn do dvou tlakových nádrží. Jedna nádrž nepřetržitě dodává nadkritickou tekutinu do zásobníku kapaliny regulátorem plynu. Druhá nádrž je rezervní. [5]



Obrázek 13: Schematický proces systému dvojího regulace tlaku pro modulaci tvarovacího tlaku [5]

Na obr. 14 jsou znázorněny typické snímky vzorků s 0, 2 a 5 % hmotnostně PE. Struktura se obvykle skládá ze vzpěrů, buněčných membrán, zlomených buněk a neporušených buněk. Průměrná velikost buněk byla vypočítána metodou ASTM D 3576-77 dle normy. Průměrná velikost buněk je 119 μm pro obr. 14a, velikost buněk 211 μm pro obr. 14b a velikost buněk 262 μm pro obr.14c. [5]



Obrázek 14: (a) vzorek PE0L4 pro jádrový materiál PS bez přísady PE (b) vzorek PE2L1 pro jádrový materiál PS s 2% PE přísadou. (c) vzorek PE5L3 pro PS jádrový materiál s 5% PE přísadou [5]

Vzorky měly označení: PE (přídavek PE) 0/2/5 (kolik procent přídavku) L/H (nižší (lower) /vyšší (higher) objem pevné frakce). Nižší objem pevné frakce je v rozmezí 0,0413-0,0494. Vyšší objem pevné frakce je v rozmezí 0,065-0,0706. U obou skupin frakce jsou hodnoty velmi nízké, což naznačuje dobrý pěnový proces. [5]

Z poznatků se zjistilo, že radiální přenos tepla, který se projevuje středním koeficientem extinkce, je ovlivněn převážně poměrem zlomených buněk. Účinky objemu pevné frakce jsou relativně nevýznamné. Vzorky PE2 mají menší velikost buněk a proto více zanikají než vzorky PE5. Přiměřené množství aditiv PE se ukázalo jako účinné při ladění struktury buněk a zlepšení výkonu VIP. Nejlepší obsah PE mezi třemi aditivními procenty byl 2% přídavek. Pevný objem by mohl ovlivnit koeficient absorpce při přenosu záření, což v této studii nejde prokázat, jelikož je objem pevné frakce příliš malý. Má však rozhodující vliv na pevné vedení, což je dominantní mechanismus při přenosu tepla u VIP. V této studii lze odvodit pravidlo: za prvé, objem pevné frakce musí být na nízké úrovni, aby se snížila pevná vodivost. Za druhé, poměr mezi buňkami a zlomenými buňkami musí být pečlivě kontrolován, aby se dosáhlo nízké celkové tepelné vodivosti. Vysoké množství zlomených buněk nemusí vést k nízké celkové tepelné vodivosti. Naopak může způsobit vysoký přenos záření. Na rozdíl od běžné pěny s uzavřenými buňkami, kde velikost malých buněk snižuje přenos tepla zachycených plynů, je nejlepší velikost buněk v praktickém využití VIP s vysokým poměrem zlomených buněk v rozmezí 100 až 300 μm . Nejmenší součinitel tepelné vodivosti byl 4,4 $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a byl jednou z nejlepších s porovnáním, co již bylo publikováno. [5]

1.7 Účinek sušení jádrového materiálu na tepelnou vodivost

Sušící charakteristiky VIP jádrových materiálů byly v tomto experimentu stanoveny za použití vyhřívaného okolního vzduchu při teplotách od 30 °C do 110 °C, 130 °C, 150 °C a 170 °C. Teploty byly udržovány po dobu 30 a 60 minut. Vlastnosti přenosu vlhkosti a tepla ve VIP byly analyzovány na základě modelu vícefázového média. Sušení při 150 °C po dobu 60 minut vykazovalo kompletní sušící charakteristiky a jejich VIP vykazovaly nízkou a stabilní tepelnou vodivost. Snížení teploty sušení nebo

snížení doby sušení může značně poškodit tepelnou izolaci. Přehřátí a delší doba ohřevu měly jen malý vliv na zkrácení doby úplného sušení, ale na vytvoření obrovské spotřeby energie. Aby se dosáhlo lepšího stavu sušení, póry uvnitř materiálu by měly být dobře rozloženy a velikost pórů by měla být jednotná. [6]

Odsávání vlhkosti z vnitřního materiálu jádra hraje důležitou roli při vzestupu vnitřního tlaku v dlouhodobém výhledu. Zvláště vlhkost uvnitř VIP může mít katalyzátorový vliv na tepelnou vodivost VIP, kromě tepelné vodivosti způsobené účinkem vodní páry v prostoru pórů. Proto je suchý stav jádrového materiálu primárním faktorem kvalitních VIP. Konvenční sušení horkým vzduchem je nejoblíbenější metodou odstraňování vlhkosti z mokrého vláknitého materiálu jádra. Nicméně vyžaduje relativně dlouhou dobu a vysoké teploty pro dosažení úplného vysušení. [6]

Pro experiment byly použity jádra, obalové materiály a getry od společnosti Suzhou V.I.P. New Material Co., Ltd. (Taicang, PR Čína) Vrstvy jádrového materiálu ze skelného vlákna o rozměrech 290x290x3 mm byly vyrobeny mokrým způsobem.

Mokrý proces zahrnuje následující kroky:

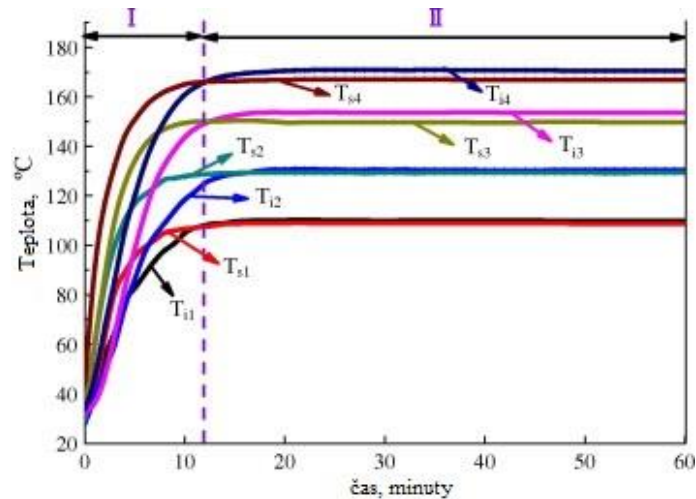
- a) poskytnutí suspenze skleněných vláken,
- b) odvodnění kaše za účelem vytvoření mokré rohože,
- c) sušení rohože,
- d) řezání rohože, aby se vytvořili vrstvy jádra ze skelného vlákna.

Jádrový materiál byl vytvořen ze čtyř kusů připravených vrstev ze skelného vlákna. [6]



Obrázek 15: Výrobní proces vrstev jádra ze skelného vlákna [6]

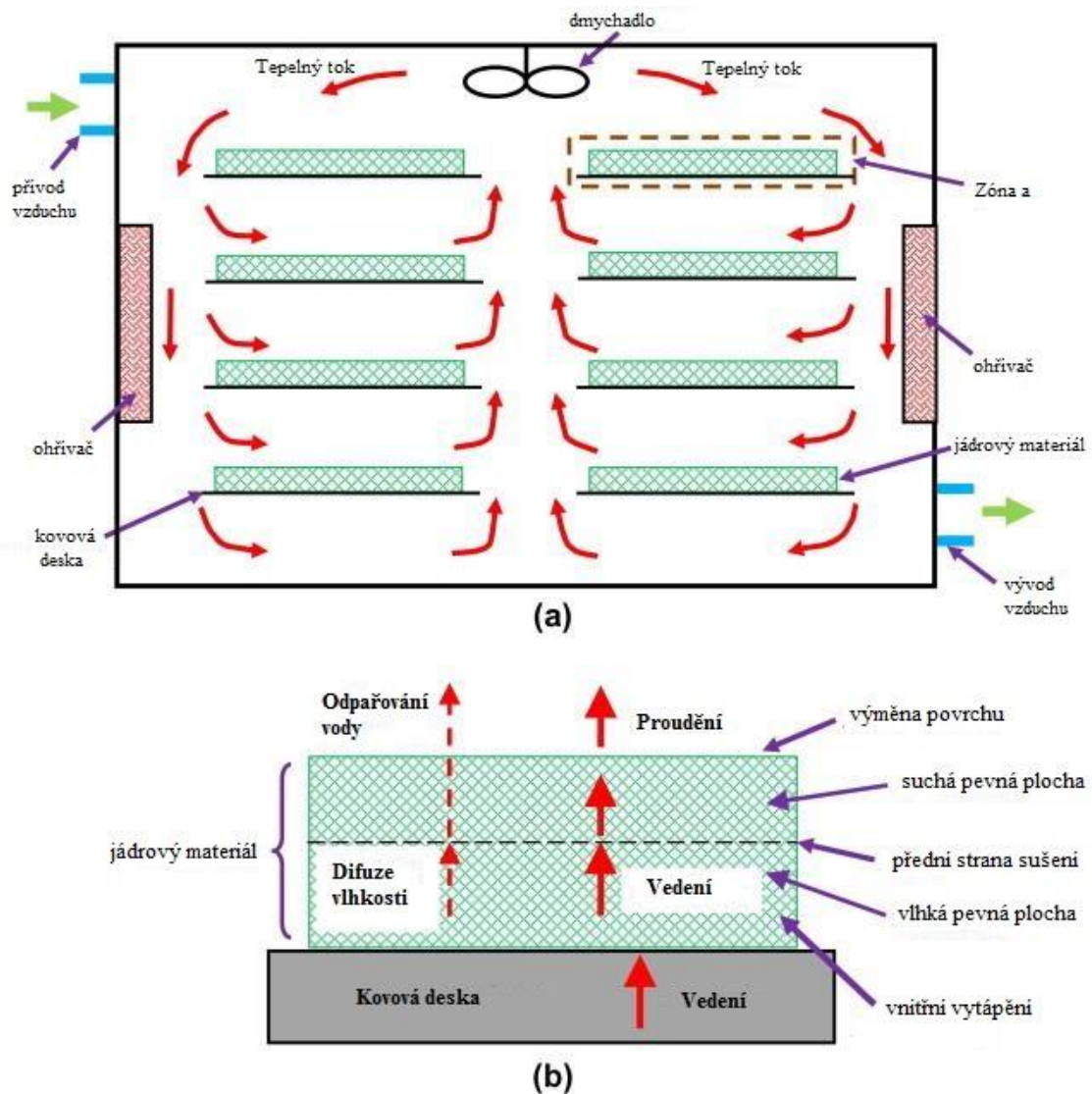
Vzorky byly sušeny při 110 °C po dobu 30 a 60 minut; 130 °C po dobu 30 a 60 minut; 150 °C po dobu 30, 60 a 90 minut; A 170 °C po dobu 30 a 60 minut. Tepelná vodivost byla vyhodnocena detektorem tepelné vodivosti EKO (HC – 120).



Graf 3: Ohřivací křivky vzorků materiálu VIP jádra při různých teplotách sušení (T_{i1} , T_{i2} , T_{i3} a T_{i4} , T_{s1} , T_{s2} , T_{s3} a T_{s4}) označují vnitřní teploty a povrchové teploty jádrového materiálu pro sušení při 110 °C, 130 °C, 150 °C a 170 °C [6]

Velké množství narušených skelných vláken mělo za následek dobrou pevnost v tahu vrstev jádra. Proto je mokrá metoda slibnou metodou pro výrobu jádrových materiálů VIP. [6]

Kinetika sušení porézního těla závisí na dvou různých skupinách parametrů. Jedna se týká podmínek sušení, druhá je samotný materiál. Obrázek 16 ukazuje obrys sušícího modelu. Kovové desky s otvory pro cirkulaci tepla byly umístěny v troubě. Dva procesy se vyskytly současně, a to přenos tepla z okolního prostředí a přenos vlhkosti uvnitř materiálu jádra. Horní plocha vzorku byla nepřetržitě vystavena vysokoteplotnímu vzduchu a byla ohřívána nuceným konvenčním teplem, zatímco spodní plocha byla vyhřívána oběma proudy a konvekcemi. Tepelný tok na povrchu se přenesl do hlubší části materiálu jádra. Suchá pevná oblast by však mohla omezit přenos vlhkosti z vnitřního materiálu. Společným prostorem může být přítomnost stále mokrého pevného prostoru uvnitř materiálu. Tudíž je nejvhodnější vnitřní režim ohřevu. [6]



Obrázek 16: (a) Přehled schématu sušení: a) schematické kreslení struktury trouby; (b) mechanismy přenosu tepla během konvekčního sušení [6]

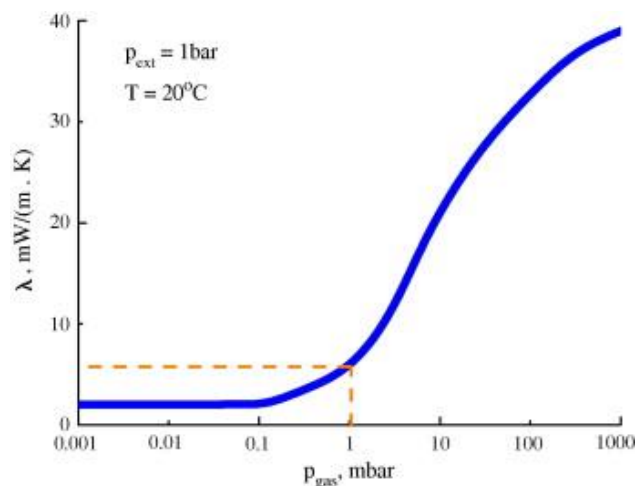
Pohyb vlhkosti uvnitř materiálu by mohl být zesílen vnitřním tlakem difuze vodní páry, protože se tlak vodní páry zvyšuje s teplotou. Ve skutečnosti převažují tři hlavní mechanismy vnitřního přenosu vlhkosti, tj. pohyb vázané vody, kapilární proudění volné vody a přenos vodní páry. Vázaná voda difunduje podél povrchu skelných vláken, zejména ve směru kolmém na rovinu rohože a do radiálního směru skelných vláken. Hlavní cestou pro přenos vodní páry jsou vzduchová místa mezi vlákny ve spojení s kapilárními vlastnostmi jádrového materiálu. Zpočátku se kapalná voda připojila k povrchu vláken, aby se mohla odpařit skrze jeden povrch dvojrozměrně nebo trojrozměrně a pak se stala diskontinuální a rozdělovala se do mnoha skupin. Odpařování vytvořilo gradient tlaku kapaliny mezi vlhkou a suchou plochou, což vyvolalo odtok tekoucí vody. [6]

Hmotností ztráta jádrového materiálu byla přibližně ekvivalentní odpařené vodě, která zůstala v jádrovém materiálu. [6]

Graf 4 ukazuje vztah mezi pórovitým tlakem jádrového materiálu a tepelnou vodivostí. Součinitel tepelné vodivosti skelných vláken zůstává stabilní na 2-3 mW/(m·K), pokud je tlak nižší než 0,1 mbar. Exponenciálně se zvyšuje, pokud je tlak pórů vyšší než 1 mbar. Pro skelná vlákna existuje prahový limit tlaku pórů, který je přibližně 1 mbar. Pokud je sušení neúplné, je v prostoru hodně vlhkosti, a proto dochází k některým přenosům tepla:

- tepelná vodivost vodní páry,
- tepelná vodivost absorbované vody a tekuté vody na povrchu vlákna,
- tepelný přenos teplem, kde se vlhkost odpařuje z teplé strany VIP a kondenzuje na chladné straně VIP. [6]

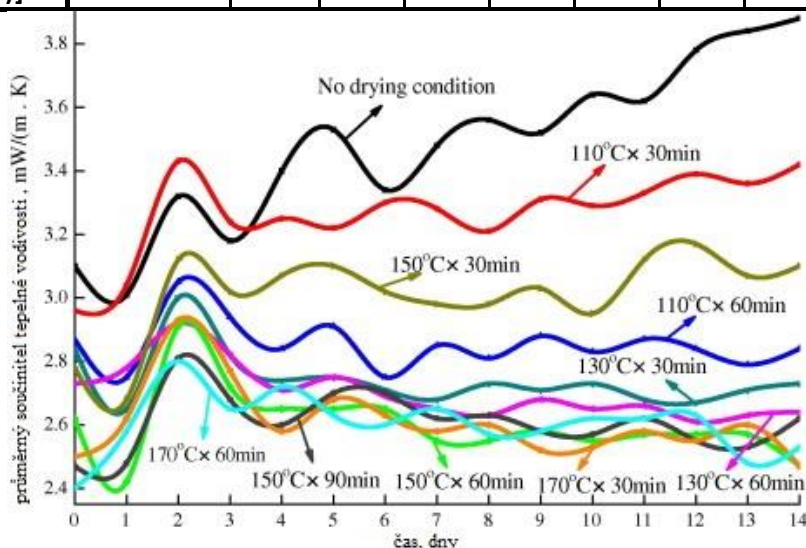
Vlhkost může v uzavřeném systému desorbovat na teplé straně a adsorbovat na chladné straně. Jelikož jádrový materiál ze skelného vlákna je otevřeně porézní může skelet fungovat jako knot a způsobit přemístění kapaliny zpět na teplou stranu jako tepelné trubky. Pak vlhkost uvnitř způsobí opakující se stacionární přenos tepla. Nakonec přeprava vodní páry, stejně jako odpařování a kondenzace neustále cirkulují během životnosti VIP, čímž přispívá ke zvýšení celkové tepelné vodivosti. [6]



Graf 4: Vztah mezi pórovým tlakem jádrového materiálu a tepelnou vodivostí vitálních skelných vláken [6]

Tabulka 3: Průměrná tepelná vodivost VIP s jádrovým materiálem při různých podmínkách sušení [6]

Teplota [°C]	žádná podmínka sušení	110	110	130	130	150	150	150	170	170
Doba [min]		30	60	30	60	30	60	90	30	60
Průměrná tepelná vodivost [mW/(m·K)]	3,1	2,96	2,87	2,84	2,73	2,78	2,62	2,47	2,5	2,4



Graf 5: Sledovací křivky průměrné tepelné vodivosti VIP s jádrovými materiály v různých podmínkách sušení [6]

1.8 Efektivní getr pro použití ve vysoko-vakuové izolační nádrži

Životnost vícevrstvé vakuové izolační nádrže závisí především na izolačním výkonu. Aby se tlak udržel na méně než 10^{-2} Pa jsou aplikovány adsorbenty pro udržení vakua. V komoře vysokoteplotního vícevrstvého izolačního tanku je obsažen velký podíl zbytkového H_2 a menší množství N_2 a O_2 , které jsou adsorbovány drahým getrem PdO. Proto byly zkoumány adsorpční charakteristiky nákladově efektivnějších směsí (CuO, CuO a 5A a CuO a C). Analyzovány byly měřením poklesu tlaku ve známém objemu jako funkce času. [7]

Pro pozoruhodné adsorpční výkony H_2 se používají neodpařitelné getry na bázi zirkonu v ultra vysokých vakuových systémech a v elektrických vakuových zařízeních. Tyto getry však nemohou být aplikovány do vícevrstvé izolační nádrži kvůli velkým

požadavkům na aktivační teplotu, která je obvykle okolo 300-500 °C. Navíc jejich sorpční výkon klesá spolu s aktivační teplotou. Na trhu dominují oxidy přechodných kovů jako je PdO a PdO & AgO, které však mají vysokou cenu a omezené adsorpční kapacity. [7]

Oxid měďnatý (CuO) byl použit jako katalyzátor při studii reakčních mechanismů, který zahrnuje H₂ jako reakční činidlo nebo produkt přes rentgenové difrakce (XRD), rentgenové fotoelektronové spektroskopie (XPS), transmisního elektronového mikroskopu (TEM) a termogravimetrické metody. H₂ může být účinně adsorbován nákladově efektivním getrem CuO & C. Uhlík hraje významnou roli u fyzisorpce H₂ a současně zvyšuje kontaktní dobu H₂ a CuO. Uhlík také do určité míry inhiboval sinter CuO v sorpčním procesu. H₂O z adsorpčních produktů a zbytkové plyny byly adsorbovány pomocí 5A umístěného ve spodní části vnější stěny ve vnitřní nádrži. Navíc CuO nemůže reagovat s C v pracovních teplotách. [7]

