

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 712

ISSN 1213-418X

Jiří Zach

**VÝVOJ A STUDIUM CHOVÁNÍ
IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ
NA BÁZI SNADNOOBNOVITELNÝCH
A DRUHOTNÝCH SUROVIN
ZA NORMÁLNÍHO I SNÍŽENÉHO TLAKU**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební
Ústav technologie stavebních hmot a dílců

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

**VÝVOJ A STUDIUM CHOVÁNÍ
IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ NA BÁZI
SNADNOOBNOVITELNÝCH A DRUHOTNÝCH
SUROVIN ZA NORMÁLNÍHO I SNÍŽENÉHO TLAKU**

DEVELOPMENT AND STUDY OF THE BEHAVIOR OF INSULATION
MATERIALS BASED ON EASILY RENEWABLE AND SECONDARY RAW
MATERIALS UNDER NORMAL AND REDUCED PRESSURE

Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru
FYZIKÁLNÍ A STAVEBNĚ MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ



BRNO 2021

KLÍČOVÁ SLOVA

tepelně izolační materiály, vakuové izolační panely, snadnoobnovitelné suroviny, druhotné suroviny, součinitel tepelné vodivosti, superizolační materiály, šíření tepla

KEYWORDS

thermal insulation materials, vacuum insulation panels, easily renewable raw materials, secondary raw materials, thermal conductivity, superinsulating materials, heat transfer

© Jiří Zach, 2021

ISBN 978-80-214-6017-1

ISSN 1213-418X

OBSAH:

1. PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
2. ÚVOD.....	7
3. VÝVOJ VIP A JEJICH SOUČASNÝ STAV	8
4. ŠÍŘENÍ TEPLA VE STRUKTUŘE VIP	11
5. VYUŽITÍ JÁDROVÝCH IZOLANTŮ NA BÁZI SNADNOOBNOVITELNÝCH A DRUHOTNÝCH SUROVIN PRO VÝROBU VIP	13
6. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	25
7. ZÁVĚR.....	27
8. POUŽITÁ LITERATURA	28
9. PŘEHLED AUTOROVÝCH NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH PUBLIKACÍ.....	31
9.1 Původní vědecká práce ve vědeckém časopisu s impakt faktorem	31
9.2 Původní vědecká práce ve vědeckém časopisu	32
10. KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI.....	36
11. ABSTRACT	38

1. PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: Jiří Zach

Datum a místo narození: 03. 07. 1977 v Brně

Adresa do zaměstnání:

Ústav technologie stavebních hmot a dílců,

Fakulta stavební VUT v Brně

Veveří 331/95, 602 00 Brno, ČR

Telefon: 541 147 516, fax 541 147 502

E-mail: zach.j@fce.vutbr.cz



Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- maturita – 1995, Gymnázium Lerchova v Brně;
- Ing. – 2000, Fakulta stavební VUT v Brně; obor Stavebně materiálové inženýrství;
- Ph.D. – 2004, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství;
- doc. – 2016, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství.

Zaměstnání, odborná praxe:

- 2001-doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 95, 602 00 Brno, Výzkumný pracovník;
- 2002-doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 95, 602 00 Brno; tady chybí pozice;
- Akademický pracovník (asistent, od roku 2004 odborný asistent, od roku 2016 docent);
- 2003-doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 95, 602 00 Brno, Technický pracovník Akreditované zkušební laboratoře při UTHD;
- 2004 - 2012 Znalecký ústav Stavexis s.r.o., Žižkova 63, 616 00 Brno, Technický pracovník;
- 2011-doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, Veveří 95, 602 00 Brno, Administrativní manažer centra;
- 2012-doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, Veveří 95, 602 00 Brno, Senior researcher.

Výzkumné zaměření

Vývoj a studium vlastností pokročilých tepelně izolačních materiálů (především materiálů na bázi druhotných a snadnoobnovitelných surovin a super izolačních materiálů), vývoj pokročilých tepelně izolačních a akustických výrobků (především zdicích prvků, tepelně izolačních a sanačních malt a omítek), a řešení problémů v oblasti stavební fyziky.

Přehled udělených projektů (řešitel)

1. ASO 19/2007 „Tepelně technické vlastnosti vysokohodnotného betonu“, Výzkumná příhraniční spolupráce s Rakouskem, řešitel, 2007–2008,

2. Výzkumný grant GAČR 103/08/P265 „Výzkum a vývoj energeticky a environmentálně úsporných tepelně izolačních materiálů“, řešitel, 2008–2010,
3. Výzkumný projekt MPO FR-TI1/253 MPO TI3/231 „Vývoj zděných konstrukcí za účelem zlepšení užitných vlastností staveb“, řešitel, 2011–2013,
4. Project MOBILITY 7AMB12AT009 “Studium chování pokročilých silikátových materiálů využitelných při zateplování a sanaci staveb“, řešitel, 2012–2013,
5. GA 13-21791S Studium transportu tepla a vlhkosti ve struktuře izolačních materiálů na bázi přírodních vláken, řešitel, 2013–2016,
6. Project MOBILITY AMB14ATE003 “Studium procesu šíření tepla a vlhkosti ve struktuře pokročilých silikátových materiálů využitelných při zateplování a sanaci staveb“, řešitel, 2014–2015,
7. TA04020749 „Vývoj skladeb určených pro nízkoenergetické a pasivní stavby s využitím materiálů na přírodní bázi“, TAČR, řešitel, 2014–2017,
8. TA04020920 s názvem „Vývoj a výzkum pokročilých zdících systémů pro bezpečnou a energeticky a environmentálně úspornou výstavbu“, TAČR, řešitel, 2014–2017,
9. Výzkumný projekt GAČR 17-00243S „Studium chování izolačních materiálů za extrémně sníženého tlaku“, řešitel 2017–2019,
10. Výzkumný projekt MPO FV20086 „Vývoj lehkých novodobých stavebních materiálů s využitím lehkého kameniva na bázi odpadní skleněné moučky“, řešitel 2017–2020,
11. Výzkumný projekt MPO FV20127 „Výzkum a vývoj pokročilých tepelně a akusticko izolačních materiálů na bázi odpadního textilu a přírodních vláken, řešitel 2017–2020,
12. Výzkumný projekt TAČR TH04020378 „Vývoj nových technologií a výrobků pro udržitelnou výstavbu v oblasti zděných konstrukcí“, řešitel 2019–2022,
13. Projekt MŠMT MOBILITY 8J19AT014 „Studium vnitřního mikroklimatu interiéru budov se zelenými stěnami a jejich vlivu na lidské zdraví“, řešitel 2019–2021.

Přehled pedagogické činnosti

- Byl řešitelem nebo spoluřešitelem tří projektů FRVŠ v oblasti inovace studijních předmětů:
 - Projekt FRVŠ G1 1315/2009 „Inovace předmětu Speciální izolace“, spoluřešitel 2009,
 - Projekt FRVŠ 465/2011/G1 Inovace studijního předmětu Izolační materiály – spoluřešitel,
 - Projekt FRVŠ 2622/2012/F1 Inovace studijního předmětu Fyzika stavebních látek se zavedením nové úlohy – řešitel,
- V době podání žádosti o zahájení profesorského řízení byl garantem tří předmětů:
 - BJ13 – Speciální izolace, Stavební inženýrství – Bakalářský studijní program,
 - BJ006 – Fyzika stavebních látek, Stavební inženýrství – Bakalářský studijní program,
 - BJ007 – Izolační materiály, Stavební inženýrství – Bakalářský studijní program,
- Byl školitelem dvou studentů, kteří získali titul Ph.D.:
 - Ing. Jitka Hroudová, Ph.D.,
 - Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.,
- Byl vedoucím 24 obhájených bakalářských prací a 32 obhájených diplomových prací,
- Podílil se na výuce předmětů: BJ13 – Speciální izolace, BJ006 – Fyzika stavebních látek, BJB025 – Progressivní stavební materiály, BJ054 - Bakalářský seminář (M), BJ007 – Izolační materiály, CJ011 – Optimalizace užití stavebních látek, NJA027 – Aplikovaný software, BI002 - Zkušebnictví a technologie, CJ008 Diplomový seminář (M), DJ04 – Doktorský seminář IV (FMI), DJ05 – Doktorský seminář V (FMI).

Přehled publikační a tvůrčí činnosti

- Autor nebo spoluautor celkem 439 vědeckých publikací (z toho 16 publikací v impaktovaných časopisech),
- Spoluautor 2 odborných příruček,
- Autor nebo spoluautor 39 znaleckých posudků,
- Počet citací vědeckých prací bez autocitací: 358 (dle Web of Science),
- Autor nebo spoluautor 2 prototypů, 20 ověřených technologií, 30 funkčních vzorků a 1 certifikované metodiky,
- Spoluautor 1 učebnice a 3 skript.

2. ÚVOD

Globální klimatické změny, omezené množství neobnovitelných surovin a stále se zvyšující nároky na energetické úspory ve všech průmyslových odvětvích, stavebnictví nevyjímaje, jsou důvody pro vývoj nových pokročilých materiálů a studium jejich vlastností. Využití snadnoobnovitelných a druhotných surovin má zásadní význam, aby bylo možné dosáhnout udržitelného rozvoje v souladu s principy oběhového hospodářství.

Z pohledu úspor energie se v oblasti stavebnictví jedná především o oblast tepelné ochrany budov [1] a jejich energetické náročnosti [2, 3]. Jedná se o spotřebu energie na vytápění v zimním období a spotřebu energie na chlazení v období letním. Jedná se také o úspory v oblasti energetické náročnosti spotřebičů v oblasti vybavení budov, včetně energetických a dalších technických zařízení budov. Základním předpokladem pro snížení energetické náročnosti budov a energetických spotřebičů je snížení tepelných ztrát prostupem tepla pláštěm budov nebo spotřebičů (např. ledničky, trouby apod.). Pro splnění těchto požadavků je v současnosti nutné používat nové tepelné izolační materiály s nízkou a v některých případech s extrémně nízkou hodnotou tepelné vodivosti. Materiály s extrémně nízkou hodnotou tepelné vodivosti nazýváme superizolačními materiály a zahrnujeme do této skupiny izolanty vykazující tepelnou vodivost nižší než $0,025 \text{ W/(m.K)}$, což je hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchové vrstvy ($\lambda_{g, \text{air}}$)[4].