Experiment byl stanoven na vzorcích od společnosti Sinopharm Chemical Reagent Shanghai Co., Ltd., Shanghai TiHo Molecular Sieve Co., Ltd a Shanghai Xing Chang Activated Carbon Co., Ltd. CuO a má průměrnou velikost částic 200 μm a čistotu 99,9 %. Průměr 5A a velikost částic C jsou 3-5 mm a 0,8 mm (20 mesh). Experimentální plán je uveden v tabulce, kdy byly provedeny tři soubory pokusů. [7]

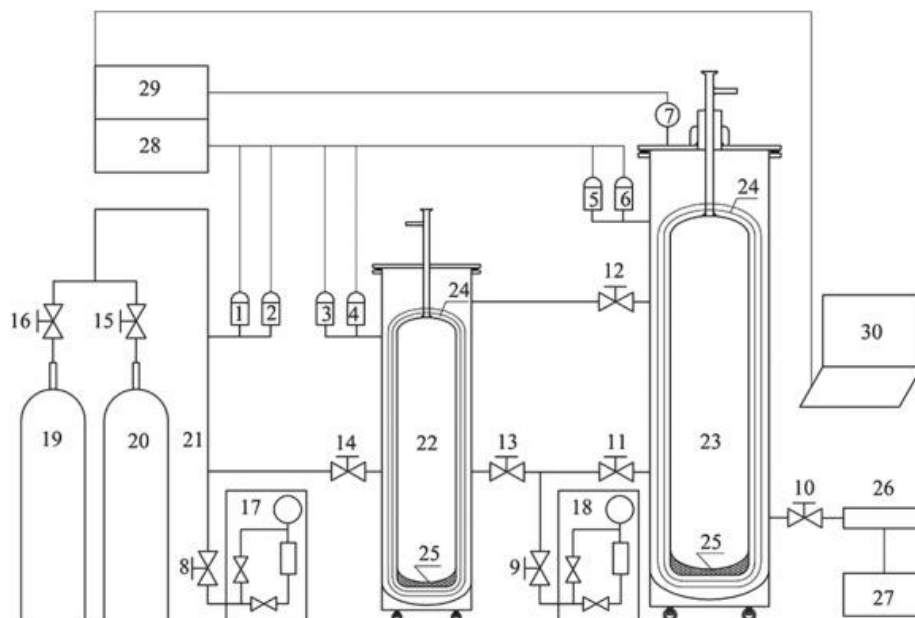
- a) Adsorpční vlastnosti CuO, CuO a 5A, a CuO a C byly získány při různých adsorpčních teplotách (AST: teplota adsorpce) a téhož počátečního H₂ tlaku (IHP: počáteční tlak vodíku) experiment 1, 2, a 3.
- b) H₂ byl adsorbován CuO a C při stejném AST a různém IHP v experimentu 4.
- c) Adsorpční produkty CuO a C byly analyzovány v experimentech 5 a 6.

Tabulka 4: Informace o pokusech [7]

Ozn.	Použitý getr	Adsorbent v komoře	Teplota getru [°C]	H ₂ tlak [Pa]
Experiment 1	CuO (5g)	1000 g 5A	60 – 260	50
Experiment 2	CuO & 5A (1g: 5g)	1000 g 5A	60 – 200	50
Experiment 3	CuO & C (1g: 5g)	1000 g 5A	60 - 160	50
Experiment 4	CuO & C (1g: 5g)	1000 g 5A	160	50, 500, 900
Experiment 5	CuO & C (1g: 5g)		25 - 160	2850
Experiment 6	CuO & C (1g: 5g)	1000 g 5A	100	2850

Experimentální uspořádání:

1. vakuový systém: Tlumičová nádrž, vyrovnávací nádrž a zkušební nádrž byly vakuovány vakuovými čerpadly,
2. systém měření a sběru: Pro měření tlaku vyrovnávacího potrubí, nárazníkové nádrže a zkušební nádrže byla použita vakuová měřidla ZDF-5227 vybavené odporovými a ionizačními měřidly. Teplota byla měřena termočlánkem Omega typu T, který se rozšířil do komory přes leteckou zátku a byl shromážděn pomocí Keithley2700. Údaje o tlaku a teplotě byly zaznamenány pomocí počítače,
3. systém dodávek vzduchu: Tanky He a H₂ dodávaly pro experimenty vysoce čisté plyny,
4. systém nádrže: Objemy getrového kontejneru, vyrovnávacího potrubí a vyrovnávací nádrže byly 0,12, 1,28 a 48,63 l. Objem komory byl 49,69 l se zbytkovým objemem 42,94 L (objem komory minus objem 5A a vícevrstvé izolační materiály). Skutečný zkušební objem činil 43,06 litru (zbytkový objem plus objem nádoby s getrem). Všechny objemy byly přesně kalibrovány inertním plynným He. [7]



Obrázek 17: Experimentální zařízení [7]

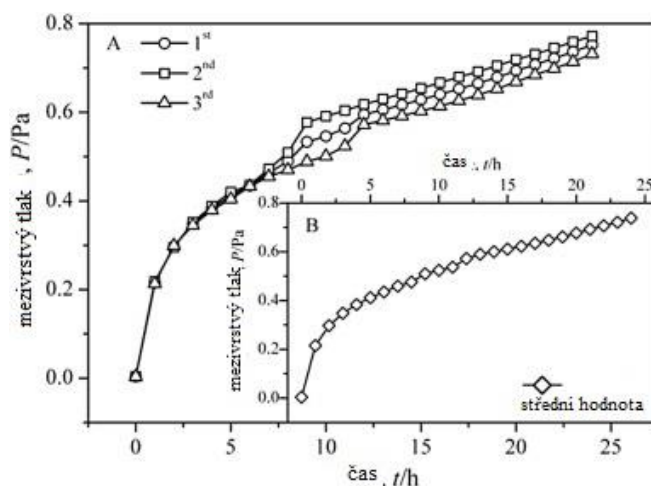
- 1, 3, 5. Odporové měřky. 2, 4, 6. Ionizační měřidla. 7. Zásuvka pro letectví. 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16. Vysokotlaké klapky. 17, 18. Vakuová čerpadla. 19. Nádrž. 20. H₂ nádrž. 21. Pojistná trubka. 22. Rezervní nádrž. 23. Zkušební nádrž. 24. Vícevrstvý izolační materiál. 25. Molekulární síto 5A. 26. Kontejner Getter. 27. Regulátor teploty Getter. 28. Vakuový měřič. 29. Nástroj pro získávání dat. 30. Počítač.

Rychlost úniku plynu a odvádění je důležitým parametrem pro vyhodnocení výkonu, měří se na základě statické metody natlakování a lze jej vypočítat dle vzorce:

$$lor = \frac{\Delta P \cdot V}{\Delta t} \quad (8)$$

kde lor je rychlost úniku a odplynění [$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$]; ΔP je změna mezivrstvého tlaku během Δt [Pa]; V je objem mezivrstvy [m^3]; Δt je časový interval [s]. [7]

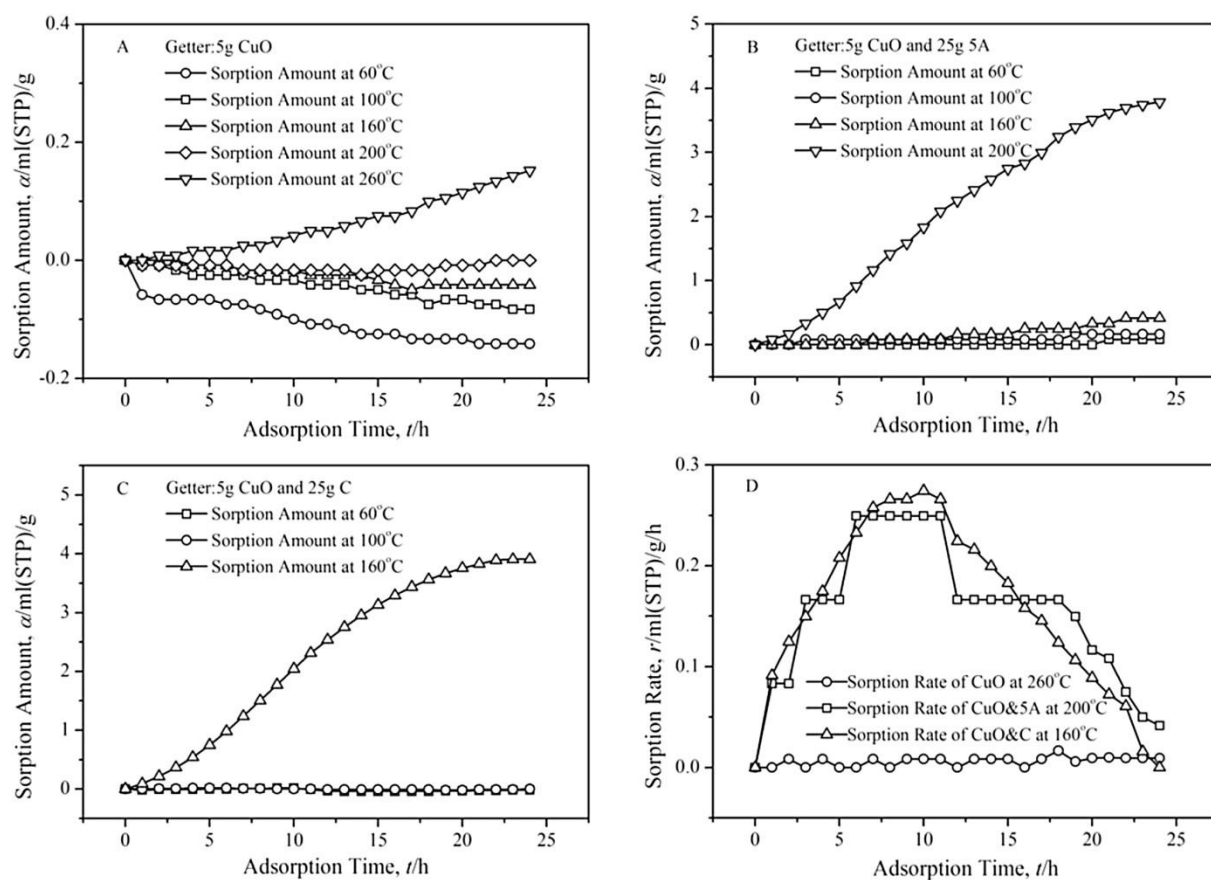
Mezivrstvý tlak vykazoval růst logaritmu a pak mírný lineární růst s časem (graf 6). Aby byla zajištěna přesnost experimentálního datového bodu, experiment s netěsností a odplyněním se opakoval třikrát (graf 6A) a střední hodnota byla ukázána v grafu 6B. Maximální a minimální změny mezivrstvého tlaku jsou křivky 2 a 3, které jsou resp. $7,68 \cdot 10^{-1}$ a $7,08 \cdot 10^{-1}$ Pa během 24 hodin. Průměrná odchylka a průměrná rychlost úniku a odvádění jsou $7.35 \cdot 10^{-1}$ Pa a $3.65 \cdot 10^{-7}$ $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. [7]



Graf 6: Změna mezivrstvého tlaku ve zkušební nádrži [7]

V experimentálních křivkách znázorněných v grafu 6 se snižuje podtlak v důsledku úniku a odplynění. V grafu 7A adsorpční množství CuO klesá na záporné hodnoty při $60\text{ }^\circ\text{C}$, $100\text{ }^\circ\text{C}$ a $160\text{ }^\circ\text{C}$, protože pokles tlaku v důsledku adsorpce getrem je kompenzován zvýšením tlaku vlivem tepla uvolněného při adsorpčním procesu. CuO začíná pomalu reagovat s H_2 při $200\text{ }^\circ\text{C}$ a pak rychle při $260\text{ }^\circ\text{C}$. Adsorpční množství je $0,152\text{ ml (stp) / g (stp)}$ ($T = 273,15\text{ K}$, $P = 101325\text{ Pa}$) při teplotě $260\text{ }^\circ\text{C}$, což odpovídá $3,66\%$ původní H_2 množství. Graf 7B je vybrán z důvodu jedinečných adsorpčních vlastností a schopnosti zachycovat molekuly plynu. Adsorpční množství se mírně zvýší

na 0,083, 0,16 a 0,41 ml (stp) / g při 60 °C, 100 °C a 160 °C; tyto částky představují 1,96%, 3,85% a 9,86% počátečních H₂ množství, v daném pořadí. CuO a 5A začíná adsorbovat H₂ významně s množstvím adsorpce 3,78 ml (stp) / g při 200 °C, což odpovídá 90.96% původní H₂ množství. Graf 7C je vybrán z důvodu pozoruhodných adsorpčních charakteristik a katalýzy. Adsorpční množství bylo zanedbatelné při 60 °C a 100 °C, ale dramaticky se zvýšilo při 160 °C. Množství adsorpce je 3,90 ml (STP) / g při 160 °C, což je 94,37% počátečního H₂ množství. Rychlost adsorpce CuO při 260 °C, CuO a 5A při 200 °C a CuO & C při 160° C se změnila na stejném IHP po dobu 24 hodin (graf 7D). Rychlost adsorpce CuO, CuO & 5A a CuO & C dosáhla vrcholu 0,0832 ml (stp) / g / h při 18 h, 0,25 ml (stp) / g / h při 6 hodinách a 0,274 ml (stp) g / h po 10 hodinách. CuO & C je vhodný pro adsorpci H v HVMIT. Ve skutečnosti, jak je uvedeno v tabulce, CuO a C mohou být použity při nižší teplotě, mají větší sorpční kapacitu a větší sorpční rychlost. C hraje významnou roli ve fyzikální adsorpci H₂, zvýšením doby kontaktu H₂ a CuO a inhibicí aglomerát CuO v adsorpčním procesu. Kvůli slibným výkonům byly dále hodnoceny adsorpční výkony systému CuO & C, díky vyšší rychlosti sorpce a nižší provozní teplotě. [7]



Graf 7: Adsorpční vlastnosti CuO, CuO a 5A a CuO a C u různých AST a stejné IHP 50 Pa[7]

Tabulka 5: Výkony různých getrů [7]

Getr	Teplota [°C]	Poměr sorpce [%]	Max. rychlost [ml/g/h]	Čas [h]
CuO	260	3,66	0,0832	18
CuO & 5A	200	90,96	0,2500	6
CuO & C	160	94,36	0,2740	10

1.9 Možné druhy jader

Co se týče požadavků, anorganické porézní materiály jsou vhodnější ve srovnání s těmi organickými, zejména díky aplikaci při vysokých teplotách a menší míře odplynění.

1.9.1 Organické polymerní pěny

Organické pěny vyrobené z různých polymerů (polyuretan, polystyren, polyetylen, polykarbonát atd.) jsou velmi atraktivní pro využití jako jádrový materiál pro vakuové izolace. A to hlavně díky jejich součiniteli tepelné vodivosti $6 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ při hustotě již $50 \text{ kg}/\text{m}^3$. Jejich využití bylo zahájeno již před několika lety. Ale vzhledem k nepřijatelné krátké životnosti byly zrušeny. [2]

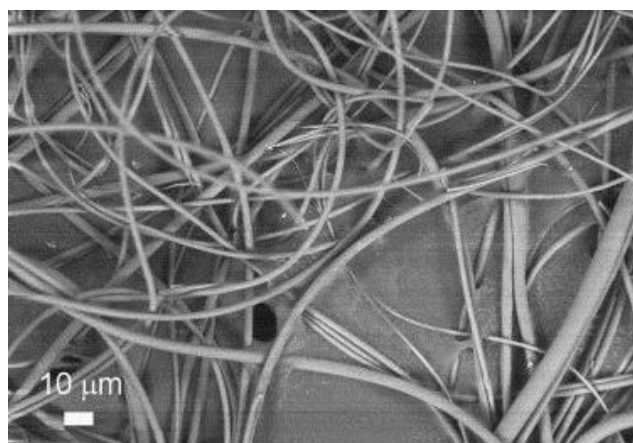
1.9.2 Vlákná z melamin-formaldehydové pryskyřice

V rámci provedených vědeckých experimentů [2] byla zkoumána vlákna s průměrem 5 mikrometrů a ze kterých byl vytvořen jádrový izolant s objemovou hmotností 200 až $270 \text{ kg}/\text{m}^3$. U této izolace bylo dosaženo na vakua tepelné vodivosti $2,3 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. [2]

Pro přípravu melamin-formaldehydových mikrovláken se používá tavitelný prepolymer. Pevný prepolymer je roztaven při teplotě $120 \text{ }^\circ\text{C}$ a vytlačovacím zařízením se přivádí do dávkovacích čerpadel. Dávkovací čerpadla dopravují roztavenou hmotu do matic a protlačí přes otvory. Zde je roztavený prepolymer tvarován tak, aby se na roztavená mikrovlákná působilo horkým vzduchem s vysokou rychlostí. Preferovaný průměr vláken ($\leq 5 \text{ }\mu\text{m}$) lze nastavit změnou průtoku prepolymeru, teplotou a rychlostí vzduchu. Na kontinuální dopravní pás jsou mikrovlákná shromažďována jako netkaná rouna. Hustota plochy závisí na rychlosti pásu a na propustnosti polymeru. [2]

Pro vytvrzení materiálu na rouno působí silně kyselé látky, které iniciují trojrozměrné zesítnění. V závěrečném kroku se rouno vytvrdí v peci pásového dopravníku při teplotách do $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro snížení rychlosti odplynění se poté zahřívá na teplotu $260 \text{ }^\circ\text{C}$.