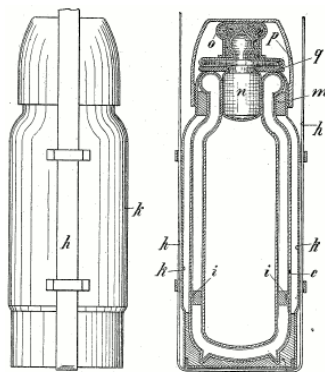
Vakuové izolační panely (VIP) představují nový typ pokročilých materiálů s extrémně nízkou hodnotou tepelné vodivosti, nejčastěji v rozmezí $0,001\text{--}0,004 \text{ W/(m.K)}$ [5, 6]. Extrémního snížení tepelné vodivosti (oproti konvenčním izolantům) je dosaženo efektivním snížením všech způsobů přenosu tepla ve struktuře VIP, kdy je jádrový izolant s extrémně jemnou pórovou strukturou zabalen do reflexní bariérové fólie (obálky), ze které je odsát vzduch až na úroveň nižší než 99% vakua [5–7]. Základem VIP je tedy jádrová izolace, která může být vyrobena z různých materiálů, které poskytují požadované technické vlastnosti [6]. Většina VIP na trhu se v současné době vyrábí s jádrovými izolanty na bázi pyrogenního SiO_2 (pyrogenní oxid křemičitý nebo nanosilika) nebo ultra jemných skleněných vláken. Existuje však řada výzkumných prací, které potvrzují, že v případě vláknitých izolantů je možné použít některé alternativní izolanty s jemnou strukturou pórů nebo velmi jemnými vlákny. Mezi tyto materiály patří melaminformaldehydová vlákna [8] a přírodní vlákna (rostlinná, živočišná). Hlavní výhodou přírodních vláken je, že se jedná o snadno obnovitelné nebo dokonce druhotné suroviny, což je důležité pro snižování emisí skleníkových plynů, zvyšování energetické účinnosti a zvyšování podílu obnovitelných zdrojů ve výrobním procesu [9, 10]. Přírodní vlákna vykazují obecně velmi nízkou tepelnou vodivost. I přes svoji relativně velkou tloušťku (v případě technických vláken) jsou tato vlákna pórovitá a při snížení tlaku u nich dochází k výraznému snížení tepelné vodivosti (obdobně, jako u materiálu na bázi skleněných vláken průmyslově využívaných pro výrobu VIP). Při použití přírodních materiálů jako tepelných izolantů je obecně problémem jejich vysoká citlivost vůči vlhkosti a následná degradace tepelné izolačních vlastností při narůstajícím vlhkostním obsahu. V případě využití přírodních vláken pro výrobu vakuových izolací jsou vlákna chráněna vůči vlhkosti bariérovou fólií tvořící obal vakuového izolačního panelu (panel navíc vždy obsahuje uvnitř aktivní vysoušedlo) proto je jejich využití v této oblasti zajímavé. Materiály s organickými/přírodními vlákny vykazují díky své nízké objemové hmotnosti a buněčné struktuře velmi dobré tepelně izolační vlastnosti, mnohdy lepší a výhodnější než materiály s vlákny anorganickými [11-13]. Chování těchto izolantů je však poněkud odlišné od chování izolantů syntetických (pěnoplastické látky, minerální vlna). Přírodní izolanty obsahují za normálních podmínek poměrně vysoké procento vlhkosti, které je nutné při výrobě VIP plně odstranit. Ve struktuře přírodních vláknitých izolantů dochází k přenosu tepla (mimo vedení) také z podstatné části vlivem proudění a radiací. Vliv proudění je dán druhem vláken, jejich orientací,

tloušťkou, a také objemovou hmotností. Radiace je potom dána především typem vláken, jejich tloušťkou a objemovou hmotností [12, 13]. Přírodní vlákna jsou většinou tvořena z elementárních vláken o tloušťce 10 - 20 mikronů, která jsou sdružena do vláken technických, jejichž tloušťka je pak podstatně větší a pohybuje se obecně v rozmezí 50–500 mikronů. Přírodní vlákna dělíme na vlákna živočišná, která se získávají (především) ze srsti zvířat (např. ovčí vlna), a vlákna rostlinná, která se získávají ze stonků, semen, plodů a listů rostlin (např. konopné, lněné, bavlněné vlákno). Rostlinná vlákna vykazují většinou vysoký podíl celulózy, často také vysoký podíl ligninu a hemicelulózy [11]. Klíčová, z hlediska výroby izolačních materiálů jsou především vlákna lýková, a to hlavně len, konopí a juta, a dále vlákna ze semen, kde hlavního zástupce představuje bavlna. Bavlna také vyazuje (po hedvábí) nejmenší přirozenou tloušťku vláken. Vedle přírodních vláken ukazují práce provedené na VUT v Brně, že lze velmi dobře využít pro výrobu VIP i tenká textilní vlákna (primární nebo druhotná), kdy nejvyšší potenciál vykazují vlákna polyesterová (PES)., PES vlákna jsou poměrně dobře dostupná (i cenově), vyskytují se na trhu běžně, v dostatečné jemnosti a vykazují při výrobě vakuových izolací obdobné výsledky, jako vlákna skleněná [14].

3. VÝVOJ VIP A JEJICH SOUČASNÝ STAV

Vakuové izolační panely (VIP) jsou známé již poměrně dlouhou dobu, nicméně velmi dlouho jejich masovému rozšíření bránila relativně vysoká cena, komplikovanost výroby, a především poměrně komplikované uplatnění, které často nebylo z ekonomického pohledu smysluplné. Se stále zvyšujícími se nároky na úspory energie v různých průmyslových odvětvích, včetně stavebnictví, vystupují unikátní vlastnosti VIP do popředí a s postupným rozšiřováním výrobních kapacit dochází k relativnímu poklesu cen u VIP oproti konvenčním izolantům.

VIP principiálně vychází z vynálezu Dewarovy nádoby, kterou vynalezl profesor James Dewar v roce 1892, ze které vznikla komerčně využívaná Dewarova nádoba známá jako termoska, která byla na trh uvedena v roce 1904 (viz. obr. 1).

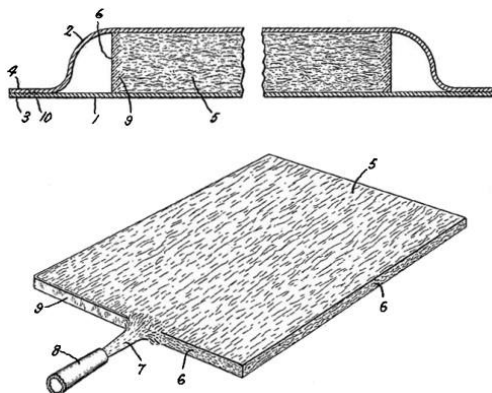


Obr. 1: Návrh termosky z r. 1904 [15]

Již během návrhu Dewarovy nádoby se prof. James Dewar věnoval problematice přenosu tepla, včetně problému degradace kovového povrchu ve vakuu vlivem absorpce plynů. Pro absorpci plynů zabudoval do nádoby dřevěné uhlí. Výsledkem výzkumu byla skleněná nádoba s dvojitým pláštěm, mezi kterým se nacházelo vakuum, kde byla pro omezení přenosu tepla sáláním použita stříbrná barva [16]. Vakuové izolační panely tedy využívají prakticky totožných principů, jako Dewarova nádoba, nicméně základním rozdílem je tvar VIP, který je nejčastěji plošný (tvar desky). Proto je

jádro VIP tvořeno jádrovým izolačním materiálem, u něhož je snahou omezit přenos tepla vedením v materiálové kostře, a který disponuje vysokou otevřenou pórovitostí, která umožní odstranění plynů z jeho struktury. Pro zvýšení živostnosti obsahuje většina VIP ve své struktuře vysoušedlo nebo absorbér plynů [5].

První vakuová izolace byla patentována v roce 1930. Jedná se o patent č. 516377, který byl udělen Hemmanovi a Sterchamolwerkovi z Dortmundu v Německu. V tomto patentu jsou však popsány nepříliš jasně výhody vakuového izolačního panelu s pórovitým jádrem a gumovým obalem [17]. Výrazně podrobnější byl patent č. 2700633 z roku 1955 H. P. Bovenkerka z New Yorku v USA, který popisuje vakuové izolační panely s jádrem na bázi skelných vláken zatavených do kovové ocelové fólie (viz. obr. č. 2).



Obr. 2: VIP dle patentu 2700633 z roku 1955 [16]

První komerční využití VIP započalo v roce 1970, kdy byly tyto materiály využity především jako izolace u lednic, mrazáků a chladících boxů [18]. Právě chladírenství bylo po dlouhou dobu nejvýznamnějším odvětvím, kde bylo využití VIP výhodné a umožnilo snížení tloušťky stěn u chladírenských boxů i u komerčních výrobků (ledniček a mrazáků), a tím i výrazně zlepšit poměr vnějšího k vnitřnímu objemu těchto spotřebičů. Dnes jsou VIP využity při výrobě prakticky všech těchto spotřebičů. Výhodou je také skutečnost, že jsou tyto spotřebiče vyráběny v konkrétních rozměrech a VIP lze tak efektivně vyrábět na míru, není nutná jejich dodatečná úprava a relativně jednoduché je i zabudování VIP do jednotlivých spotřebičů. První aplikace VIP ve stavebnictví byla na konci 20. století v USA, v roce 1999 [18].

V roce 2014 byla spotřeba VIP ve stavebnictví okolo 10 % [5] a dále se meziročně zvyšuje. VIP se ve stavebnictví používají především v případech, kdy je nutné dosáhnout co nejlepších tepelně izolačních vlastností při minimální tloušťce materiálové vrstvy. Jedná se především o:

- rekonstrukce a konstrukce nových podlah v případě, kdy se vyžaduje vysoký tepelný odpor konstrukce a není možné konstrukčně použít větších tloušťek izolantu,
- podlahy s podlahovým vytápěním - VIP lze použít pro zvýšení účinnosti systému podlahového vytápění,
- dodatečné vnitřní zateplení, kdy je cílem dosáhnout co nejvyššího účinku při minimalizaci tloušťky izolantu, především s ohledem na minimalizaci snížení užité plochy zateplováných prostor po aplikaci zateplení,

- izolace plochých střech, teras a stropů, zde se využívá většinou systém pokládky v kombinaci s klasickým tepelně izolačním materiálem, jako je extrudovaný polystyren nebo polyuretanová pěna,
- neprůsvitné výplně otvorů obvodových plášťů, meziokenní panely a dveře,
- montované sendvičové konstrukce,
- zateplování problematických detailů stavebních konstrukcí (např. nadokenních překladů – viz. obr. 3) [18, 19],
- v menší míře lze VIP použít i při klasickém zateplení obvodových plášťů z vnější strany, nicméně kotvení VIP na konstrukci z vnější strany musí probíhat mechanicky a je komplikovanější než u klasických systémů [20].



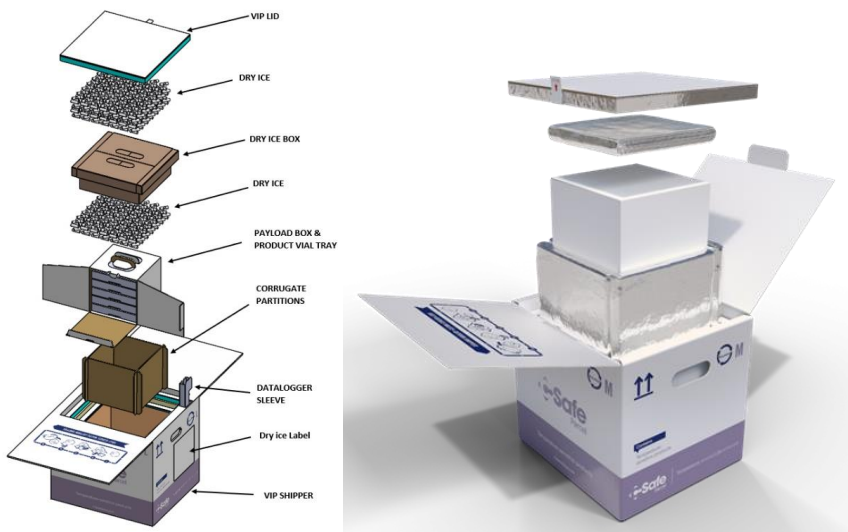
Obr. 3: Zateplení detailu v oblasti nadokenního překladu pomocí VIP [18]

Mezi další oblasti využití VIP patří doprava (izolace plášťů kolejových vozidel, izolace chladicích vozů a kontejnerů, izolace bateriových systémů u elektromobilů, atd.). V posledních letech však největší rozvoj zažívá oblast logistiky a přepravních boxů. Se systémem pronájmu přepravních boxů izolovaných pomocí VIP přišla jako první na trh firma va-Q-tec, která aktuálně nabízí celkem tři velikosti kontejnerů, které je možné si pronajímat (případně zakoupit) [21].