Vlákna s nastavenými parametry tak, aby průměrná velikost byla nižší než 5 mikrometrů byla shromážděna na kontinuálním dopravním pásu v náhodném pořadí, a tak se vytvořila špagetovitá orientace vláken, jak vidíme na obr. 18. [2]



Obrázek 18: Obrázek syntetizovaných MF vláken [2]

Odplynění se měřilo experimentálně na vzorcích. Ty jsou přes noc sušeny vzduchem při teplotě 150 °C a následně slisovány do kompaktní tkaniny. Dále byly namontovány a svařeny do nerezové oceli o dvou rozměrech. Typ A má rozměry (175 x 175 x 10) mm a typ B (200 x 200 x 24) mm. Menší typ A byl zvolen na začátku vzhledem k nedostatkům množství a byl stlačen na tloušťku 24 až 10 mm. Díky tomu si zachoval stálou pružnost. Dle stlačení máme vzorky 1 až 5. [2]

Tabulka 6: Hodnocené vzorky

Označení vzorku	Typ vzorku	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Specifické odplynění [$\cdot 10^{-9}$ mbar/s]	Úprava vzorku
1	B	150	*	stlačení tloušťky z 24 mm na 12 mm
2	B	205	*	stlačení tloušťky z 24 mm na 18 mm
3	A	250	2,1	tloušťka 10 mm
4	A	270	3,9	tloušťka 10 mm
5	B	280	5,3	vložen do pece při 120 °C po dobu 2,5 hodin, ochlazení na pokojovou teplotu

Obálka byla namontována na celokovovém systému měděnou trubicí. Zaveden byl ohřívací cyklus 10 hodin při teplotě 190 °C ve vakuu, s cílem zbavit se adsorbované vody. [2]

Rychlost odplynění se sledovala pomocí spřádacího rotoru (SRG) připojeného k obalu z nerezové oceli. Změny tlaku a rychlosti jsou dostatečně malé, aby mohly být při měření zanedbány. [2]

Závěrem je připuštěno, že by se MF vlákna mohli stát novým jádrovým materiálem v aplikaci VIP, protože jejich vlastnosti odpovídají anorganickým vláknům, přestože ještě nebyly optimalizovány. [2]

Je to především jejich nízkou hodnotou tepelné vodivosti ($\lambda = 2,3 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$), která je řádově stejná jako u anorganických vláken. Je to poněkud překvapující, ale zároveň dobře vysvětlitelné. MF vlákna mají horší mechanické vlastnosti než sklo, ale mnohem nižší tepelnou vodivost pevné látky. Vliv mechanických parametrů na tepelnou vodivost je méně výrazný ve srovnání s pevnou tepelnou vodivostí. Část náhodně orientovaných vláken může vyčnívat mezi jednotlivými vrstvami, zkrátit cesty proudění tepla a tím zvýšit pevnou tepelnou vodivost. MF vlákna jsou relativně tuhá, do budoucnosti se uvažuje o MF rounech s optimalizovanou orientací, která by mohla zvýšit poréznost a snížit pevnou tepelnou vodivost. [2]

Další optimalizace by měly být zaměřeny na snížení průměru vlákna. Předpokládá se, že se životnosti dosáhne jednodušeji díky výsledné menší průměrné velikosti pórů stlačeného stohu. [2]

1.9.3 Polyester

Dnes je více než 70-75 % polyesteru vyrobeno procesem CP (kontinuální polymerace) za použití PTA (čisté kyseliny teraftalové) a MEG (monoethylenglykol). [8]

Polyesterové vlákna jsou obecně k dispozici ve dvou odrůdách – PET (polyethylentereftalát) a PCDT (poly-1,4-cyklohexylen-dimethylentereftalát). PET je nejběžnější výrobou. Je silnější než PCDT, zatímco PCDT má větší pružnost a odolnost. PET může být použit samostatně nebo v kombinaci s jinými látkami, aby nedošlo k vráskám a odolával oděru, pro zachování svého tvaru. PCDT je vhodnější pro těžší

aplikace, jako jsou závěsy a povlaky na nábytek. Pro získání specifických vlastností je možné v každé z těchto odrůd zavést úpravy. [9]

Polyesterové panenské vlákno je klasickou standardní kvalitou firmy Cetex-Rheinfaser. Zde je vlákno vyrobeno z původních polyesterových surovin PTA a MEG, na rozdíl od regenerovaného vlákna, kde se surovina skládá z použitých PET lahví a jiného PET odpadu. Díky technickým parametrům lze specifičtěji stanovit a sledovat technické parametry. Kromě toho má vlákno dobrou bělost a může být snadno barveno. [10]

1.9.4 Akrylová vlákna

Akrylové vlákno je syntetické vlákno, které se velmi podobá vlně. Podle definice ISO (Mezinárodní organizace pro normalizaci) a BISFA (Mezinárodní kancelář pro normalizaci syntetických vláken) se vlákna, která obsahují minimálně 85 % akrylonitrilu ve své chemické struktuře, nazývají "Akrylová vlákna". [12]

Hlavní složkou je tedy akrylonitril, kdy jeho polymerací dostáváme rohovitou hmotu. Z polyakrylonitrilu se zpracovávají vlákna s výbornými vlastnostmi. Velmi dobře odolávají ohýbání, mikroorganismům, vlivu povětrnosti a snášejí dobře teplotu až 120 °C. [13]

Vlákna měknou podle typu při 235 až 330°C. Předčí všechny ostatní druhy syntetických vláken stálostí na světle a odolností proti povětrnosti. Jsou odolné proti zvýšeným teplotám a také proti opakovanému ohybu. Jsou pevná a nemačkají se. Jsou málo navlhavá a mají dobrou chemickou odolnost. [13]

1.9.5 Bavlna

Bavlna je jedna z největších světových zemědělských plodin, je bohatá a ekonomicky vyráběná, tudíž výrobky z bavlny jsou poměrně levné. Vlákna mohou být vyrobena z vysoké škály tkanin, které mohou být extrémně odolné. [11]

Bavlněné vlákno lze rozdělit zhruba do tří velkých skupin na základě délky a vzhledu. První skupina obsahuje jemná, lesklá vlákna s délkou v rozmezí od 2,5 do 6,5 cm a zahrnují ty nejkvalitnější typy. Druhá skupina obsahuje standardní střední buničinu s délkou od 1,3 do 3,3 cm. Třetí skupina zahrnuje krátké husté bavlny o délce od 1,0 do 2,5 cm, které se využívají k výrobě kobereců a přikrývek, hrubé a levné tkaniny a mísí se s jinými vlákny. [11]

Většina bavlníkový semen se od vláken oddělí mechanickým procesem, zvaným vyzrňování. Zrnková bavlna je dodávána v balících do textilního mlýna pro výrobu příze. Tradiční a stále běžná metoda zpracování, je kroužkové odstředění, kterým je bavlna vystavena otírání, čištění, vychystávání, mykání, česání, tažení, rovingu a zvlákňování. [11]

1.10 Metody měření tlaku plynu uvnitř VIP

V každodenním podnikání je každý výrobce VIP konfrontován zákazníky stejnými otázkami o velikosti panelu, očekávání životnosti, ceny apod., ale také o tom, jak mohou určit kvalitu VIP. Ve skutečnosti je k dispozici pouze jedna jednoduchá, srozumitelná a všude dostupná metoda, což je vizuální a haptická kontrola panelu. Je snadné naučit každého zákazníka, že povrch neúspěšného panelu není pokrčený ale rovinný, že neuspěchaný panel není nijak pevný, ale měkký. Toto vše, dává zákazníkovi informaci, jaký panel mu byl dodán. [29]

Ostatní metody, jako měřicí přístroje nebo snímače, jsou velmi často nedostupné a poskytují informaci o jediném kritériu, jako je tepelná vodivost nebo vnitřní tlak. Nicméně pro přesné informace o aktuální kvalitě a výkonnosti panelu je třeba zkontrolovat více kritérií. Všechny metody však předpokládají, že v případě, kdy nebude překročena prahová hodnota, bude VIP řádně pracovat.

Jelikož ve stavebnictví jsou nároky na kvalitu velice náročné, jsou kritéria pro určení kvality následující:

- Suroviny (pórovitost, povrch, množství otevřených pórů),
- Vlhkost surovin,
- Vlhkost ve výrobních a skladovacích zařízeních,
- Bariérové vlastnosti,
- Kvalita těsnění,
- Úroveň vakua,
- Hustota jádra. [29]

Obecně existuje několik principů měření tlaku uvnitř VIP:

- **Lze měřit tlak uvnitř panelu přímo** – popřípadě veličinu závislou na tlaku (např. tepelnou vodivost) – pomocí zabudovaných senzorů a informace přenášet bezdrátově do externího měřicího zařízení. Tyto typy měření/sond se využívají pro kontrolu kvality VIP a používá je například firma v-Q-tec (viz. níže). Problém u toho systému měření je požadavek na velmi nízkou cenu sond a malé rozměry sond, aby je bylo možné zabudovat do panelu a nedošlo zároveň k enormnímu navýšení ceny.
- **Lze měřit tlak uvnitř panelu nepřímo** pomocí měření klíčových parametrů panelu závislých na podtlaku v panelu oproti prostředí. Jako nejznámější a nejpoužívanější se jeví tzv. LIFT-OFF metoda. VIP je uložen v prostoru s kontrolovaným tlakem a sleduje se jeho tloušťka. V prostoru okolo panelu je postupně snižován tlak do úrovně, kdy dojde ke změně tloušťky panelu (expanzi) způsobené vyrovnáním obou tlaků (uvnitř a vně panelu).

V tabulce můžeme vidět srovnání několika metod:

Tabulka 7: Srovnané metody [29]

Metoda	Postup měření		Měřený parametr	Co je potřebné pro stanovení tepelné vodivosti
	Přímo	Nepřímo		
Metoda horké desky	x		Množství tepla Q	
Metoda tepelného toku		x	teplotní rozdíl	standartní kalibrace
Metoda horké krabice	x		koeficient přenosu tepla U	
Metoda zavedení pevných těles		x	tepelný tok	Kalibrace vůči p pro membránu
Měření efuzivity		x	Tepelná efuzivita E	různé parametry
Lift of metoda		x	tlak vnitřního plynu p	Měření vzdálenosti laserem Kalibrační křivka λ vs p pro VIP
Snímač tlaku plynu		x	tlak vnitřního plynu p	kalibrační křivka λ vs p pro VIP
Snímač objemu plynu		x	Objem plynu	oxidovatelný povrch
Porovnání tepelného toku		x	tepelný tok	reference VIP pro kalibrační křivku

Vzhledem k povaze designu a výrobnímu procesu vakuového izolačního panelu je náročné ověřit kvalitu VIP jak během výroby, tak po výrobě. Navíc je ještě náročnější sledovat úroveň podtlaku po instalaci a po celou dobu životnosti VIP. Jelikož výkon

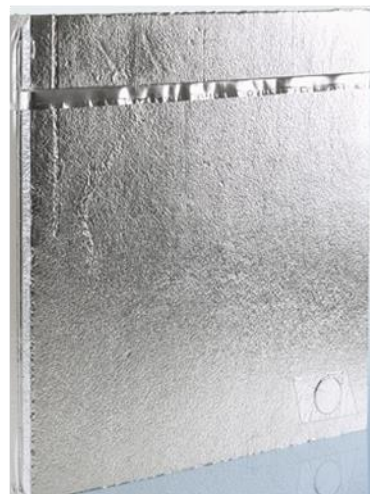
tepelné izolace je přímo korelován s úrovní vakua, je takový monitoring zásadní pro průběžný výkon a hodnocení kvality. [14]

Aby se vyřešily tyto problémy, vyvinula firma Strip's levný bezkontaktní senzor Stripres® pro měření vakuové úrovně u VIP, a to jak během výrobního procesu, tak po celou dobu životnosti. Snímač je navržen tak, aby byl permanentně instalován do VIP při výrobě panelů a následně tak umožnil vakuové měření kdykoliv a téměř v jakémkoliv místě díky bezkontaktnímu měření. Pro zajištění dlouhověkosti je snímač bez baterií a je napájen s využitím příslušného bezdrátového čtecího zařízení. [14]

Společnost va-Q-tec zase vyvinula celosvětově patentovaný systém kontroly kvality va-Q-check®. Ten umožňuje během několika sekund kontrolovat tlak plynu každého jednotlivého VIP. Každý vakuový izolační panel od firmy va-Q-tec je vybaven malým senzorovým diskem pro testování a štítkem čárového kódu. Zákazníkům firma nabízí instalaci pro trvalou ovladatelnost kvality na místě a společně s nimi optimalizují manipulaci a další zpracování vakuových panelů. Výhodami va-Q-checku je 100% kontrola během výroby a instalace a jednoduché, rychlé a přesné měření. [15]



Obrázek 19: Va-Q-check [15]



Obrázek 20: VIP od firmy Va-q-tec se senzorem pro měření kvality [15]

1.11 Stárnutí

Jak je níže uvedeno, stárnutí neboli životnost je závislá na těchto parametrech: jako nejdůležitější, zároveň nejnebezpečnější je outgassing, který se projevuje ze začátku a má krátkodobý účinek, dalším parametrem, který ovlivňuje životnost je průnik plynu, který má dlouhodobý vliv na VIP.

Pan docent Roman Kunič popsal zrychlené stárnutí ve svém článku o vakuových izolacích. Historicky se zrychlené stárnutí používalo jako velmi rychlé testování v simulovaných polních laboratořích. Ve většině případů to vede k nadměrnému selhání materiálů nebo výrobků, k čemu by za normálních podmínek při běžné životnosti nedošlo. Proto musí být podmínky pro zrychlené stárnutí co nejvíce přizpůsobeny normálním podmínkám. [17]

Prahová hodnota reakce je minimální energií (energií aktivace), která vede k reakci. V chemii a biologii je prahová energie, energie potřebná k vytvoření chemické reakce. Jinými slovy je to zahájení určitých chemických změn, které popisují vlastnosti materiálu a umožňují nepřímou predikci její degradace nebo stárnutí pod vlivem různých vnějších faktorů. Abychom dosáhli reakční úrovně aktivační energie, musíme dosáhnout vysokých teplot a správné orientace a energie molekul. Aktivační energie je většinou vyjádřena jako energie [J] potřebná pro reakci jednoho molu látky nebo reakčního činidla [J/mol]. U látek s vysokou aktivační energií (více jak 170 kJ/mol), jsou reakce detekovatelné jen při teplotách vyšších jak 400 °C. [17]

Arrheniova rovnice popisuje závislost rychlosti chemických reakcí na různé fyzikální parametry, jako je teplota, vlhkost, tlak apod.. Velikost změn ovlivňuje schopnost materiálu odolávat těm faktorům, které aktivují energii. Arrheniova rovnice popisuje logaritmus vztahu mezi teplotou a aktivační energií a jeho rovnice může být vyjádřena jako:

$$\ln k = -\frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln A, \quad (9)$$

pokud jsou rychlosti reakcí specifické, jsou dvě různé teploty známé a aktivační energie může být určena:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \ln a_T = \frac{E_a}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2}, \quad (10)$$

kde a_T je koeficient zrychleného stárnutí při zvýšené teplotě [-],

E_a je aktivační energie [J/mol],

R je molární plynová konstanta [J/Kmol],

T je teplota [K],

k je specifická rychlost reakce [1/s],

A je frekvenční faktor určité reakce [1/s].

Postup zrychleného stárnutí je, že se určité zatížení nebo několik různých zatížení, zvyšuje nad úroveň zatížení při běžném používání. Doba testování by proto měla být podstatně kratší. Životnost neznamena období bez jakéhokoliv zhoršení, je to funkce způsobu použití a údržby. Předmětem subjektivního posouzení pro základ určení životnosti konkrétního materiálu, výrobku či systému jsou chyby a poškození. Vlastnosti mají často více než dva stavy (vzduchotěsný, pronikání vzduchu, voděodolnost, únik vody, odolnost proti stabilitě atd.), ale stanovení pomalé degradace v důsledku kontinuity v procesu stárnutí je složitější. Častěji než katastrofický pokles kvality ("náhlá smrt") je pomalé neustále snižování kvality a užitečnosti. V takovém případě je nutnost určit maximální přípustnou degradaci produktu, která je stále pro uživatele přijatelná, stejně jako vzhled, funkčnost a všechny ostatní relevantní parametry produktů na konci jejich životnosti. [17]

Experimentální měření bylo provedeno na VIP panelech o rozměrech (25 x 25) cm při teplotách 100 °C, 90 °C, 80 °C, 70 °C a 60 °C v čase od půl dne do 3 měsíců (celkem 112 vzorků).

Primární a nejvíce důležitý požadavek na VIP panely je vynikající tepelná vodivost, která závisí také na kvalitě, aplikaci, instalaci, detailech, tepelných mostech, konstrukčním spojení stavebních komplexů a základových ploch. Měření se provádělo měřičem tepelné vodivosti, který vidíme na obrázku 21.



Obrázek 21: Laboratorní měření tepelné vodivosti [17]

Hlavním problémem při použití zrychleného testu stárnutí je především výběr a aplikace vhodného tepelného zatížení a dodržení degradace v různých časových obdobích. Nevratné deformace VIP by kvůli příliš vysokému tepelnému zatížení během postupu mohly způsobit teplotní nestabilitu a dezintegraci materiálu. [17]

Největší zatížení VIP panelu, pokud vyloučíme mechanické poškození, je zvýšená teplota a vlhkost. Tyto dvě zatížení, ač jednotlivě či současně, vedou při vyšší intenzitě ke zvýšení průchodnosti plynů a vlhkosti. Tento proces výrazně zvyšuje hodnotu součinitele tepelné vodivosti, která je omezena hodnotou izolací jádrového materiálu. Cílem bylo stanovení doby, kdy součinitel tepelné vodivosti dosáhne dvojnásobku počáteční hodnoty. Během životnosti dochází v průběhu let nebo desetiletí k pronikání plynů a vlhkosti do vakuových panelů, a to především těsnícími materiály vícevrstvých fólií, čímž se zvyšuje tlak par a tím i součinitel tepelné vodivosti. Měření a analýza v této studii byla zaměřena na tepelnou zátěž VIP panelů během testů zrychleného stárnutí. Díky vysoké hygroskopicitě jádrového materiálu VIP je možné zanedbávat účinky vlhkosti. Navíc teplota a vlhkost mají vliv na životnost pouze při mechanické deformaci VIP, a ne pokud jsou správně užívány. [17]

Degradace při zvýšené teplotě se stanoví jako:

$$a_T = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\tau_2}{\tau_1} = e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \Rightarrow E_a = \frac{R \cdot \ln a_T}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (11)$$

$$a_T = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\tau_1}{\tau_2} = e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \right)}, \quad (12)$$

kde:

k_1 je reakční rychlost při akcelerovaném testu [1/s],

k_2 je reakční rychlost za normálních podmínek [1/s],

τ_1 čas do degradace [hodina, den, týden, měsíc, rok],

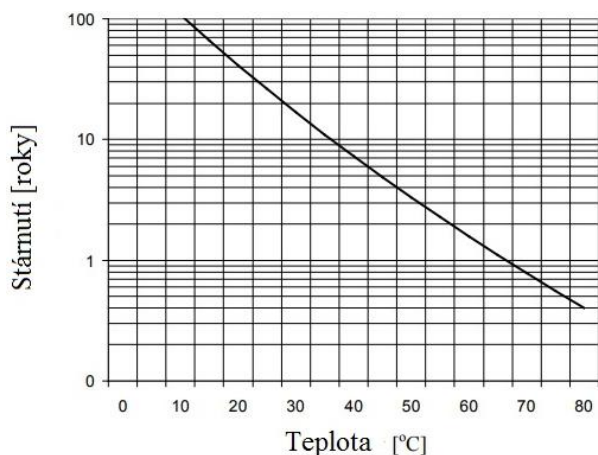
τ_2 čas do degradace při provozu [měsíc, rok, desetiletí],

T_1 zkušební teplota [K],

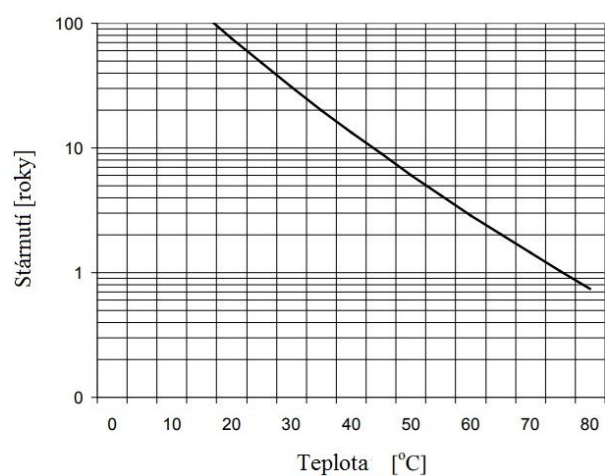
T_2 provozní teplota [K].

Navrhované teploty pro zkoušku (od 60 °C do 100 °C) byly potvrzeny jako interval spolehlivosti pomocí výsledků částečně degradovaných vzorků. Ze všech získaných

výsledků vyšla hodnota aktivační energie pro vakuové izolační panely $E_a=66,35$ kJ/mol. Hodnota aktivační energie se používá k vyhodnocení chování produktů panelů vystaveným různým teplotám, interpolacím v rámci testování teplotních intervalů, nebo obvykle extrapolací mimo zkušební teplotní interval. Tepelnému zatížení se vystavily vzorky VIP na degradační proces, který následoval po Arrheniusovu zákonu. Při stejné aktivační energii je možné transformovat tepelnou zátěž v libovolné jiné křivce tepelného zatížení. Výsledky získané z experimentálního zrychleného stárnutí, aktivační energie z Arrheniusova zákona a následně vypočtené časy a teploty stárnutí, můžeme vidět na grafech., které ukazují očekávané období stárnutí a stupeň degradace.



Graf 8: Stárnutí vakuových izolačních panelů (VIP); očekávaný čas kdy tepelná vodivost dosahuje dvojnásobku počáteční hodnoty λ_n v závislosti na teplotě životnosti



Graf 9: Stárnutí vakuové izolační vrstvy (VIP); očekávaný čas při dosažení hodnoty tepelné vodivosti 12 mW/(m·K) s provozní teplotou

Výsledkem zrychleného laboratorního testu stárnutí měření, analýzy simulace výpočtu a jiných vědeckých šetření lze dospět k závěru, že vakuové izolační panely jsou trvanlivé a vysoce kvalitní produkty, především z hlediska zachování výjimečného tepelného účinku. Vakuové izolační panely mohou být použity pro izolaci bariér, jak v průmyslu (domácí spotřebiče, laboratorní vybavení, zdravotnické zařízení a další), dopravy (chladicí vozíky, chladicí kontejnery, chladicí boxy, ledničky a další), tak pro stavební účely (vnější stěny, terasy, speciální panely, kontejnery, izolace alternativních chladících a větracích systémů a obecně, kde je cenný prostor). Vakuové izolační panely se doporučují do suchých, ne nadměrně vlhkých podmínek, s tepelným zatížením do 80 °C bez možnosti mechanického poškození, jako například propíchnutí, silnému oděru, ohýbání nebo jiné deformaci. Na základě testů se předpokládá životnost 48,1 let. [17]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Metodika práce

Experimentální část diplomové práce byla rozdělena do následujících částí:

1. výběr vhodných surovin pro výrobu jádrových izolantů a návrh optimálního složení,
2. výroba jádrových izolantů,
3. návrh metodiky výroby VIP,
4. výroba vakuových izolačních panelů,
5. praktická experimentální část – stanovení vlastností jádrových izolantů a vyrobených VIP,
6. vyhodnocení měření.

V rámci experimentální části jsme se zaměřili na výběr druhotných surovin pro výrobu vakuových izolací. Bylo vybíráno ze šesti alternativních surovin na bázi primárních a druhotných textilních vláken (přírodních i syntetických). Na základě měření tloušťky a délky vláken byly vybrány tři suroviny, které byly zajištěny pro poloprovozní zkoušky a byly z nich navrženy jádrové izolanty. Pro pojení vláken byla zvolena metoda termického pojení, přičemž vzorky jádrových izolantů byly vyrobeny firmou Retex.

Byly vyrobeny tři typy izolantů (viz. níže), a to:

1. izolant typu A s primárním PES vláknem,
2. izolant typu B s recyklovaným PES vláknem,
3. izolant typu C s recyklovaným vláknem a podílem bavlněného vlákna (50:50).

Pro výrobu byla použita ve všech případech pojivová PES bikomponentní vlákna v přídatku 15%. Výrobní tloušťka byla ve všech případech 11 mm, přičemž v závislosti na typu vláken došlo po výrobě k relaxaci tloušťky a ke zpětné expanzi izolantů (jak je patrné z naměřených tlouštěk).

Z vyrobených izolací byla připravena tělesa o velikosti (200 x 200) mm pro laboratorní experimentální měření a cca (500 x 500) mm pro výrobu VIP (viz. níže).

Dále byl proveden návrh technologie výroby VIP, v rámci něž byl zvolen optimální typ obalové fólie pro danou aplikaci, kdy byla zvolena laminovaná fólie od firmy Hanita Coatings, která by měla zajistit minimální difúzní propustnost obalu pro jednotlivé plyny způsobující vzestup tlaku uvnitř VIP. Dále pak byly provedeny experimenty

v oblasti volby optimální technologie sušení jádrových izolantů, aby bylo dosaženo odstranění co největšího množství vlhkosti z izolantu (zbytková vlhkosti způsobuje degradaci tepelných vlastností izolantu po výrobě).

Výroba VIP proběhla ve výrobně firmy TURVAC v Šoštajnu ve Slovinsku. Před zavakuováním byly izolanty vysušeny při teplotě 160°C po dobu 4 hodiny. Vakuování proběhlo strojně po dobu cca 6 min. Vzorky byly zavakuovány při tlaku 5±1 Pa.

Na vyrobených zkušebních vzorcích bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti a následně byly vybrané vzorky vystaveny teplotě +70°C a byla na nich provedena zrychlená zkouška stárnutí, kdy byla sledována závislost součinitele tepelné vodivosti na čase.

2.1.1 Výběr vhodných surovin pro výrobu jádrových izolantů a návrh optimálního složení

Výběr zkušebních vzorků byl zvolen na základě rešerše popsané v teoretické části. Pro testování prvotních zkoušek bylo vybráno šest druhů vláken. Jeden druh akrylového vlákna, tři druhy polyesterového vlákna a dva druhy bavlněného vlákna:

- Akrylové vlákno bylo zajištěno firmou Mitsubishi s tloušťkou 0,1 dtex¹,
- Polyesterové vlákno bylo zajištěno firmou Cetex-Rheinfaser a dodány byly tři druhy:
 - stable fiber white – low melting,
 - regenerated fiber raw white,
 - regeneratfaser Weib Super a grade.
- Bavlněné vlákno bylo zajištěno firmou Otto stadlander a dodány byly dva druhy:
 - spanien SG /RAMOS 13 1.3/32",
 - CIS DIV /FUNTY/HB 1.3/32"

Těchto šest surovin bylo podrobena měření tloušťky a délky vláken, pro stanovení optimální tloušťky vláken a zastoupení vláken ve zkušebním vzorku. Vybrána byla

¹ Jednotka dtex (decitex) se užívá v textilním průmyslu pro jemnost příze. Základní jednotkou je T (tex) a představuje délkovou hustotu, přesněji hmotnost 1 kilometru příze v gramech: $T = \frac{M [g]}{L [km]}$. Jemnost se nejčastěji vyjadřuje v desetínách texu – decitexem (dtex). $1 \text{ dtex} = \frac{1 \text{ g}}{10 \text{ km}}$. [31]

primární vlákna polyesteru s tloušťkou 1,2 dtex, polyesterová vlákna Regeneratfaser Weib Super a grade a bavlněná vlákna CIS DIV /FUNTY/HB 1.3/32".



Obrázek 24: Akrylová vlákna



Obrázek 23: Polyesterová vlákna



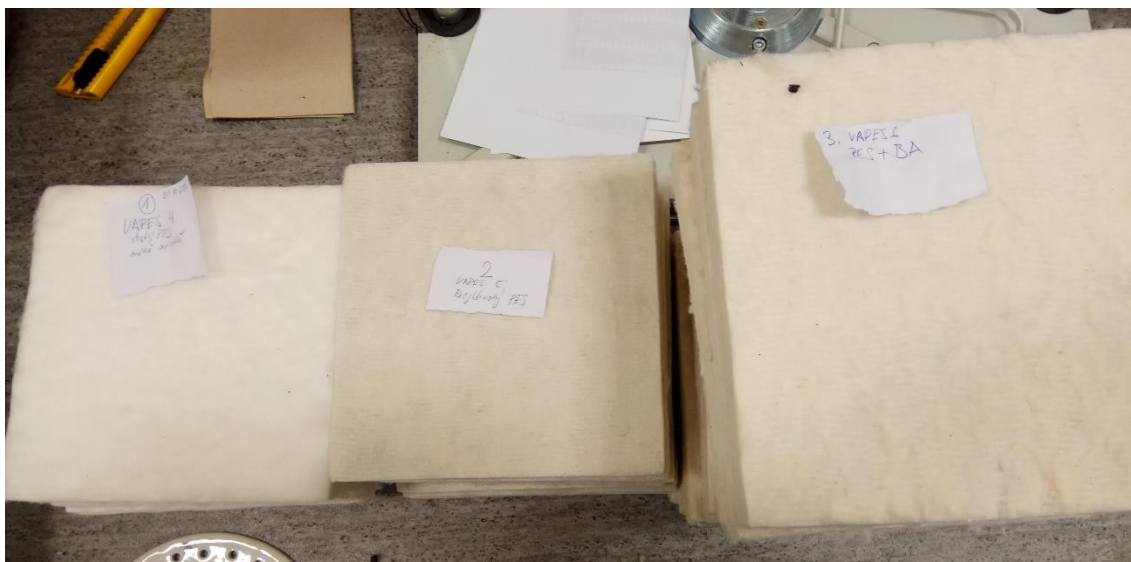
Obrázek 22: Bavlněná vlákna

2.1.2 Výroba jádrových izolantů

Vybraná vlákna byla poptána firmou Retex pro jejich výrobu. Firma Retex se zabývá vývojem, výrobou a samozřejmě prodejem netkaných textilií zejména pro oblast automotive a stavebnictví. Vlákna byla pojena termickou metodou zpevnění. Termické pojení probíhá ve třech krocích:

- tavení pojiva,
- formování pojivových míst,
- zpevnění pojiva chlazením.

Pojivovým materiálem mohou být polymery, kopolymery nebo bikomponentní vlákna. V našem případě byla použita bikomponentní vlákna v přídavku 15 %. Vyrobeny byly vzorky jádrových materiálů pro laboratorní měření o výrobních rozměrech (200 x 200 x 11) mm a vzorky jádrových materiálů určené pro výrobu VIP o rozměrech cca (500 x 500) mm. Vyrobené vzorky pro laboratorní měření vidíme na fotografii.



Obrázek 25: Zleva: vzorek A – primární PES vlákna; vzorek B – recyklované PES vlákna; vzorek C – recyklované PES vlákna s podílem bavlněného vlákna

2.1.3 Návrh metodiky výroby VIP

Vlhkost ve VIP negativně ovlivňuje životnost panelů. Proto byla zkoumána zbytková vlhkost v různých typech izolací při různých režimech a době sušení, aby bylo dosaženo maximálního stupně vysušení a nedošlo k narušení struktury vzorků vysokou teplotou při sušení. Zkoumány byly:

1. Skleněná izolace využívaná pro výrobu VIP - měkká,
2. Skleněná izolace využívaná pro výrobu VIP - tvrdá,
3. Experimentálně vyrobená izolace z čistého PES – měkká,
4. Experimentálně vyrobená izolace z čistého PES – tvrdá,
5. Izolační rohož s podílem bavlněných vláken,
6. Izolační rohož s podílem PES vláken (recyklovaný PES),
7. Izolační rohož s podílem lnu a bavlny.



Obrázek 26: Vzorčky pro stanovení vlhkosti materiálu

Vzorčky se sušily na tři teploty (105 °C, 140 °C a 180 °C) a v průběhu prvních pěti hodin se vážili každou půl hodinu, následně po dni. Poté byly vzorky dosušeny na 180 °C. Na základě toho se stanovila optimální teplota pro výrobu VIP.

2.1.4 Výroba vakuových izolačních panelů

Vzorčky dodané firmou Retex o rozměrech (500 x 500) mm byly převezeny do firmy Turvac, se sídlem ve Slovinsku. Tam došlo k výrobě vakuových izolačních panelů. Z předchozích metodik jsme vybrali jako optimální vysušit vzorky před vakuováním na teplotu 160 °C po dobu 4 hodin. Samotné vakuování trvalo přibližně 6 minut.

Dále byla vybrána obálka pro VIP. Jako neoptimálnější byla zvolena laminovaná fólie od firmy Hanita Coatings. Srovnávacími testy mezi fóliemi od Hanita Coatings a konkurenčními fóliemi bylo dokázáno, že obálka od Hanita Coatings brání průniku vlhkosti 3 až 10krát lépe než konkurence. Také má mnohem větší odolnost proti korozi, zejména při zvýšených teplotách a vysoké vlhkosti a vykazuje vynikající mechanické vlastnosti jako pevnost nebo přilnavost kovu. Sortiment je rozdělen pro různé časové lhůty. V našem případě je obálka tvořena šesti vrstvami ve složení polymer-kov-polymer-kov-polymer-kov.

Vakuové izolační panely podlehly stanovení součinitele tepelné vodivosti při zrychleném stárnutí, což znamená závislost součinitele tepelné vodivosti na čase. Před každým stanovením byly vzorky vystaveny teplotě 70 °C. Vyrobené vakuové izolační panely vidíme na fotografii.



Obrázek 27: Vakuové izolační panely

2.2 Praktická experimentální část – stanovení vlastností jádrových izolanů a vyrobených VIP

2.2.1 Stanovení tloušťky a délky vláken

Porovnáním rozměrové stupnice zjistíme vztah, jaké skutečné délce odpovídá jeden dílek okulárového mikrometru. Po ocejchování začneme měřit tloušťku vláken. Na čisté podložní sklíčko mikroskopu uložíme několik vláken, které zakápneme trochou vody, a ještě před překrytím krycím sklíčkem, vlákna oddělíme co nejvíce od sebe. Takhle připravený preparát uložíme pod mikroskop, nastavíme světlo a stupnici pro co nejlepší odečet. Odečtená vzdálenost v mikroskopu se přepočítá na milimetry.

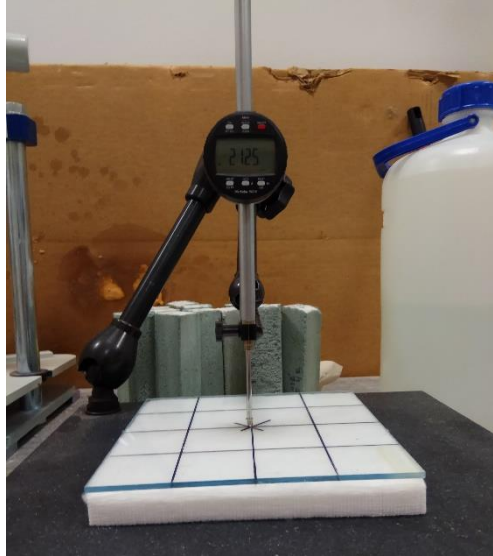
Měření tloušťky a délky vláken bylo stanoveno na trinokulárním mikroskopu Levenhuk D670T 5.1M. Jelikož byla délka vláken příliš velká pro odečet mikroskopem, měřila se délka vláken pomocí pravítka.



Obrázek 28: Mikroskop Levenhuk D670T 5.1M

2.2.2 Stanovení tloušťky izolantů

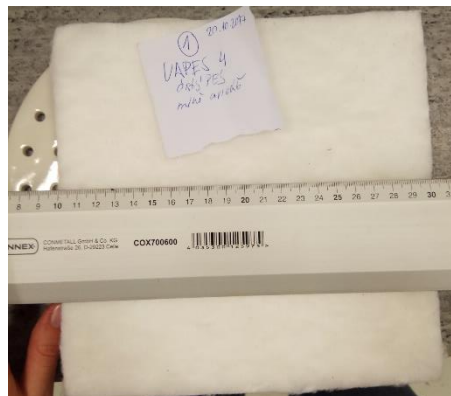
Tloušťka se stanovila dle ČSN EN 823. Měří se vzdálenosti mezi tvrdým, rovinným povrchem, na kterém je položen vzorek a přítlačnou deskou, která volně spočívá na horním povrchu zkušebního vzorku. Tloušťka je měřena v milimetrech.



Obrázek 29: Přístroj na stanovení tloušťky

2.2.3 Stanovení rozměrů

Rozměry se stanovily dle ČSN EN 12085. Zkušební vzorek se měří pomocí zařízení, které dosahuje požadovaného stupně přesnosti. Měření bylo stanoveno pravítkem.



Obrázek 30: Měření vzorku

2.2.4 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost se pro tepelně izolační výrobky stanovuje dle ČSN EN 1602. Pro stanovení objemové hmotnosti je potřebné znát šířku, délku, tloušťku a hmotnost zkušebního vzorku.

Objemová hmotnost se vypočítá dle vztahu:

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

Kde:

m je hmotnost zkušební vzorku [kg],

V je objem zkušební vzorku [m³].



Obrázek 31: Váha

2.2.5 Stanovení plošné hmotnosti

Plošná hmotnost se stanovuje dle ČSN EN 29073-1. Pro stanovení plošné hmotnosti je potřebné znát šířku, délku a hmotnost zkušební vzorku. Plošná hmotnost se vypočítá dle vztahu:

$$m_s = \frac{m}{S} \text{ [kg/m}^2\text{]},$$

Kde:

m je hmotnost zkušební vzorku [kg],

S je plocha zkušební vzorku [m²].

2.2.6 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti byl měřen přístrojem FOX200 vacuum environment, který je v souladu s ISO 8301, a dokáže měřit součinitel tepelné vodivosti při různých tlacích. Je založen na stacionární metodě desky dle ČSN 72 7012-3/ISO 8301. Než proběhne první měření, musí se přístroj kalibrovat. Vzorek se v přístroji uzavře mezi dvě desky, které jsou v průběhu otápeny na různou teplotu (teplotní spád byl zvolen vždy 10 °C).

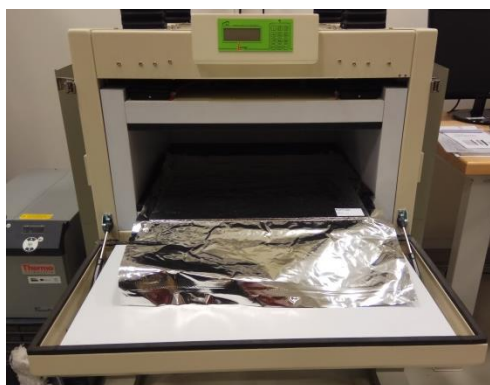
Pro měření za sníženého tlaku je celý přístroj zaklopen ocelovým poklopem, čímž je měřicí prostor zcela oddělen od okolního prostoru laboratoře. Po nasazení krytu, který

musí být velmi dobře utěsněn, se vypne přívod vzduchu a zapne vakuová trubice. Výsledkem je přesná hodnota součinitele tepelné vodivosti λ [W/(m·K)].



Obrázek 32: Měřicí přístroj FOX200 vacuum

Součinitel tepelné vodivosti na vakuových izolačních panelech byl měřen v přístroji, který vidíme na obrázku níže.



Obrázek 33: Přístroj na měření součinitele tepelné vodivosti VIP

2.2.7 Stanovení vlhkosti porézních materiálů

Vlhkost byla stanovena gravimetrickou metodou dle ČSN EN ISO 12570. Principem je vážení, sušení a opětovné vážení vzorku do konstantní hmotnosti. Rozdíl hmotnosti vlhkého vzorku a suchého vzorku je roven hmotnosti vody, která byla ve vzorku obsažena. Hmotnostní vlhkost poté vypočteme:

$$u = \frac{m - m_s}{m_s} \cdot 100 \%$$

kde m je hmotnost vlhkého vzorku [g] a m_s je hmotnost suchého vzorku [g].

Za normálních podmínek trvá proces schnutí velmi dlouho, proto jsme sušení urychlili metodou, kdy byly vzorky vysoušeny v sušárně.



Obrázek 34: Sušárna

2.2.8 Stanovení zrychleného stárnutí

Pro stanovení dlouhodobé stability a trvanlivosti byla provedena zkouška na základě článku od pana docenta Kuniče popsaného v bodě 1.11. Vakuové izolační panely byly vystaveny zvýšené teplotě 70 °C.



Obrázek 35: Klimakomora

2.3 Vyhodnocení měření

2.3.1 Stanovení tloušťky a délky vláken

Jako první se musela vybrat vlákna, ze kterých se zhotoví zkušební vzorek. Testovalo se celkem 6 druhů vláken, které jsou popsány níže v tabulce. Nejprve byla dle postupu stanovena tloušťka a délka vláken. Tloušťka se stanovila na trinokulárním mikroskopu a délka pomocí pravítka, jelikož pro stanovení mikroskopem byla příliš velká. Tloušťka vláken byla stanovena vždy z 20 měření, ze kterých byla stanovena průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Délka vláken byla stanovena vždy z 10 měření, ze kterých se taktéž vypočítala průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 8. Cílem bylo vybrat nejtenčí vlákna.