Obr.4: Fotografie XL přepravního boxu s VIP firmy va-Q-tec [21]

Bohužel největší rozvoj využití VIP v oblasti logistiky začal v loňském roce spolu s potřebou převozu velkého množství vakcín proti COVID-19, a došlo ke vzniku zcela nového druhu i celého logistického systému přepravních boxů. Jedná se především o papírové boxy, které mají vložku (většinou) z expandovaného polystyrenu (EPS), dále jsou do nich vloženy VIP a následuje (podle typu boxů) další EPS vložka nebo plastová vložka. Do těchto boxů je možné umístit vakcíny, případně jiný farmaceutický materiál, který se udržuje při velmi nízké teplotě pomocí suchého ledu (schéma přepravních boxů je uvedeno na obr. 5) [22]. Po použití se boxy rozeberou a znovu se po kontrole složí do nového papírového boxu. Použité papírové boxy se recyklují a poškozené VIP panely se zasílají zpět k výrobci, který je rozebere a znovu využije při výrobě.



Obr. 5: Schématický náčrt a fotografie systému přepravních boxů s VIP [22]

4. ŠÍŘENÍ TEPLA VE STRUKTUŘE VIP

VIP disponují cca 10x lepšími tepelně izolačními vlastnostmi než materiály konvenční (minerální vlna, EPS, PUR). Součinitel tepelné vodivosti VIP bezprostředně po výrobě může dosahovat hodnot i nižších než 0,001 W/(m.K), při dosažení velmi nízkých vnitřních tlaků v jednotkách Pa. Reálně je však tepelná vodivost VIP vyšší, přitom je snahou dosahovat optimální úrovně tepelné vodivosti vždy s ohledem na předpokládané použití VIP a na jejich ekonomickou rentabilitu.

Ve struktuře VIP probíhá přenos tepla všemi třemi způsoby, tedy: vedením, prouděním i sáláním. Celková efektivita tepelné vodivosti λ_{eff} vakuových izolačních panelů lze určit součtem vedení v pevné fázi λ_s , proudění ve fázi plyné λ_g , radiací λ_r a navýšením tepelné vodivosti vlivem tepelných mostů obálky VIP v místě okrajů VIP λ_{tb} [23 - 25]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_{tb} \text{ [W/(m.K)]} \quad (1)$$

Tepelná vodivost materiálové kostry a tepelná vodivost odpovídající šíření tepla radiací nejsou závislé na tlaku plynů uvnitř VIP a součet jejich hodnot spolu s λ_{tb} označujeme jako počáteční tepelnou vodivost VIP λ_0 :

$$\lambda_0 = \lambda_s + \lambda_r \text{ [W/(m.K)]} \quad (2)$$

Konvektivní složka tepelné vodivosti λ_g zbytkovými plyny uvnitř VIP závisí na tlaku plynu, který se s časem zvyšuje infuzí atmosférických plynů a odplynováním vnitřního jádrového materiálu (tzv. „outgassing“).

Kde $\lambda(p)$ vyjadřuje složku šíření tepla v plynu uvnitř VIP v závislosti na vnitřním tlaku. Pro každý typ izolačního jádrového materiálu je typická specifická závislost tepelné vodivosti na tlaku. V závislosti na velikosti pórů ve struktuře izolantu se také mění citlivost izolantu na změnu tlaku. Tuto charakteristiku popisuje parametr $p_{1/2}$. Jedná se o tlak, při kterém se tepelná vodivost VIP zvýší o polovinu tepelné vodivosti plynu λ_g , v případě vzduchu se jedná o polovinu z hodnoty 0,026 W/(m.K) [25]. Tlak $p_{1/2}$ závisí na střední velikosti pórů materiálu δ , průměru molekul plynu d_g , teplotě T , konstantě typu plynu β v závislosti na typu plynu a Boltzmanově konstantě k_B [24, 25], viz níže rovnice:

$$p_{1/2-g} = \frac{T}{\delta} \cdot \frac{2 \cdot \beta \cdot k_B}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_g^2} \text{ [Pa]} \quad (3)$$

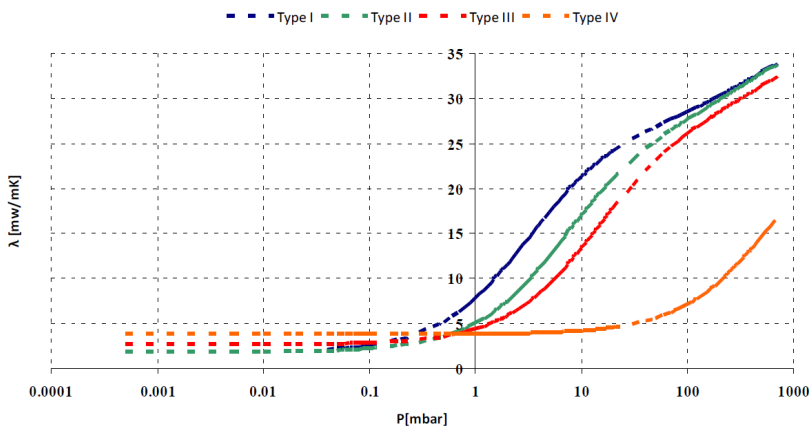
Tepelnou vodivost reálného VIP v čase lze tedy vyjádřit:

$$\lambda_{eff} = \lambda(p) + \lambda_{tb} \text{ [W/(m.K)]} \quad (4)$$

kde:

$$\lambda(p) = \lambda_0 + \frac{\lambda_g}{1 + \frac{p_{1/2}}{p}} \text{ [W/(m.K)]} \quad (5)$$

Typické hodnoty tlaku $p_{1/2}$ závisí na vnitřní struktuře izolantů a na velikosti vnitřních pórů. U vláknitých izolantů se pohybují v rozmezí jednotek mBar – typicky 1 – 20 mBar, u nanosily se jedná o hodnoty až v řádu stovek mBar (viz. obr. 6).