Tabulka 8: Výsledné hodnoty tloušťky a délky vláken

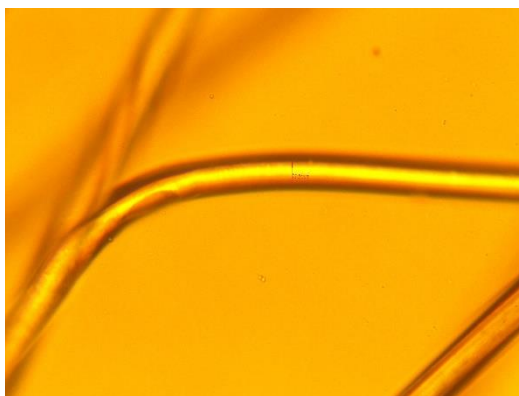
Druh vlákn	Označení	Průměrná tloušťka vláken d [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	Průměrná délka vláken [cm]	Směrodatná odchylka [cm]
Akryl		2,70	0,71	3,43	0,21
Polyester	Stable fiber white – Low melting	14,99	2,74	4,73	0,15
	Regenerated fiber raw white	12,41	1,24	4,99	0,24
	Regeneratfaser Wein super a grade	12,26	2,39	3,55	0,17
Bavlna	Spanien SG /Ramos 13 1.3/32"	12,74	2,46	2,66	0,21
	CIS DIV /FUNTY/HB 1.3/32"	10,80	2,85	2,61	0,28



Obrázek 36: Bavlněné vlákno při 40násobném zvětšení



Obrázek 37: Akrylové vlákno při 40násobném zvětšení



Obrázek 38: Polyesterové vlákno při 40násobném zvětšení

Z naměřených výsledků je patrné, že nejtenčí vlákna byla akrylová s průměrnou tloušťkou 2,70 μm . To vidíme i na snímku z mikroskopu na obrázku 37. Akrylová vlákna byla jasně bílá, velmi jemná a mírně zakřivená. Polyester a bavlna mají téměř stejnou tloušťku vláken. Polyesterová vlákna byla zakroucená a jemná, bílé barvy. Bavlněná vlákna byla točitá a střapatá, taktéž bílé barvy.

Z vláken byla pro výrobu jádrových izolantů vybrána polyesterová vlákna s označením Regeneratfaser Wein super a grade s tloušťkou 12,26 μm a délkou 3,55 cm a bavlněná vlákna označením CIS DIV /FUNTY/HB 1.3/32" s tloušťkou 10,80 μm a délkou 2,61 cm. Akrylová vlákna byla sice nejtenčí z měřených vláken, avšak pro jejich velkou jemnost je nebylo možné použít, jelikož je nešlo rozpojit k vytvoření izolantu. Použita tedy byla primární polyesterová vlákna s tloušťkou 1,2 dtex.

2.3.2 Studium chování izolantů při sušení

U vakuových izolačních panelů, které se používají ve stavebnictví, je důležitým krokem výroby odstranění zbytkové vlhkosti v materiálu. Pro každý druh materiálu je vhodná jiná teplota sušení. Především nesmí dojít k poškození materiálu. Pro výběr metodiky sušení izolantů při výrobě VIP byla provedena zkouška sušení při různých teplotách s průběžným stanovením vlhkosti izolantů dle bodu 2.2.6. Zkouška stanovení vlhkosti byla stanovena gravimetrickou metodou. Pro sušení byly zvoleny teploty 105 °C, 140 °C a 180 °C.

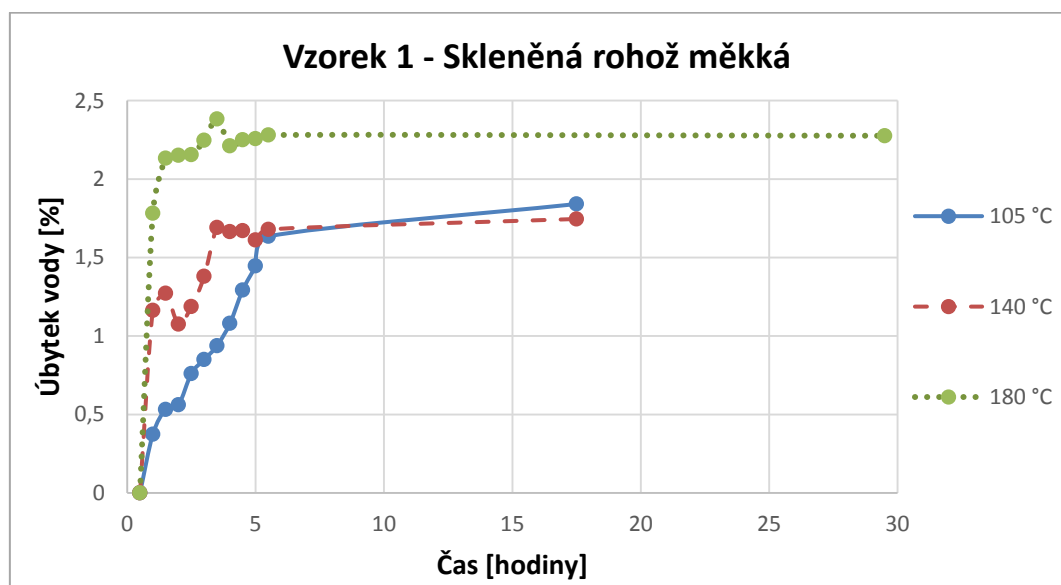
Testováno bylo 7 vzorků:

1. Skleněná izolace využívaná pro výrobu VIP - měkká,
2. Skleněná izolace využívaná pro výrobu VIP - tvrdá,
3. Experimentálně vyrobená izolace z čistého PES – měkká,
4. Experimentálně vyrobená izolace z čistého PES – tvrdá,
5. Izolační rohož s podílem bavlněných vláken,
6. Izolační rohož s podílem PES vláken (recyklovaný PES),
7. Izolační rohož s podílem lnu a bavlny.

Všechny vzorky sušeny při teplotách 105 °C a 140 °C byly následně dosušeny ještě při teplotě 180 °C. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 9 až 15 a grafech 10 až 16. U některých vzorků došlo zvýšením teploty, nebo špatným zacházením při sušení k zčernání nebo zuhelnatění vzorku, proto byly tyto výsledky vyřazeny z měření a u některých teplot v čase jsou prázdná místa.

Tabulka 9: Stanovení úbytku vody vzorku 1 (skleněná rohož měkká)

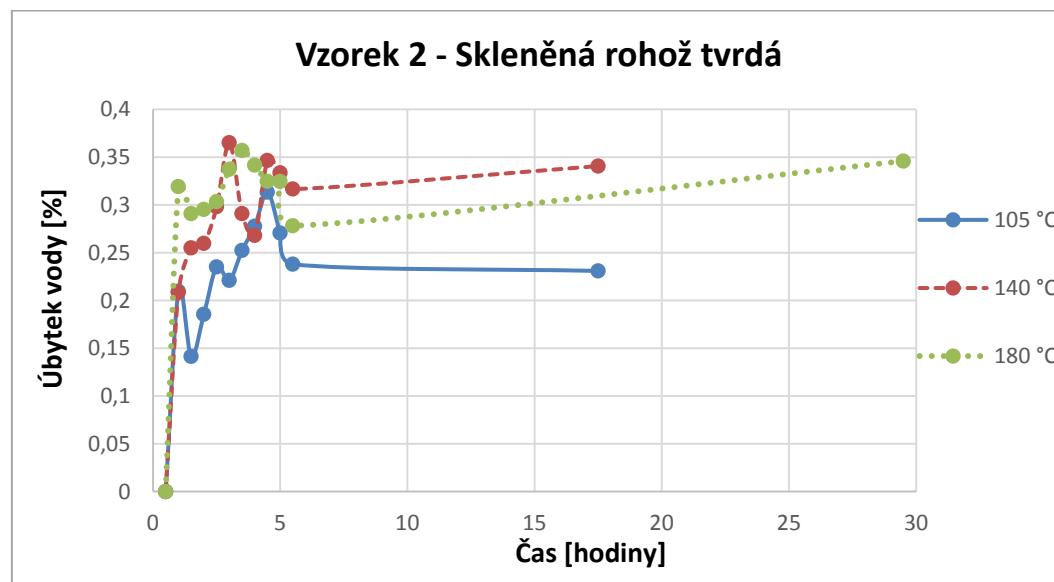
															Dosušení na 180 °C	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	40,75	60,75	
Úbytek vody [%] 105 °C	0,00	0,37	0,53	0,56	0,76	0,85	0,94	1,08	1,29	1,45	1,63	1,84	2,48	-	-	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	41,5		
Úbytek vody [%] 140 °C	0,00	1,16	1,27	1,08	1,19	1,38	1,69	1,66	1,67	1,61	1,68	1,75	1,90	0,15		
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	29,5			
Úbytek vody [%] 180 °C	0,00	1,78	2,13	2,15	2,15	2,25	2,38	2,21	2,25	2,26	2,28	2,28	1,01			



Graf 10: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 1 (skleněná rohož měkká)

Tabulka 10: Stanovení úbytku vody vzorku 2 (skleněná rohož tvrdá)

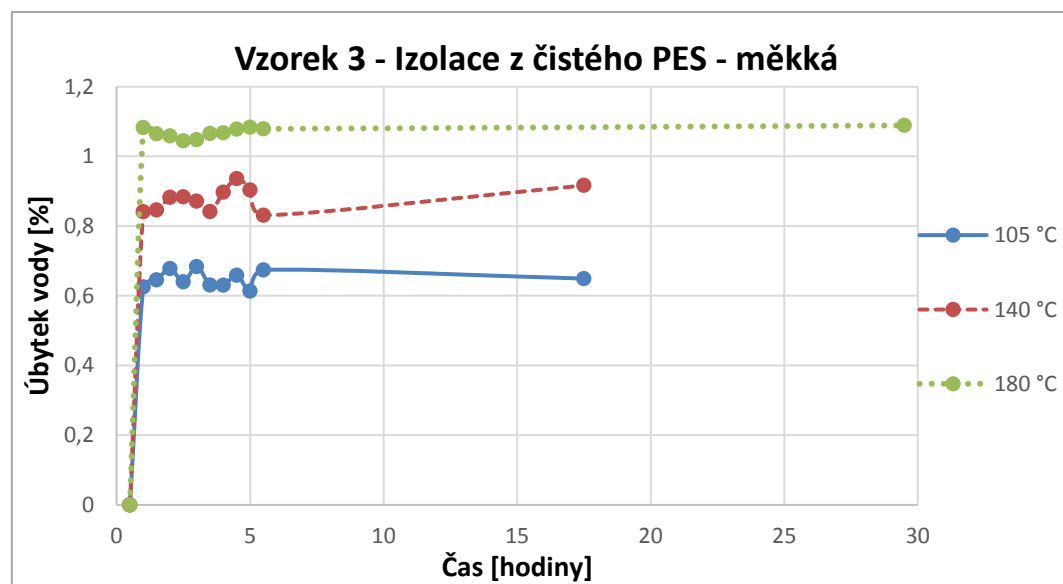
															Dosušení na 180 °C	
Čas [hodiny]		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	40,75	60,75
Úbytek vody [%]	105 °C	0,00	0,21	0,14	0,19	0,24	0,22	0,25	0,28	0,31	0,27	0,24	0,23	0,26	0,38	-0,08
Čas [hodiny]		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	41,5	
Úbytek vody [%]	140 °C	0,00	0,21	0,25	0,26	0,30	0,37	0,29	0,27	0,35	0,33	0,32	0,34	0,34	-0,12	
Čas [hodiny]		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	29,5		
Úbytek vody [%]	180 °C	0,00	0,32	0,29	0,30	0,30	0,34	0,36	0,34	0,32	0,32	0,28	0,35	-0,01		



Graf 11: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 2 (skleněná rohož tvrdá)

Tabulka 11: Stanovení úbytku vody vzorku 3 (Izolace z čistého PES – měkká)

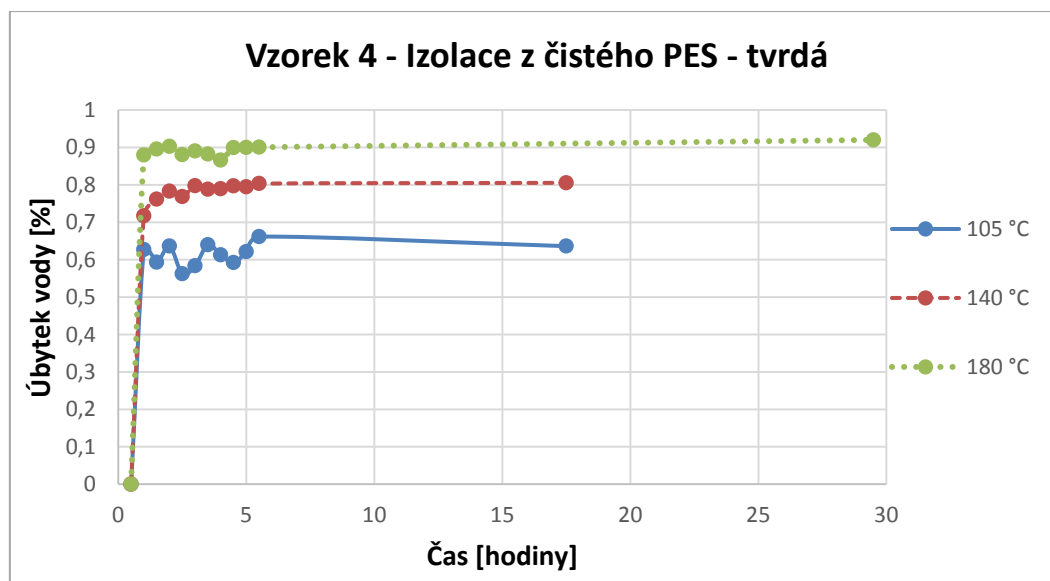
															Dosušení na 180 °C	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	40,75	60,75	
Úbytek vody [%] 105 °C	0,00	0,63	0,65	0,68	0,64	0,68	0,63	0,63	0,66	0,61	0,67	0,65	0,71	0,66	-	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	41,5		
Úbytek vody [%] 140 °C	0,00	0,84	0,85	0,88	0,88	0,87	0,84	0,90	0,94	0,90	0,83	0,92	0,97	0,53		
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	29,5			
Úbytek vody [%] 180 °C	0,00	1,08	1,06	1,06	1,04	1,05	1,07	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	0,80			



Graf 12: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 3 (Izolace z čistého PES – měkká)

Tabulka 12: Stanovení úbytku vody vzorku 4 (Izolace z čistého PES – tvrdá)

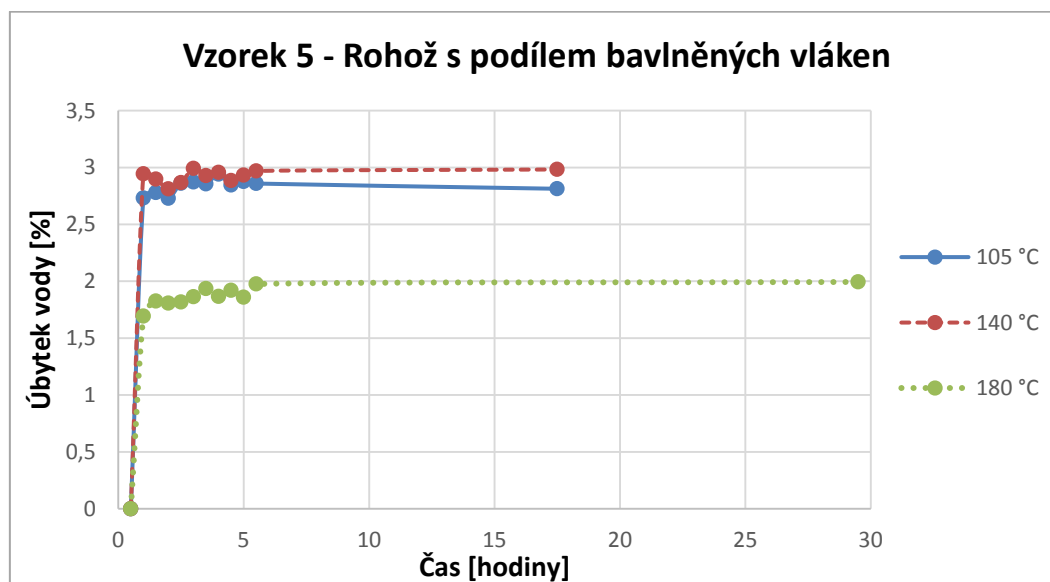
															Dosušení na 180 °C	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	40,75	60,75	
Úbytek vody [%] 105 °C	0,00	0,63	0,59	0,64	0,56	0,58	0,64	0,61	0,59	0,62	0,66	0,64	0,66	0,66	0,51	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	41,5		
Úbytek vody [%] 140 °C	0,00	0,72	0,76	0,78	0,77	0,80	0,79	0,79	0,80	0,79	0,80	0,81	0,87	0,76		
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	29,5			
Úbytek vody [%] 180 °C	0,00	0,88	0,90	0,90	0,88	0,89	0,88	0,87	0,90	0,90	0,90	0,92	0,77			



Graf 13: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 4 (Izolace z čistého PES – tvrdá)

Tabulka 13: Stanovení úbytku vody vzorku 5 (Rohož s podílem bavlněných vláken)

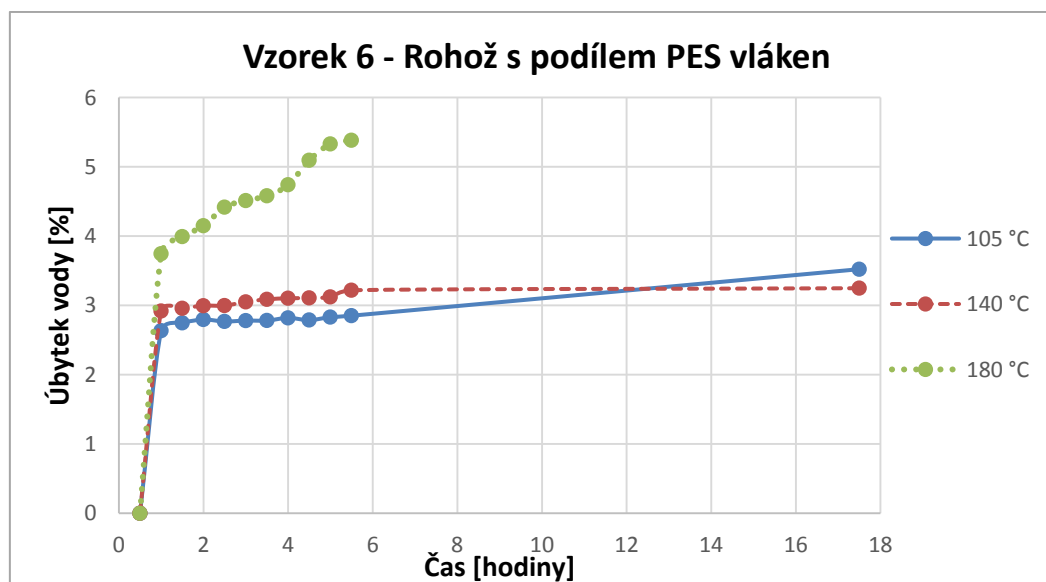
															Dosušení na 180 °C	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	40,75	60,75	
Úbytek vody [%] 105 °C	0,00	2,73	2,78	2,73	2,86	2,87	2,86	2,94	2,85	2,88	2,86	2,81	2,89	3,24	5,09	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	41,5		
Úbytek vody [%] 140 °C	0,00	2,94	2,90	2,81	2,87	2,99	2,93	2,96	2,88	2,93	2,97	2,98	3,25	5,18		
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	29,5			
Úbytek vody [%] 180 °C	0,00	1,69	1,83	1,81	1,82	1,86	1,93	1,87	1,92	1,86	1,98	1,99	2,02			



Graf 14: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 5 (Rohož s podílem bavlněných vláken)

Tabulka 14: Stanovení úbytku vody vzorku 6 (rohož s podílem recyklovaných PES vláken)

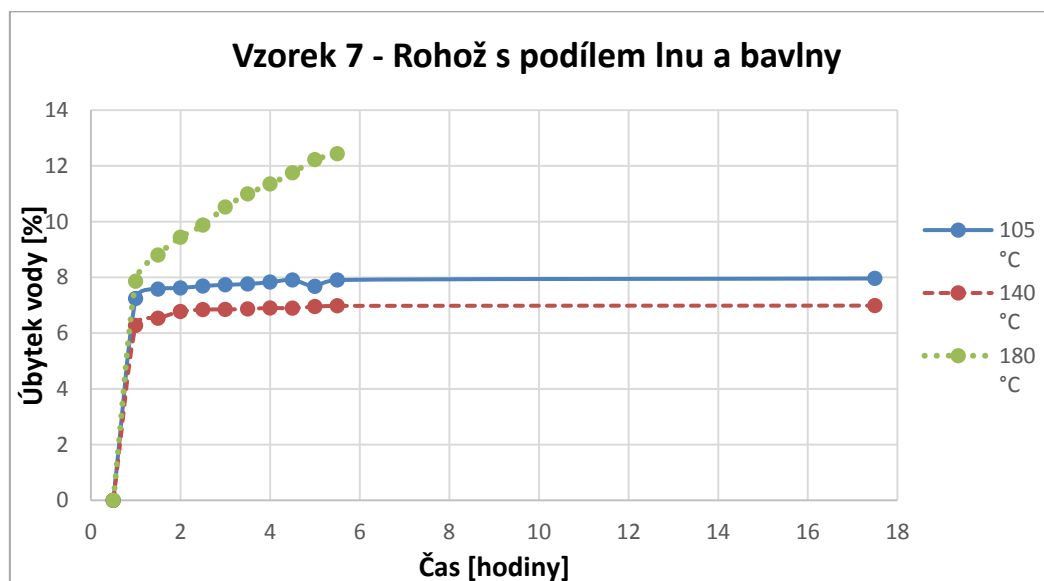
															Dosušení na 180 °C	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	40,75	60,75	
úbytek vody [%]	105 °C	0,00	2,63	2,75	2,79	2,77	2,78	2,78	2,82	2,79	2,83	2,85	3,52	2,95	4,02	-
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	41,5		
úbytek vody [%]	140 °C	0,00	2,92	2,96	2,99	3,00	3,05	3,09	3,10	3,11	3,12	3,22	3,25	3,80	-	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	29,5			
úbytek vody [%]	180 °C	0,00	3,74	3,99	4,15	4,42	4,51	4,58	4,74	5,09	5,33	5,38	5,42	-		



Graf 15: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 6 (rohož s podílem recyklovaných PES vláken)

Tabulka 15: Stanovení úbytku vody vzorku 7 (Rohož s podílem lnu a bavlny)

															Dosušení na 180 °C	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	40,75	60,75	
Úbytek vody [%] 105 °C	0,00	7,24	7,58	7,62	7,69	7,73	7,76	7,83	7,91	7,68	7,91	7,96	8,09	-	-	
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	17,5	41,5		
Úbytek vody [%] 140 °C	0,00	6,27	6,53	6,77	6,84	6,85	6,87	6,90	6,89	6,95	6,98	6,99	8,77	-		
Čas [hodiny]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	29,5			
Úbytek vody [%] 180 °C	0,00	7,86	8,80	9,44	9,88	10,52	11,00	11,35	11,75	12,22	12,44	13,00	-			



Graf 16: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 7 (Rohož s podílem lnu a bavlny)

Vybrat optimální sušící teplotu je pro výrobu VIP velmi důležité. Podstatnou část hraje i ekonomická část s ohledem na životní prostředí.

Organické materiály, jako je bavlna či len, byly při teplotě 180 °C zničeny. Nejvíce náchylný na zvýšenou teplotu byl vzorek 7, rohož s podílem lnu a bavlny. Na základě zjištěných hodnot byla vybrána optimální teplota pro výrobu vakuově izolačních panelů. Jako optimální teplota byla zvolena 160 °C a nejlépe se jeví 4 hodiny sušení, poté se hodnoty tolik nemění.

2.3.3 Stanovení vlastností na jádrových izolantech

Na vyrobených jádrových izolantech od firmy Retex byly stanoveny rozměry, tloušťky a dopočtená objemová a plošná hmotnost. Následně na to byl stanoven součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku a na teplotě.

- **Stanovení rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti**

Objemová hmotnost byla stanovena dle ČSN EN 1602 při jmenovitém zatížení 50 Pa. Naměřené rozměry a tloušťky pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 16 až 18. Pro vzorky A až C bylo vyrobeno různé množství vzorků.

Při výrobě byly izolanty vyráběny na stejnou tloušťku a stejnou objemovou hmotnost, kdy bylo použito maximální stlačení s cílem tloušťky izolantu přibližně 11 mm a objemovou hmotností 200 kg/m³. Vlivem relaxace po výrobě došlo k expanzi tloušťky. Snahou bylo vyrobit izolanty o co největší objemové hmotnosti, jak tomu je u VIP, což se projevuje na kvalitě povrchu.

Tabulka 16: Vlastnosti jádrového izolantu vzorku A

Vzorek č.	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	200	202	21,25	91,820	107	2,27
2	200	200	19,77	60,661	77	1,52
3	200	201	20,55	91,283	110	2,27
4	200	200	19,64	89,877	114	2,25
5	200	203	20,23	94,162	115	2,32
6	200	200	19,00	91,032	120	2,28
7	200	202	20,49	91,463	110	2,26
8	200	200	18,86	91,588	121	2,29
Průměr:	200	201	19,97	87,740	109	2,18

Tabulka 17: Vlastnosti jádrového izolantu vzorku B

Vzorek č.	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	200	201	18,31	92,340	125	2,30
2	200	200	17,65	97,347	138	2,43
3	200	200	18,27	92,811	127	2,32
4	200	201	18,57	91,108	122	2,27
5	200	200	18,28	94,555	129	2,36
6	200	200	18,89	94,596	125	2,36
7	201	201	18,71	92,580	122	2,29
8	200	200	17,44	96,736	139	2,42
9	200	200	17,25	98,303	142	2,46
10	200	200	17,29	95,199	138	2,38
Průměr:	200	200	18,07	94,560	131	2,36

Tabulka 18: Vlastnosti jádrového izolantu vzorku C

Vzorek č.	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Plošná hmotnost m_s [kg/m ²]
1	200	200	32,99	103,219	78	2,58
2	200	200	32,99	100,652	76	2,52
3	199	200	32,06	100,662	79	2,53
4	200	200	31,59	103,347	82	2,58
5	200	200	32,07	102,833	80	2,57
6	200	200	32,19	102,285	79	2,56
7	200	200	31,26	100,592	80	2,51
8	200	200	30,25	101,052	84	2,53
9	200	200	30,67	101,410	83	2,54
10	200	200	30,73	99,278	81	2,48
11	200	200	30,35	101,632	84	2,54
12	200	200	29,50	100,574	85	2,51
Průměr:	200	200	31,39	101,460	81	2,54

Z vypočtených objemových a plošných hmotností byla stanovena průměrná hodnota. Nejmenší objemovou hmotnost měl vzorek C, s průměrnou hodnotou 81 kg/m³, vzorek A měl o něco vyšší a to 109 kg/m³ a největší objemovou hmotnost měl vzorek B, s průměrnou hodnotou 131 kg/m³.

Objemová hmotnost byla taktéž přeměřována na vzorcích při měření. Měření bylo simulováno pro vakuové izolační panely. Na přístroji se však nepodaří dosáhnout tak velkého tlaku, jak při kterém jsou stlačovány panely. Vzorky byly proto vždy stlačeny na maximální objemovou hmotnost, kterou přístroj dokázal při maximálním tlaku zajistit. Při největším dosaženém tlaku byly naměřeny rozměry a tloušťka uvedené v tabulce 19 až 21. U každého dalšího měření docházelo k dalšímu stlačování vzorku, proto se při každém dalším měření měnila i tloušťka vzorku.

Tabulka 19: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m^3] stanovená při měření vzorku A

Tlak [mbar]	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m^3]
0,05	200	201	14,71	87,740	148
1,0			14,67		149
10,0			14,59		150
100,0			14,50		150
Normální tlak			13,28		164

Tabulka 20: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m^3] stanovená při měření vzorku V

Tlak [mbar]	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m^3]
0,05	200	201	13,51	94,560	175
1,0			13,49		175
10,0			13,49		175
100,0			13,49		175
Normální tlak			13,49		175

Tabulka 21: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m^3] stanovená při měření vzorku C

Tlak [mbar]	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost ρ_v [kg/m^3]
0,05	200	200	20,64	101,460	123
0,1			19,92		127
1,0			19,84		128
10,0			20,18		126
100,0			19,96		127
Normální tlak			18,40		138

U měřených vzorků vidíme, že při každém dalším měření se vzorek stále více stlačuje, čímž mění i svou objemovou hmotnost. Pouze u vzorku B – izolant z vláken

recyklovaného polyesteru, dochází ke stlačení pouze v prvních měřeních. Poté se tloušťka ustálila, čímž nestoupá ani objemová hmotnost. Můžeme tedy říct, že vzorek B je pevný a je pravděpodobné, že nejvíce odolává mechanickému stlačení.

- **Stanovení součinitele tepelné vodivosti v závislosti na tlaku**

Na jádrových izolantech byla stanovena závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku. Stanoven byl při teplotním spádu 10 °C. Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven při vakuu (0,05 mbar) 1,0 mbar, 10 mbar, 100 mbar a při normálním tlaku (uvažuje se atmosférický tlak= 1013, 25 mbar).

Tabulka 22: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na tlaku vzorku A

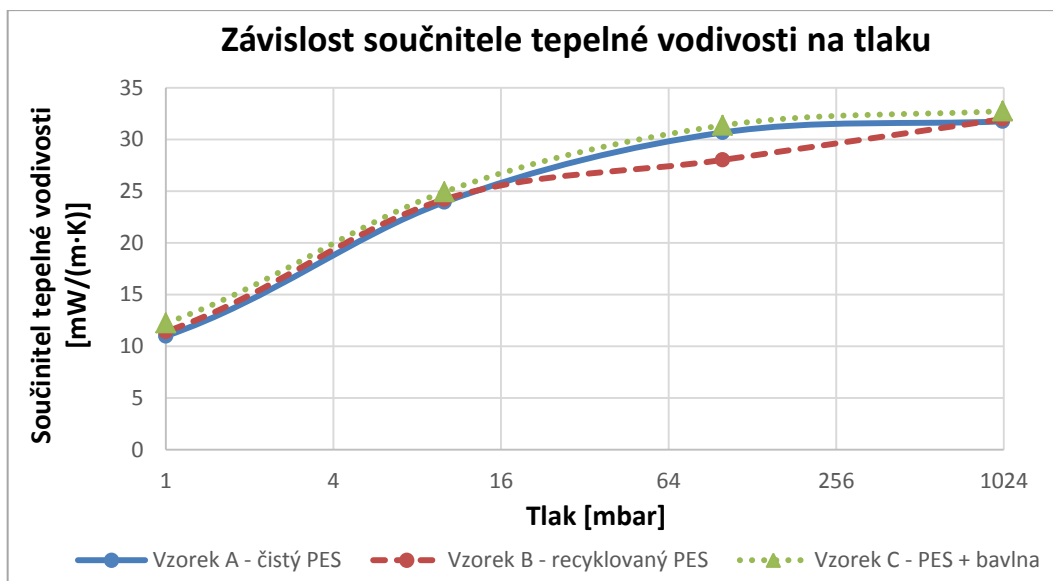
Tlak [mbar]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{10\text{ }^\circ\text{C}}$ [W/(m·K)]			
	λ_1	λ_2	λ_3	$\lambda_{\text{průměr}}$
0,05	0,00249	0,00253	0,00257	0,00253
1,0	0,01092	0,01098	0,01105	0,01098
10,0	0,02391	0,02394	0,02394	0,02393
100,0	0,03061	0,03061	0,03060	0,03061
Normální tlak	0,03175	0,03175	0,03175	0,03175

Tabulka 23: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na tlaku vzorku B

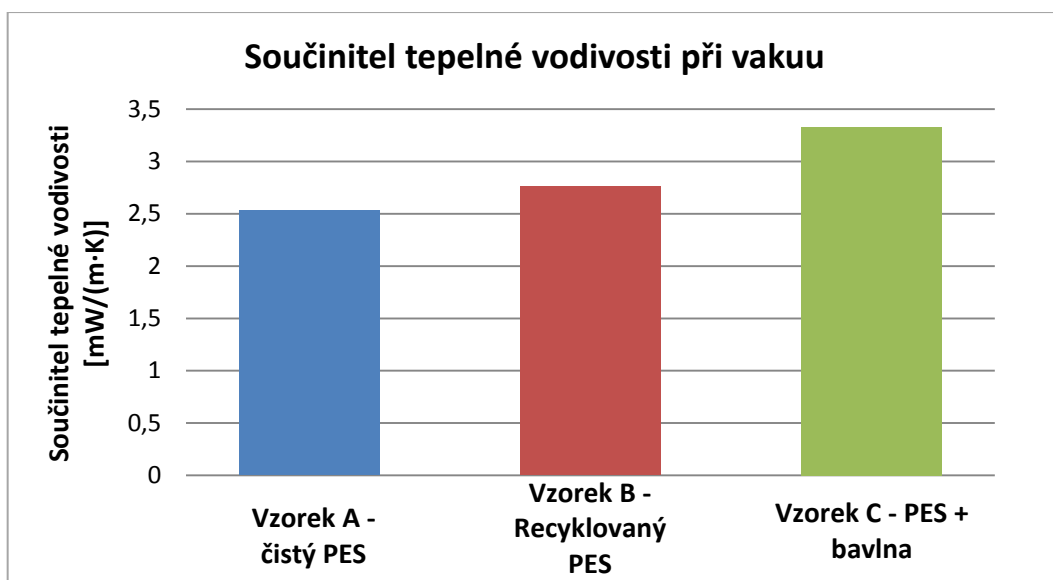
Tlak [mbar]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{10\text{ }^\circ\text{C}}$ [W/(m·K)]			
	λ_1	λ_2	λ_3	$\lambda_{\text{průměr}}$
0,05	0,00269	0,00289	0,00271	0,00276
1,0	0,01135	0,01141	0,01146	0,01141
10,0	0,02418	0,02421	0,02422	0,02420
100,0	0,02802	0,02802	0,02802	0,02802
Normální tlak	0,03197	0,03196	0,03197	0,03197

Tabulka 24: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na tlaku vzorku C

Tlak [mbar]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{10\text{ }^\circ\text{C}}$ [W/(m·K)]			
	λ_1	λ_2	λ_3	$\lambda_{\text{průměr}}$
0,05	0,00346	0,00331	0,00321	0,00333
0,1	0,00397	0,00406	0,00417	0,00407
1,0	0,01219	0,01228	0,01226	0,01224
10,0	0,02494	0,02493	0,02493	0,02493
100,0	0,03138	0,03136	0,03135	0,03136
Normální tlak	0,03276	0,03275	0,03275	0,03275



Graf 17: Závislost součinitele tepelné vodivosti λ [mW/(m·K)] na tlaku



Graf 18: Součinitel tepelné vodivosti λ [mW/(m·K)] vzorků A, B, C při vakuu

Z grafu 15 je patrné, že se vzrůstajícím tlakem roste taktéž součinitel tepelné vodivosti. Nejnižší hodnoty při vakuu, ale i při postupném zvyšování tlaku dosáhl vzorek A z vláken z čistého polyesteru. Při vakuu dosáhl hodnoty 0,00253 W/(m·K) a při normálním tlaku 0,03175 W/(m·K). Vzorek B z vláken z recyklovaného polyesteru měl o něco málo vyšší hodnoty než vzorek A, ale jsou relativně se vzorkem A srovnatelné. Vyšších hodnot pak dosáhl vzorek C ze směsi vláken z bavlny a recyklovaného polyesteru, kdy při vakuu dosáhl hodnoty 0,0033 W/(m·K) při vakuu a 0,03275 W/(m·K) při normálním tlaku.

- Stanovení součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě

Na jádrových izolantech byl stanoven součinitel tepelné vodivosti v závislosti na teplotě při vakuu. Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven při teplotním spádu 10 °C, 20 °C a 30 °C.

Tabulka 25: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na teplotě vzorku A

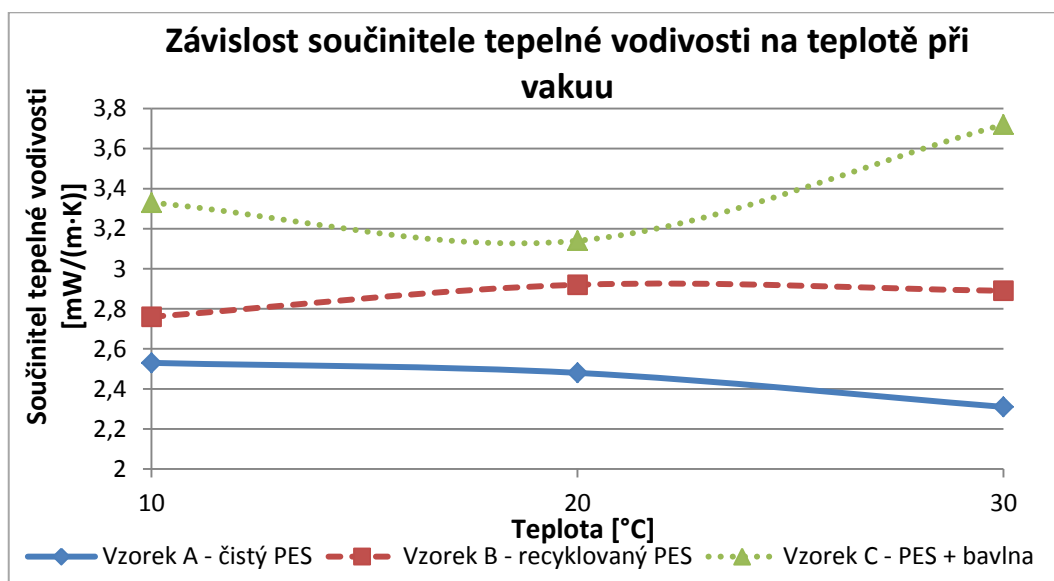
Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]									
Při 10 °C				Při 20 °C			Při 30 °C		
λ_1	λ_2	λ_3	$\lambda_{\text{průměr}}$	λ_1	λ_2	$\lambda_{\text{průměr}}$	λ_1	λ_2	$\lambda_{\text{průměr}}$
0,00249	0,00253	0,00257	0,00253	0,00247	0,00248	0,00248	0,00217	0,00245	0,00231

Tabulka 26: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na teplotě vzorku B

Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]									
Při 10 °C				Při 20 °C			Při 30 °C		
λ_1	λ_2	λ_3	$\lambda_{\text{průměr}}$	λ_1	λ_2	$\lambda_{\text{průměr}}$	λ_1	λ_2	$\lambda_{\text{průměr}}$
0,00269	0,00289	0,00271	0,00276	0,00292	0,00292	0,00292	0,00291	0,00287	0,00289

Tabulka 27: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na teplotě vzorku C

Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]									
Při 10 °C				Při 20 °C			Při 30 °C		
λ_1	λ_2	λ_3	$\lambda_{\text{průměr}}$	λ_1	λ_2	$\lambda_{\text{průměr}}$	λ_1	λ_2	$\lambda_{\text{průměr}}$
0,00346	0,00331	0,00321	0,00333	0,00303	0,00324	0,00314	0,00497	0,00246	0,00372



Graf 19: Závislost součinitele tepelné vodivosti λ [mW/(m·K)] na teplotě při vakuu

Při tak nízkém tlaku je dominantní vliv sálání a vedení v matici. Vedení konvekcí je velmi potlačeno. Jak vidíme z grafu, tak u vzorku A se zvyšující se teplotou klesá součinitel tepelné vodivosti. To je zapříčiněno dobrou orientací a velkou jemností vláken. Tím, že s rostoucí teplotou klesá součinitel tepelné vodivosti, je pozitivní reakce s ohledem na provozní podmínky. U ostatních vzorků byla důležitá dílčí změna tlaku uvnitř zkušební komory.