Obr. 6: Závislost tepelné vodivosti jádrových izolantů využívaných pro výrobu VIP na tlaku (Typ I – III: skleněné vlny různé jemnosti, typ IV: nanosilika) [24].

Čím vyšší je tedy hodnota $p_{1/2}$, tím vyšší životnost lze u VIP předpokládat. Na druhou stranu VIP s jádry na bázi velmi jemných skleněných vláken mají výrazně lepší tepelně izolační vlastnosti při velmi nízkém tlaku. Z těchto důvodů jsou VIP na bázi skleněné vlny využívány většinou v chladiřnictví a logistice, kde se nepožaduje u VIP životnost v řádech desítek let, ale co nejnižší hodnota součinitele tepelné vodivosti. VIP na bázi nanosiliky nebo aerogelu se především využívají v oblasti stavebnictví, kde je na prvním místě ve většině případů trvanlivost [5].

5. VYUŽITÍ JÁDROVÝCH IZOLANTŮ NA BÁZI SNADNOOBNOVITELNÝCH A DRUHOTNÝCH SUROVIN PRO VÝROBU VIP

Jak prokazuje řada výzkumných prací provedených na předních světových pracovištích, je možné pro výrobu VIP použít kromě aerogelu, nanosiliky a skleněné vlny i řadu alternativních jádrových izolantů, včetně izolantů na organické bázi [5, 8, 10]. Na fakultě stavební VUT v Brně probíhá od roku 2016 výzkum orientovaný na využití jádrových izolantů na bázi snadnoobnovitelných a druhotných surovin pro výrobu VIP, včetně studia jejich chování a trvanlivosti. Doposud provedené výzkumy ukazují, že v případě izolantů na bázi přírodních vláken jsou tři základní problémy, které je potřeba pro jejich úspěšné uplatnění v oblasti VIP vyřešit:

- při použití přírodních vláken je nutné rozvláknění technických vláken na vlákna elementární, případně vytvoření takové struktury, kde by bylo optimální rozdělení pórů, aby po zavakuování skutečně došlo k efektivnímu snížení tepelné vodivosti až na úroveň typickou pro komerčně vyráběné VIP,
- najít zdroje dostatečně tenkých a čistých textilních vláken, u kterých by bylo možné dosáhnout obdobné struktury, jako u vláken skleněných,
- najít způsob rychlého vysušení přírodních vláken a zabránění efektu „outgassignu“, například pomocí vysoušedel a lapačů plynu.

Jak popisují publikované práce [26–31], je možné pro výrobu VIP použít řadu alternativních surovin, včetně surovin snadnoobnovitelných a druhotných. V rámci provedených prací bylo zjištěno, že je možné úspěšně využít různé typy syntetických i přírodních vláken a vláken druhotných, vznikajících jako odpad při různých technologických zpracováních přírodních vláken. Postupně v letech 2016–2021 by ověřeny možnosti využití následujících surovin:

- primárních polyesterových (PES) a akrylových vláken,
- různých typů recyklovaných PES vláken,
- přírodních vláken bavlněných, lněných a vláken z ovčí vlny,
- jemných lněných a bavlněných vláken vznikajících při zpracování textilních a přírodních vláken (záchyt ve filtrech - obr. 7).



Obr.. 7: Fotografie bavlněných vláken (vlevo) a lněných vláken (vpravo)

Cílem bylo nejprve identifikovat možné zdroje organických (syntetických i přírodních vláken) a jejich možnou náhradu za vlákna skleněná ve struktuře VIP. U vzorků lýkových vláken bylo zjištěno, že mají nevhodné vlastnosti pro výrobu vakuových izolací. Klasickým mechanickým rozvláknováním těchto rostlin nelze získat primární vlákna, ale technická s průměrnou tloušťkou nad 90 mikrometrů (v tloušťce vláken není mezi lnem a konopím je zásadní rozdíl). Vlákna z ovčí vlny vykazovala při mikroskopické analýze velmi vysokou organickou kontaminaci (i při vysoké technické čistotě vláken), proto se jeví pro výrobu VIP jako méně vhodná. Největší potenciál mají polyesterová vlákna a vlákna bavlny. Velmi zajímavých parametrů mohou dosahovat akrylová vlákna. V rámci provedené studie byla zajištěna akrylová vlákna o tloušťce 0,1 dText, což odpovídalo reálné tloušťce 2,7 mikrometrů (stanovené laboratorně). Tato vlákna však vykazují takovou jemnost, že se nedají zpracovat běžnými technologiemi pro výrobu netkaných technických textilií, proto byla tato vlákna z další studie vyřazena.

Tabulka č. 1: Přehled tlouštěk a délek vybraných typů organických vláken

Typ vlákna	Tloušťka [μm]	Délka [mm]
Akrylová vlákna	2,70	34,3
Recyklovaný PES 1	14,99	47,3
Recyklovaný PES 2	12,41	49,9
Primární PES	12,26	35,5
Bavlna 1	12,74	26,6
Bavlna 2	10,80	26,1
Konopí	90,51	41,2
Len	91,24	38,5
Ovčí vlna	24,12	28,3

Na základě naměřených hodnot byly zvoleny tři typy nevhodnějších vláken pro výrobu VIP:

- Primární PES vlákna s tloušťkou 12,3 mikrometrů,
- Recyklovaná PES vlákna s tloušťkou 12,4 mikrometrů,
- Bavlněná vlákna s tloušťkou 90,5 mikrometrů.