2.3.4 Stanovení vlastností na VIP

Zkušební vzorky od firmy Retex byly zavakuovány firmou TURVAC ve Slovinsku. Před vakuováním byly sušeny na vybranou optimální teplotu 160 °C po dobu 4 hodin. Na takto dodaných vakuových panelech jsme změřili nejdříve rozměry a dopočetli objemovou hmotnost jak panelů, tak jádrového materiálu. Byl stanoven součinitel tepelné vodivosti po výrobě a před měřením. Následně byla stanovena zkouška zrychleného stárnutí za zvýšené teploty 70 °C.

- **Stanovení rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti**

Naměřené rozměry a tloušťka jsou uvedeny v tabulkách 28 až 30. Objemová hmotnost VIP byla stanovena dle postupu 2.2.4. Objemová hmotnost jádrového materiálu uvnitř panelu byla stanovena na základě známé plošné hmotnosti samotného jádrového izolantu vypočtené u stanovení vlastností jádrového materiálu (2.3.3). Z naměřených hodnot byla stanovena průměrná hodnota.

Tabulka 28: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m³] VIP vzorku A

Vzorek č.	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost VIP ρ_v [kg/m ³]	Objemová hmotnost jádrového materiálu ρ_v [kg/m ³]
1	515	520	11,69	797,28	255	187
2	520	520	12,47	730,42	217	175
3	520	520	13,02	728,28	207	168
4	520	520	12,92	770,25	220	169
Průměr	519	520	12,53	756,56	225	175

Tabulka 29: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m³] VIP vzorku B

Vzorek č.	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost VIP ρ_v [kg/m ³]	Objemová hmotnost jádrového materiálu ρ_v [kg/m ³]
1	525	515	12,57	717,70	211	188
2	525	520	13,08	798,74	224	180
3	520	515	11,78	774,79	246	200
4	515	515	11,80	804,80	257	200
Průměr	521	516	12,31	774,01	234	192

Tabulka 30: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m³] VIP vzorku C

Vzorek č.	Délka h [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka d [mm]	Hmotnost m [g]	Objemová hmotnost VIP ρ_v [kg/m ³]	Objemová hmotnost jádrového materiálu ρ_v [kg/m ³]
1	520	525	13,40	785,06	215	189
2	530	515	13,48	728,51	198	188
Průměr	525	520	13,44	756,783	206	189

U vzorku C, směs bavlny s recyklovaným polyesterem, byly dodány pouze 3 kusy vakuového izolačního panelu, z čehož byl jeden poškozen, proto nebyl započítán do měření a je tedy menší počet zkušebních vzorků.

Na vakuových izolačních panelech se dále přeměřoval součinitel tepelné vodivosti hned po výrobě, která proběhla 27. 10. 2017 a následně před započítáním měření, což bylo přibližně po 10 dnech od výroby. Součinitel tepelné vodivosti se měřil vždy na dvou zkušebních vzorcích VIP. Výsledná hodnota součinitele tepelné vodivosti je dána vždy průměrem z těchto dvou panelů. V případě vzorku C (PES + bavlna) je dána hodnota pouze jednoho panelu, jelikož druhý byl porušen.

Tabulka 31: Srovnání objemových hmotností a součinitelů tepelné vodivosti u VIP

Vzorek	Objemová hmotnost VIP ρ_v [kg/m ³]	Objemová hmotnost jádrového materiálu ve VIP ρ_v [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti po výrobě λ [W/(m·K)]	Součinitel tepelné vodivosti po cca 10 dnech λ [W/(m·K)]
A - Čistý PES	225	175	0,00350	0,00372
B - Recyklovaný PES	234	192	0,00510	0,00497
C - PES + bavlna	206	189	0,00450	0,00590

Jak můžeme vidět, hodnoty měřeny po výrobě a před započítím měření se od sebe nijak moc neliší. V případě vzorku B je hodnota před měřením dokonce o málo nižší než po výrobě. Největší rozdíl je u vzorku C, kdy došlo k většímu nárůstu součinitele tepelné vodivosti, což uvidíme i v následující kapitole.

- **Stanovení zrychleného stárnutí**

Na vakuových izolačních panelech byla stanovena zkouška zrychleného stárnutí, kdy byl v různých časech měřen součinitel tepelné vodivosti a výsledkem byl graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na čase. Důvodem této zkoušky je odhadnout přibližnou životnost VIP po zabudování do konstrukce. První hodnota byla stanovena před započítím měření v čase 0. Následně byly vzorky uloženy do klimakomory a vystaveny teplotě 70 °C. Temperování na teplotu 70 °C proběhlo 16. 11. 2017.

Tabulka 32: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na čase u vzorku A

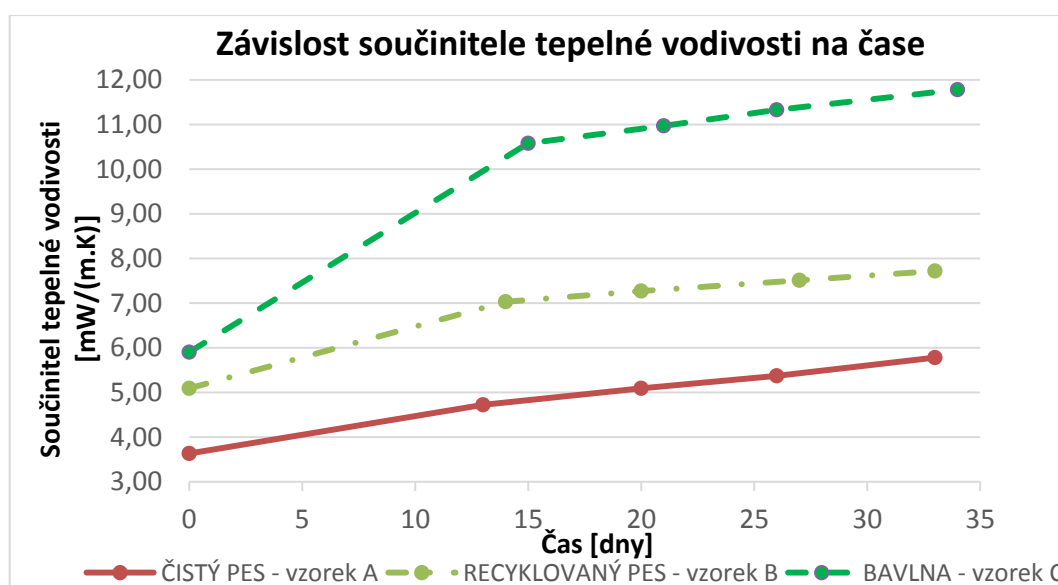
Datum	Čas [dny]	Tloušťka d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)]			
			λ_1	λ_2	λ_3	λ průměr
9.11.	0	10,408	0,00363	0,00363	0,00364	0,00363
29.11.	13	9,728	0,00472	0,00472	0,00472	0,00472
6.12.	20	9,665	0,00509	0,00509	0,00509	0,00509
12.12.	26	9,576	0,00538	0,00537	0,00537	0,00537
19.12.	33	9,538	0,00578	0,00578	0,00578	0,00578

Tabulka 33: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na čase u vzorku B

Datum	Čas [dny]	Tloušťka d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)]			
			λ_1	λ_2	λ_3	λ průměr
7.11.	0	10,262	0,00510	0,00509	0,00510	0,00509
30.11.	14	9,233	0,00703	0,00702	0,00702	0,00703
6.12.	20	9,188	0,00728	0,00728	0,00726	0,00727
13.12.	27	9,081	0,00751	0,00750	0,00751	0,00751
19.12.	33	9,093	0,00772	0,00774	0,00772	0,00772

Tabulka 34: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na čase u vzorku C

Datum	Čas [dny]	Tloušťka d [mm]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)]			
			λ_1	λ_2	λ_3	$\lambda_{\text{průměr}}$
8.11.	0	10,998	0,00589	0,00590	0,00590	0,00590
1.12.	15	10,185	0,01060	0,01055	0,01059	0,01058
7.12.	21	10,147	0,01097	0,01098	0,01095	0,01097
12.12.	26	10,071	0,01134	0,01134	0,01132	0,01133
20.12.	34	10,014	0,01180	0,01178	0,01175	0,01178



Graf 20: Závislost součinitele tepelné vodivosti λ [mW/(m·K)] na čase

V prvních dnech dochází k velkému zvýšení součinitele tepelné vodivosti, což je zapříčiněno tzv. outgassingem, kdy dochází k uvolňování zbytkové vlhkosti přibližně během prvních čtrnácti dní. Největší zvýšení nastalo u vzorku C, kdy dosahuje skoro dvojnásobné hodnoty oproti počáteční. Také můžeme vidět z naměřených hodnot, že jediný vzorek C se po 15 dnech dostal do setinových hodnot oproti vzorku A a B, kdy jejich hodnoty jsou pořád v tisícinách. I z grafu vidíme, že outgassing je nejmenší u vzorku A a trochu větší u vzorku B. V další fázi dochází k difúzi vlhkosti/páry, což způsobuje pomalejší nárůst součinitele tepelné vodivosti. Většinou je tento průběh lineární. Všechny vzorky vykazují přiměřeně stejné hodnoty vzrůstu součinitele tepelné vodivosti vlivem difuze.

ZÁVĚR

V diplomové práci byla zpracována rozsáhlá literární rešerše výzkumných prací, které se zabývaly vývojem vakuových izolačních panelů. Jelikož se téma nachází v neustálém procesu zlepšování, jsou obsaženy články s různou podporou zlepšování v tomto tématu. Neustálé shromažďování a publikování poznatků vede k zdokonalení a odstranění problémů, které vakuové izolační panely stále nesou.

Na základě těchto poznatků byla jako první vybrána vlákna, ze kterých byly zhotoveny jádrové izolanty. Zkoumalo se šest druhů vláken, a to akrylová vlákna, tři druhy polyesterových vláken a dva druhy bavlněných vláken. Kritérium výběru byla tloušťka a délka vláken. Přihlíženo bylo také na barvu a tvar vláken. Akrylová vlákna měla nejmenší průměrnou tloušťku vláken a to 2,70 μm s průměrnou délkou 3,43 cm. Byla také nejjemnější, avšak právě pro jejich jemnost nemohla být použita, jelikož bylo nemožné vlákna rozpojit k vyhotovení jádrového izolantu. U polyesterových vláken byly dodány tři druhy vláken. První – Stable fiber white, low melting měla tloušťku vláken 14,99 μm a délku 4,73 cm. Druhé – Regenerated fiber raw white měla tloušťku 12,41 μm a délku 4,99 cm. Třetí – Regeneratfaser Win super a grade měla tloušťku 12,26 μm a délku 3,55 cm. Všechna polyesterová vlákna byla zakroucená a jemná. U bavlněných vláken byly dodány dva druhy vláken. První – Spanien SG/Ramos 13 1.3./3" měla tloušťku vláken 12,74 μm a délku vláken 2,66. Druhý – CIS DIV/Funty/HB1.3/32" měla tloušťku vláken 10,80 μm a délku 2,61 cm. Všechna bavlněná vlákna byla točitá a střapatá. Všechny vlákna byla bílé barvy. Na základě poznatků a zkušeností z již dřívějších měření byla vybrána pro výrobu jádrových materiálů vlákna nejtenčí a nejkratší, a to polyesterové vlákno značené Regeneratfaser Win super a grade a bavlněné vlákno značené CIS DIV/Funty/HB1.3/32". Jelikož nebylo použito akrylové vlákno, byla vybrána ještě vlákna z primárního polyesteru s tloušťkou 1,2 dtex.

Následně na to se musela provést zkouška pro výběr optimální sušící teploty, která je potřebná u výroby VIP. Pro tuto zkoušku bylo vybráno 7 vzorků, které byly podrobeny teplotám 105 °C, 140 °C a 180 °C. Všechny vzorky byly sušeny po 30 minutách po dobu 5,5 hodin a následně se měřily po dnech v časových možnostech. Následně byly dosušeny při teplotě 180 °C, což u mnoha vzorků na organické bázi zapříčinilo

zničení. Nejvíce náchylný byl vzorek 7, rohož s poddílem lnu a bavlny. Posouzením grafů jsme dospěli k závěru, volit optimální teplotou 160 °C, s ohledem na organické materiály. Také vidíme, že po 4 hodinách sušení již nejsou rozdíly hodnot tak patrné, což znamená, že 4 hodiny jsou dostatečné k odstranění zbytkové vlhkosti.

Vybraná vlákna byla poptána firmou Retex k vyhotovení zkušebních vzorků pro laboratorní měření. Vyhotovené vzorky pro laboratorní měření měly výrobní rozměry (200 x 200 x 11) mm, kdy tloušťka vlivem expanze a relaxace nabyla. Proto se následně stanovila objemová hmotnost. Ta se stanovovala na vzorcích bez zatížení a při měření, které byly pod zatížením přístroje, který simuloval stlačení při výrobě na vakuové izolační panely. Avšak tak silné stlačení přístroj nevyvolal. Největší objemovou hmotnost bez zatížení měl vzorek B, recyklovaný polyester, s průměrnou hodnotou 131 kg/m³. Vzorky A, z čistého polyesteru, dosáhly průměrné objemové hmotnosti 109 kg/m³ a nejmenší objemovou hmotnost měly vzorky C, ze směsi bavlněných a recyklovaných polyesterových vláken, s průměrnou hodnotou 81 kg/m³.

Objemová hmotnost vzorků se pak při měření výrazně zvýšila. Vzorek A, čistý polyester, dosáhl objemové hmotnosti při prvním měření 148 kg/m³ a při posledním měření dosáhl až 164 kg/m³. Což je velmi výrazná změna oproti původní objemové hmotnosti bez zatížení 109 kg/m³. U vzorku B, recyklovaný polyester, se objemová hmotnost při měřeních neměnila. U prvního i posledního měření dosáhla 175 kg/m³. Což je sice změna oproti původní bez zatížení, kdy dosáhla 131 kg/m³, ale při měření se nijak neměnila. Za prvé to znamená, že je vzorek pevný a odolný, na druhou stranu je potřeba vyvinout větší sílu k dosažení potřebné tloušťky, například u výroby pro VIP. U vzorku C, směs bavlněných a polyesterových vláken, dosáhla objemová hmotnost při prvním měření 123 kg/m³ a při posledním 138 kg/m³, což je oproti původní objemové hmotnosti (81 kg/m³) vyšší změna, avšak není až taková u objemových hmotností při měření oproti vzorku A.

Následně se na takto vyrobených vzorcích stanovil součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tlaku i v závislosti na teplotě při vakuu. Je jasné, že součinitel tepelné vodivosti se vzrůstajícím tlakem roste, což potvrzuje graf 15, avšak je potřeba zjistit při jakém tlaku je součinitel tepelné vodivosti vzorku ještě použitelný v aplikaci vakuových izolací. Testuje se to zejména pro zjištění životnosti vakuových izolací, jelikož se časem v izolačních panelech zvyšuje tlak. Z naměřených hodnot vykazuje nejnižší hodnoty vzorek A, čistý polyester, s hodnotou součinitele tepelné vodivosti při vakuu 0,00253

W/(m·K) a při normálním tlaku 0,03175 W/(m·K). Vzorek B, recyklovaný polyester, dosáhl velmi podobných hodnot jako vzorek A, avšak jsou hodnoty mírně vyšší. Při vakuu dosáhl součinitel tepelné vodivosti 0,00276 W/(m·K) a při normálním tlaku 0,03197 W/(m·K). Vzorek C, směs bavlny s recyklovaným polyesterem, dosáhl součinitele tepelné vodivosti při vakuu 0,00333 W/(m·K) a při normálním tlaku 0,03275 W/(m·K). Vzorek C dosáhl oproti vzorkům A a C vyšších hodnot, nejspíše pro jeho nízkou objemovou hmotnost, čímž je i více citlivý na změny tlaku.

Při měření součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě se uvažovalo s faktem, že při vyšší teplotě také stoupá součinitel tepelné vodivosti. Avšak u vzorku A, čistý polyester, jsme narazili na opak. Při tak nízkém tlaku ovlivňuje součinitel tepelné vodivosti každý parametr zkušební vzorku. Při 10 °C byl součinitel tepelné vodivosti 0,00253 W/(m·K), při 20 °C klesl na 0,00248 W/(m·K) a při 30 °C klesl na 0,00231 W/(m·K). Je to velice příznivý fakt, který se projeví při zabudování, kde bude vystaven vyšším teplotám. Z čehož plyne vyšší trvanlivost. Je to způsobeno především vhodnou orientací vláken a jejich jemností. Vzorek B měl při 10 °C součinitele tepelné vodivosti 0,00276 W/(m·K), při 20 °C se zvýšil na 0,00292 W/(m·K) a při 30 °C klesl na 0,00289 W/(m·K). Opačný průběh měl vzorek C, směs bavlny a polyesteru. Při 10 °C měl součinitele tepelné vodivosti 0,00333 W/(m·K), při 20 °C klesl na 0,00314 W/(m·K), ale při 30 °C se naopak výrazně zvýšil na hodnotu 0,00372 W/(m·K). U vzorku B a C je důležitá změna tlaku uvnitř zkušební komory, která může způsobovat výkyvy hodnot.

Firma Retex vyhotovila z vybraných vláken i zkušební vzorky pro výrobu VIP, avšak v rozměrech přibližně (500 x 500) mm. Ty byly ve firmě Turvac ve Slovinsku zavakuovány. Na vzorcích se měřila objemová hmotnost celého panelu, tedy i s obálkou a samotného jádrového izolantu. Vzorek A, čistý polyester, měl objemovou hmotnost VIP 225 kg/m³ a jádrového izolantu 175 kg/m³. Vzorek B, recyklovaný polyester, měl objemovou hmotnost VIP 234 kg/m³ a jádrového izolantu 192 kg/m³. Vzorek C, směs bavlny a polyesteru, měl objemovou hmotnost VIP 206 kg/m³ a jádrového izolantu 189 kg/m³.

Již ve Slovinsku se po výrobě měřila první hodnota součinitele tepelné vodivosti. Vzorek A, čistý polyester, měl po výrobě součinitel tepelné vodivosti 0,00349 W/(m·K), vzorek B, recyklovaný polyester 0,00510 W/(m·K) a vzorek C, směs bavlny a polyesteru, 0,00450 W/(m·K). Před měřením se součinitel tepelné vodivosti znovu

měřil. Naměřené hodnoty se moc nelišily od změřených ve výrobě. Následně byly vzorky připraveny pro zkoušku zrychleného stárnutí, kterou popisuje pan docent Kunič. Vzorky byly uloženy do klimakomory, kde se teplota temperovala na 70 °C. Měření probíhalo v různých dnech, a i mezi měřeními byly vzorky vystaveny zvýšené teplotě. Pokud porovnáme výsledky z posledního dne měření, což bylo obvykle kolem 30 dní, tudíž cca měsíc, s výrobními součiniteli tepelné vodivosti, vidíme nárůst součinitele tepelné vodivosti v čase, který by mohl odpovídat životnosti VIP, jelikož byly simulovány podmínky užívání zvýšenou teplotou. Vzorek A, dosáhl po cca měsíci součinitele tepelné vodivosti 0,00578 W/(m·K), vzorek B 0,00772 W/(m·K) a vzorek C 0,01178 W/(m·K). Opět vidíme (jako u stanovení součinitele tepelné vodivosti na jádrových izolantech pro laboratorní měření), že nejlepší výsledky má vzorek A. Vzorek B má hodnotu součinitele tepelné vodivosti poněkud vyšší, avšak rozdíl oproti výrobní je obdobný jako u vzorku A. Nejvyšší hodnotu i rozdíl oproti výrobní dosáhl vzorek C, kdy se dokonce hodnota součinitele tepelné vodivosti posunula o řád. V grafu 17, vidíme grafické znázornění výsledných hodnot u všech měřených časů.