Pro výrobu zkušebních vzorků byla zvolena metoda termického pojení (airlay metoda), přičemž jako pojivo byla využita bikomponentní PES vlákna tloušťky 2,2 dTex a s aktivací teplotou 120 °C v množství 15 %. Vzorky byly vyrobeny vždy na nejvyšší možnou objemovou hmotnost (s ohledem na použitou výrobní technologii a množství pojivových vláken). Na vyrobených jádrových izolantech byly vždy provedeny série standardních zkoušek, přičemž bylo provedeno vždy stanovení tloušťky, lineárních rozměrů, objemové hmotnosti, napětí při 10% deformaci, stlačitelnosti a tepelně izolačních vlastností za normálního tlaku [33-39]. Následně byly vzorky vysušeny při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti a bylo na nich provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti za sníženého tlaku od 5 Pa po normální atmosférický tlak. Měření bylo provedeno dle ISO 8301 [39] na přístroji FOX 200 Vacuum od firmy TA Instruments, který umožňuje stanovení tepelné vodivosti v závislosti na tlaku bez nutnosti zavakuovat jádrový izolant do bariérové fólie.

Tabulka č. 2: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku u vzorku z čistých PES vláken (objemová hmotnost 150 kg/m³)

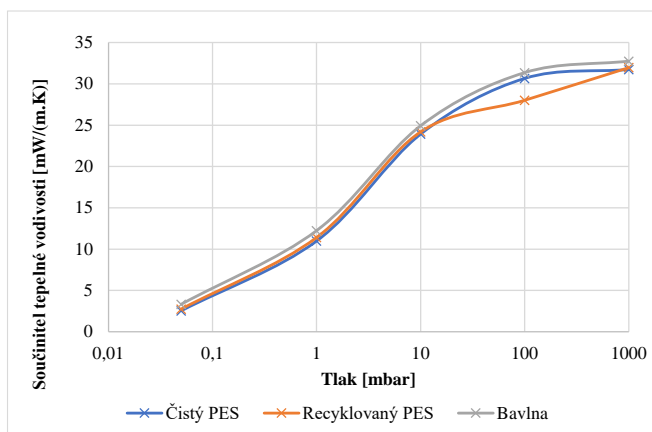
Tlak [mBar]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]			
	λ_1	λ_2	λ_3	λ průměr
0,05	0,00249	0,00253	0,00257	0,00253
1,0	0,01092	0,01098	0,01105	0,01098
10,0	0,02391	0,02394	0,02394	0,02393
100,0	0,03061	0,03061	0,03060	0,03061
Normální tlak	0,03175	0,03175	0,03175	0,03175

Tabulka č. 3: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku u vzorku z recyklovaných PES vláken (objemová hmotnost 175 kg/m³)

Tlak [mBar]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]			
	λ_1	λ_2	λ_3	λ průměr
0,05	0,00268	0,00282	0,00275	0,00275
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 č. 4: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku u vzorku z bavlny (objemová hmotnost 130 kg/m³)

Tlak [mBar]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]			
	λ_1	λ_2	λ_3	λ průměr
0,05	0,00346	0,00331	0,00321	0,00333
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

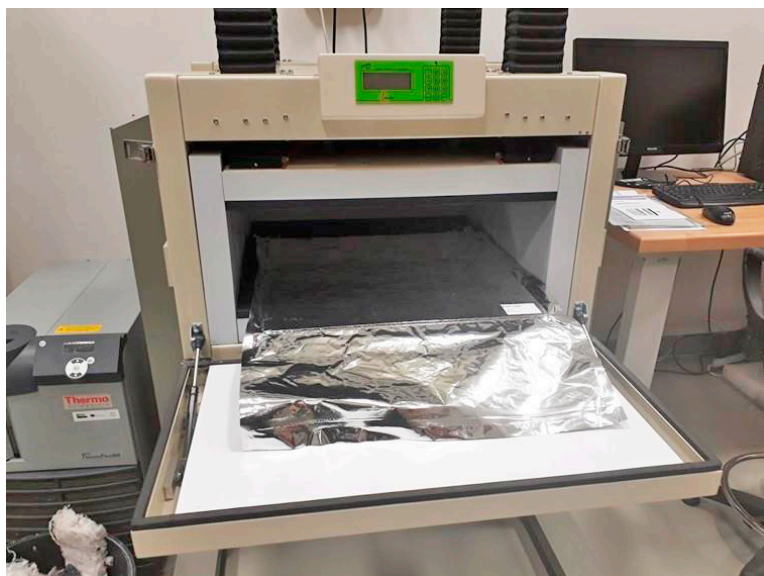


Obr. 8: Závislost součinitele tepelné vodivosti vzorků jádrových izolantů na tlaku

Vzorky byly dále zavakuovány do bariérové fólie s Al vrstvou od firmy Hanita Coating (Hanita Al V07941p). Výroba vzorků byla provedena ve spolupráci s firmou TURVAC ve Slovinsku. Výrobní tlak byl zvolen v souladu s podmínkami měření 0,05 mBar.

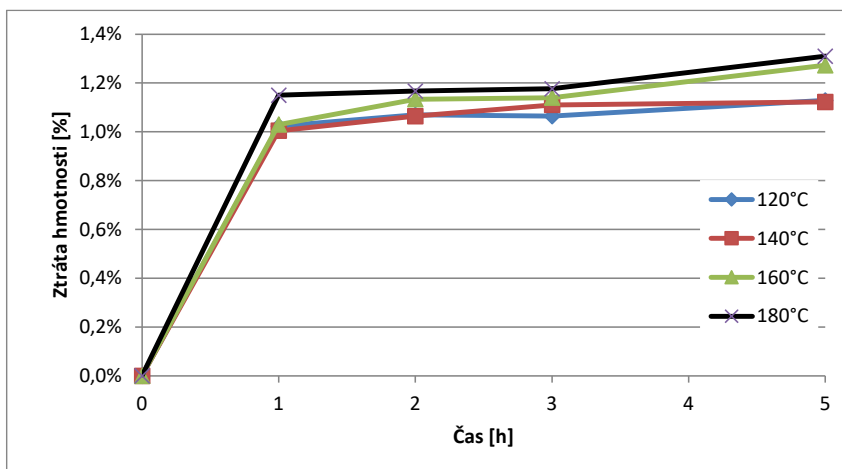
Na vyrobených VIP s různými jádrovými izolanty bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti a byly zjištěny následující výsledky:

- VIP s jádrem z primárních PES vláken: součinitel tepelné vodivosti 0,00372 W/(m.K); objemová hmotnost 225 kg/m³,
- VIP s jádrem z recyklovaných PES vláken: součinitel tepelné vodivosti 0,00497 W/(m.K); objemová hmotnost 234 kg/m³,
- VIP s jádrem na bázi bavlněných vláken: součinitel tepelné vodivosti 0,00589 W/(m.K); objemová hmotnost 234 kg/m³.