Cílem diplomové práce bylo navrhnout jádrový materiál pro minimálně středně dobé aplikace. Z výsledků bychom mohli v tomto experimentu vyřadit vzorek C, jelikož ze vzorků vykazoval vždy nejhorší výsledky. Jelikož jsou obsaženy ve všech vzorcích polyesterová vlákna, můžeme předpokládat, že pro vakuové izolace nejsou vhodná bavlněná vlákna, jelikož byly jediné obsaženy ve vzorku C. Horší výsledky mohou být také zapříčiněny malou objemovou hmotností, což může vést k ověření na dalším experimentu: stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti u směsi bavlněných a polyesterových vláken.

Naopak vzorek A a B vykazují velmi dobré výsledky. Hodně výrobců VIP určují 1 mbar jako limitní pro životnost VIP, a i v tomto tlaku dosahují vzorky přípustných hodnot. Vzorek A dokonce vykazuje slibné chování při zvýšené teplotě. Z ekonomického i ekologického hlediska, jelikož oba vzorky vykazují dobré výsledky, by mohlo dojít k prozkoumání nového jádrového izolantu, a to smísit vzorek A a B, tedy vlákna z čistého polyesteru s recyklovanými, aby došlo k znovuvyužití druhotné suroviny.

Dalším cílem diplomové práce bylo ekonomické zhodnocení konkurenceschopnosti na trhu. Jako první bych uvedla, kolik stála výroba jádrových izolantů pro tento experiment. Ceny jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 35: Přehled cen

Druh vláken	Cena vláken [€/kg]	Výroba jádrového izolantu [€/kg]	Celková cena za jádrový izolant [€/kg]
Polyester	1,52	1,52	3,04
Recyklovaný polyester	1,39	1,39	2,78
Bavlna	1,71	1,71	3,42

Na trhu se můžeme setkat s mnoha cenami, avšak nejvíce narazíme na jádrový materiál ze skleněných vláken, proto je důležité prozkoumat všechny parametry. Cena skleněných vláken se pohybuje okolo 0,83-1,65 €/kg. Nízká cena je nejspíš zapříčiněna tím, že VIP s tímhle druhem jádrového izolantu je již hojně využíván. Dalším, velmi používaným jádrovým materiálem, je pyrogenní oxid křemičitý, jeho cena se pohybuje okolo 1,25-4,16 €/kg. Jelikož každá výroba je specifická, je náročné srovnat přímo cenu hotového jádrového izolantu. I když můžeme předpokládat, že výrobní náklady jsou pro každý typ srovnatelné. Dle uvedených hodnot lze vidět, že ceny vláken, či materiálu, použitého pro výrobu jádrového izolantu, jsou přibližně na stejné cenové úrovni. Nejlevnějším materiálem jsou skleněná vlákna, dále jsou vlákna použitá v téhle práci a dražším materiálem je pyrogenní oxid křemičitý. Avšak do výroby vstupuje objemová hmotnost jádrového izolantu, jelikož každé vlákno je specifické svými rozměry a hmotností a na danou objemovou hmotnost se použije jiné množství vláken.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZHUANG, Jiandong, Seyed Hamidreza GHAFAR, Mizi FAN a Jorge CORKER. Restructure of expanded cork with fumed silica as novel core materials for vacuum insulation panels. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, **127**, 215-221 [cit. 2017-10-22]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.06.019. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836817303682>
- [2] NEMANIČ, V. a M. ŽUMER. New organic fiber-based core material for vacuum thermal insulation. *Energy and Buildings* [online]. 2015, **90**, 137-141 [cit. 2017-10-22]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.01.012. ISSN 03787788. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778815000158>
- [3] 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* [online]. 2009, **52**(23-24), 5525-5532 [cit. 2017-10-22]. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.029. ISSN 00179310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931009003937>
- [4] REICHENAUER, G., U. HEINEMANN a H.-P. EBERT. Relationship between pore size and the gas pressure dependence of the gaseous thermal conductivity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [online]. 2007, **300**(1-2), 204-210 [cit. 2017-10-22]. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.01.020. ISSN 09277757. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775707000453>
- [5] TSENG, P.C. a H.S. CHU. The effects of PE additive on the performance of polystyrene vacuum insulation panels. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2009, **52**(13-14), 3084-3090 [cit. 2017-10-22]. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.01.033. ISSN 00179310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931009001197>

- [6] LI, Cheng-Dong, Zheng-Cai DUAN, Qing CHEN, Zhao-Feng CHEN, Fred Edmond BOAFO, Wang-Ping WU a Jie-Ming ZHOU. The effect of drying condition of glassfibre core material on the thermal conductivity of vacuum insulation panel. *Materials & Design* [online]. 2013, **50**, 1030-1037 [cit. 2017-10-22]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.03.021. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913002215>
- [7] WANG, Jian, Ying ZHAN, Wei WEI, Shujun CHEN a Rongshun WANG. A new cost effective composite getter for application in high-vacuum-multilayer-insulation tank. *Vacuum* [online]. 2016, **131**, 44-50 [cit. 2017-10-22]. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.05.025. ISSN 0042207x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X16301567>
- [8] POLYESTER FIBRE: Fibre manufacturing process. *TextileTechInfo* [online]. 2012 [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <http://textiletechinfo.com/spinning/POLYESTERmanu.htm>
- [9] Textile Processes: Polyester Manufacturing. *TEonline.com* [online]. [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <http://www.teonline.com/knowledge-centre/polyester-manufacturing.html>
- [10] *Cetex-Rheinfaser* [online]. Ganderkese, 2002 [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <http://cetex-rheinfaser.de/>
- [11] Cotton: FIBRE AND PLANT. *Encyclopedia Britannica* [online]. Hans-Dietrich H. Weigmann, 2017 [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/topic/cotton-fibre-and-plant>

- [12] What Is Acrylic Fiber? AKSA [online]. Turecko, 2001 [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <http://www.aksa.com/en/products/what-is-acrylic-fiber-/what-is-acrylic-fiber-/i-56>
- [13] prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA. *Plastické látky*. Brno, 2007. 161 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [14] VIP: STRIPRES® CONTACTLESS, BATTERYLESS SENSOR FOR PRESSURE MEASUREMENT IN VACUUM INSULATION PANELS. Strip's: customized innovations [online]. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <https://www.strips.eu/en/innovations/vip/>
- [15] Quality Control: Patented va-Q-tec Test System. Va-Q-tec [online]. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <https://www.va-q-tec.com/en/technology/vip/quality-control-va-q-check.html>
- [16] Vacuum Insulation Panels. VIPA global association [online]. [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://vipa-international.com/vacuum-insulation-panels>
- [17] KUNIC, Roman. Vacuum Insulation Panels - An Assessment of the Impact of Accelerated Ageing on Service Life [online]. [cit. 2017-12-01]. DOI: 10.5545/sv-jme.2012.539. ISBN 10.5545/sv-jme.2012.539. Dostupné z: <http://www.sv-jme.eu/article/vacuum-insulation-panels-vip-an-assessment-of-the-impact-of-accelerated-ageing-on-service-life/>
- [18] JUNG, Haeyong, Inseok YEO a Tae-Ho SONG. Al-foil-bonded enveloping and double enveloping for application to vacuum insulation panels [online]. [cit. 2017-12-01]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.08.045. ISBN 10.1016/j.enbuild.2014.08.045. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814006884>

- [19] JUNG, Haeyong, Choong Hyo JANG, In Seok YEO a Tae-Ho SONG. Investigation of gas permeation through Al-metallized film for vacuum insulation panels [online]. [cit. 2017-12-01]. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.09.013. ISBN 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.09.013. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931012007077>
- [20] BOUQUEREL, Mathias, Thierry DUFORESTEL, Dominique BAILLIS a Gilles RUSAOUEN. Mass transfer modeling in gas barrier envelopes for vacuum insulation panels: A review [online]. [cit. 2017-12-01]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.09.004. ISBN 10.1016/j.enbuild.2012.09.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778812004525>
- [21] ALAM, M., H. SINGH a M.C. LIMBACHIYA. Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions [online]. [cit. 2017-12-02]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.04.040. ISBN 10.1016/j.apenergy.2011.04.040. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261911002753>
- [22] BOAFO, Fred Edmond, Zhaofeng CHEN, Chengdong LI, Binbin LI a Tengzhou XU. Structure of vacuum insulation panel in building system [online]. [cit. 2017-12-02]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.06.055. ISBN 10.1016/j.enbuild.2014.06.055. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814005490>
- [23] KWON, Jae-Sung, Choong Hyo JANG, Haeyong JUNG a Tae-Ho SONG. Vacuum maintenance in vacuum insulation panels exemplified with a staggered beam VIP [online]. [cit. 2017-12-02]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.10.029. ISBN 10.1016/j.enbuild.2009.10.029. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778809002783>
- [24] doc. RNDr. Pavel Schauer, CSc., *Aplikovaná fyzika, modul 4: přenos tepla*. Brno 2006. 40. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební

- [25] Vakuová izolace: Izolace s vysokým tepelným odporem i při malé tloušťce [online]. Hradec Králové: redakční kolektiv, 2009 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/vakuova-izolace/>
- [26] Stavební tepelné izolace, část III. - Aerogel a vakuová izolace: Vakuová izolace[online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2015 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://www.izolace-info.cz/aktuality/?nid=20479-stavebni-tepelne-izolace-cast-iii-aerogel-a-vakuova-izolace.html#.WjDe_1Xyi71
- [27] Pasivní solární energie - nové trendy: Transparentní tepelná izolace [online]. Brno: VUT BRNO, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, 2003 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-zisky-a-zastineni/1705-pasivni-solarni-energie-nove-trendy>
- [28] Jaké jsou další možnosti tepelné izolace? [online]. Ekologický institut Veronica: Mgr. Ing. Petr Ledvina, 2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://wiki.ekoporadna.cz/index.php?title=Jak%C3%A9 Jsou_dal%C5%A1%C3%AD_mo%C5%BEnosti_tepeln%C3%A9_izolace%3F
- [29] ERBENICH, Gregor. HOW TO IDENTIFY A HIGH QUALITY VIP: Methods and techniques to guarantee high quality in production and application [online]. , 1-10 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: http://oisd.brookes.ac.uk/ivisnet/resources/papers/1A_Gregor%20Erbenich.pdf
- [30] Fumed silica. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fumed_silica
- [31] Délkové textilie. Škola textilu: e-LTex [online]. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/436/textilni-terminologie-zboziznalstvi/tkaniny/Delkove-textilie.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

VIP – vakuový izolační panel (Vacuum insulation panel)

APM – pokročilé porézní materiály (Advanced porous materials)

COP- střed panelu (centre of panel)

RTE - rovnice radiálního přenosu (radiative transfer equation)

PE – polyetylen

PS – polystyren

ASTM – společnost provádějící standardizace, certifikace apod.

EKO – firma zabývající se meteorologickou a environmentální aplikací

PdO – Oxid palladnatý

AgO – Oxid stříbrnatý

CuO – oxid měďnatý

C – uhlík

H₂ – vodík

N₂ – dusík

O₂ – kyslík

He – Helium

XRD – Rentgenová difrakční analýza

XPS – rentgenová fotoelektronová spektroskopie

TEM – transmisní elektronový mikroskop

MF – melamin-formaldehyd

CP – kontinuální polymerace

PTA – čistý kyselina teraftalová

MEG – monoethylenglykol

PET – polyethylentereftalát

PCDT – poly-1,4-cyklohexylen-dimethylentereftalát

ISO – Mezinárodní organizace pro normalizaci

BISFA – Mezinárodní kancelář pro normalizaci syntetických vláken

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Plynná vodivost s různými velikostmi pórů jako funkce tlaku plynu [3]	24
Graf 2: Tepelná vodivost jako funkce tlaku dusíku při RT pro různé otevřené porézní materiály [4].....	27
Graf 3: Ohřívací křivky vzorků materiálu VIP jádra při různých teplotách sušení (Ti1, Ti2, Ti3 a Ti4, Ts1, Ts2, Ts3 a Ts4) označují vnitřní teploty a povrchové teploty jádrového materiálu pro sušení při 110 ° C, 130 ° C, 150 ° C a 170 ° C [6]	31
Graf 4: Vztah mezi pórovým tlakem jádrového materiálu a tepelnou vodivostí vitálních skelných vláken [6]	33
Graf 5: Sledovací křivky průměrné tepelné vodivosti VIP s jádrovými materiály v různých podmínkách sušení [6]	34
Graf 6: Změna mezivrstvového tlaku ve zkušební nádrži [7].....	37
Graf 7: Adsorpční vlastnosti CuO, CuO a 5A a CuO a C u různých AST a stejné IHP 50 Pa[7].....	38
Graf 8: Stárnutí vakuových izolačních panelů (VIP); očekávaný čas kdy tepelná vodivost dosahuje dvojnásobku počáteční hodnoty μ_n v závislosti na teplotě životnosti	49
Graf 9: Stárnutí vakuové izolační vrstvy (VIP): očekávaný čas při dosažení hodnoty tepelné vodivosti 12 mW/(m·K) s provozní teplotou	49
Graf 10: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 1 (skleněná rohož měkká).....	63
Graf 11: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 2 (skleněná rohož tvrdá)	64
Graf 12: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 3(Izolace z čistého PES – měkká) 65	
Graf 13: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 4 (Izolace z čistého PES – tvrdá). 66	
Graf 14: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 5 (Rohož s podílem bavlněných vláken)	67
Graf 15: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 6 (rohož s podílem recyklovaných PES vláken).....	68
Graf 16: Úbytek vody v závislosti na čase u vzorku 7 (Rohož s podílem lnu a bavlny) 69	
Graf 17: Závislost součinitele tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] na tlaku	74

Graf 18: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] vzorků A, B, C při vakuu	74
Graf 19: Závislost součinitele tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] na teplotě při vakuu	75
Graf 20: Závislost součinitele tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] na čase.....	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Úprava pyrogenního oxidu křemičitého v ohni [30].....	17
Obrázek 2: Struktura obálky VIP.....	18
Obrázek 3: Struktura obálky VIP.....	18
Obrázek 4: Struktura obálky VIP.....	19
Obrázek 5: Struktura obálky VIP.....	19
Obrázek 7: šestiúhelníkový uzavřený model [3]	20
Obrázek 6: jednoduchý kubický model [3].....	20
Obrázek 8: Jednoduchý kubický model pěny s otevřenými buňkami [3].....	21
Obrázek 9: Síť tepelné odolnosti elementární buňky [3].....	22
Obrázek 10: Jednoduchý model vláknité izolace [3].....	22
Obrázek 11: Rozložená struktura nosníku [3]	23
Obrázek 12: Vícevrstvý střídavý paprsek s radiačními štíty [3].....	24
Obrázek 13: Schematický proces systému dvojího regulace tlaku pro modulaci tvarovacího tlaku [5].....	28
Obrázek 14: (a) vzorek PE0L4 pro jádrový materiál PS bez přísady PE (b) vzorek PE2L1 pro jádrový materiál PS s 2% PE přísadou. (c) vzorek PE5L3 pro PS jádrový materiál s 5% PE přísadou [5]	28
Obrázek 15: Výrobní proces vrstev jádra ze skelného vlákna [6]	30
Obrázek 16: (a) Přehled schématu sušení: a) schematické kreslení struktury trouby; (b) mechanismy přenosu tepla během konvekčního sušení [6].....	32
Obrázek 17: Experimentální zařízení [7].....	36
Obrázek 18: Obrázek syntetizovaných MF vláken [2]	40
Obrázek 19: Va-Q-check [15] Obrázek 20: VIP od firmy Va-q-tec se senzorem pro měření kvality [15]	45
Obrázek 21: Laboratorní měření tepelné vodivosti [17].....	47
Obrázek 24: Bavlněná vlákna	52
Obrázek 23: Polyesterová vlákna	52

Obrázek 22: Akrylová vlákna	52
Obrázek 25: Zleva: vzorek A – primární PES vlákna; vzorek B – recyklované PES vlákna; vzorek C – recyklované PES vlákna s podílem bavlněného vlákna	53
Obrázek 26: Vzorčky pro stanovení vlhkosti materiálu	54
Obrázek 27: Vakuové izolační panely	55
Obrázek 28: Mikroskop Levenhuk D670T 5.1M	55
Obrázek 29: Příklad na stanovení tloušťky	56
Obrázek 30: Měření vzorku	56
Obrázek 31: Váha	57
Obrázek 32: Měřicí přístroj FOX200 vacuum.....	58
Obrázek 33: Příklad na měření součinitele tepelné vodivosti VIP	58
Obrázek 34: Sušárna	59
Obrázek 35: Klimakomora.....	59
Obrázek 36: Bavlněné vlákno při 40násobném zvětšení	60
Obrázek 37: Akrylové vlákno při 40násobném zvětšení	60
Obrázek 38: Polyesterové vlákno při 40násobném zvětšení	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Tepelná vodivost různých jádrových materiálů pro VIP [3]	25
Tabulka 2: Hustota, porozita a průměrná velikost pórů odvozená analýzou závislosti tlaku na tepelnou vodivost [4]	26
Tabulka 3: Průměrná tepelná vodivost VIP s jádrovým materiálem při různých podmínkách sušení [6]	34
Tabulka 4: Informace o pokusech [7]	35
Tabulka 5: Výkony různých getrů [7]	39
Tabulka 6: Hodnocené vzorky	40
Tabulka 7: Srovnané metody [29]	44
Tabulka 8: Výsledné hodnoty tloušťky a délky vláken	60
Tabulka 9: Stanovení úbytku vody vzorku 1 (skleněná rohož měkká)	63
Tabulka 10: Stanovení úbytku vody vzorku 2 (skleněná rohož tvrdá)	64
Tabulka 11: Stanovení úbytku vody vzorku 3 (Izolace z čistého PES – měkká)	65
Tabulka 12: Stanovení úbytku vody vzorku 4 (Izolace z čistého PES – tvrdá)	66
Tabulka 13: Stanovení úbytku vody vzorku 5 (Rohož s podílem bavlněných vláken) ..	67
Tabulka 14: Stanovení úbytku vody vzorku 6 (rohož s podílem recyklovaných PES vláken)	68
Tabulka 15: Stanovení úbytku vody vzorku 7 (Rohož s podílem lnu a bavlny)	69
Tabulka 16: Vlastnosti jádrového izolantu vzorku A	70
Tabulka 17: Vlastnosti jádrového izolantu vzorku B	71
Tabulka 18: Vlastnosti jádrového izolantu vzorku C	71
Tabulka 19: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³] stanovená při měření vzorku A	72
Tabulka 20: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³] stanovená při měření vzorku V	72
Tabulka 21: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³] stanovená při měření vzorku C	72
Tabulka 22: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na tlaku vzorku A .	73
Tabulka 23: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na tlaku vzorku B .	73
Tabulka 24: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na tlaku vzorku C .	73

Tabulka 25: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na teplotě vzorku A	75
Tabulka 26: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na teplotě vzorku B	75
Tabulka 27: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na teplotě vzorku C	75
Tabulka 28: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³] VIP vzorku A.....	76
Tabulka 29: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³] VIP vzorku B.....	77
Tabulka 30: Objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³] VIP vzorku C.....	77
Tabulka 31: Srovnání objemových hmotností a součinitelů tepelné vodivosti u VIP....	77
Tabulka 32: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na čase u vzorku A	78
Tabulka 33: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na čase u vzorku B	78
Tabulka 34: Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] v závislosti na čase u vzorku C	79
Tabulka 35: Přehled cen	84