Obr. 9: Fotografie stanovení součinitele tepelné vodivosti VIP pomocí přístroje FOX 630 od firmy TA Instruments

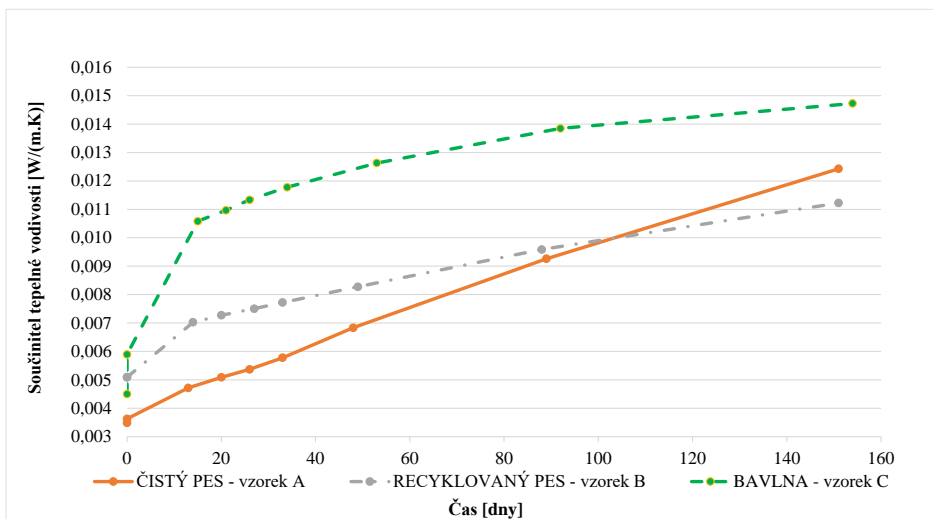
Jak je patrné z dosažených výsledků, jsou hodnoty naměřené u finálních VIP vyšší než u samotných jádrových izolantů měřených za laboratorních podmínek. Důvodem je také tepelný most v oblasti okrajů VIP. V daném případě byl rozměr VIP 500 x 500 mm a pro stanovení tepelné vodivosti byl použit deskový přístroj s aktivní měřicí plochou 300 x 300 mm ve středu desky. Dalším důvodem byl zjištěný sklon organických jádrových izolantů k „outgassingu“, který způsobuje navýšení tepelné vodivosti po zavakuování VIP. Byla proto věnována pozornost problematice sušení nově vyvinutých izolantů



Obr. 10: Závislost hmotnostního úbytku u vzorků jádrového izolantu na bázi primárního PES na teplotě

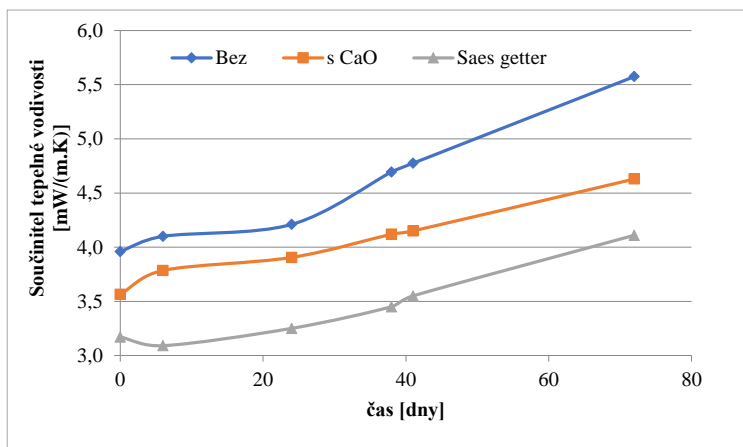
Bylo zjištěno, že pro odstranění fyzikálně vázané vlhkosti je potřebná teplota minimálně 160 °C a čas 5 hodin. Pokud nedojde k úplnému odstranění vlhkosti, dojde k jejímu zpětnému odparu po zavakuování VIP. Tento problém není patrný při laboratorních měřeních, protože za laboratorních podmínek je tlak uvnitř soustavy kontrolován a pomocí vakuové pumpy je po jeho vzestupu snížen na stanovenou hodnotu.

Na vzorcích byl proveden test rychlého stárnutí při vystavení zvýšené teplotě +50 °C. Měření probíhalo celkově 151 dní, přičemž bylo zjištěno, že u vzorků z recyklovaného PES a bavlny dochází k poměrně strmému nárůstu tepelné vodivosti v počáteční fázi expozice, během prvních 20 dní. Poté se nárůst tepelné vodivosti zpomaluje. U vzorku z čistého PES je nárůst tepelné vodivosti z počátku pozvolnější, nicméně nedochází u tohoto izolantu ke zpomalení nárůstu tepelné vodivosti, a celkově lze tedy konstatovat, že po 100 dnech disponuje VIP s čistým PES stejnými tepelnými izolačními vlastnostmi, jako VIP na bázi recyklovaného PES (viz. obr. 11).



Obr. 11: Závislost součinitele tepelné vodivosti u vzorků VIP na čase při teplotě +50 °C

Pro zajištění zvýšené životnosti VIP s alternativními jádrovými izolanty bylo ve firmě TURVAC ve Slovinsku v roce 2018 ověřeno možné využití vysoušečů a lapačů plynů. Jako nejúčinnější se jeví čisté CaO, a dále Combogetter od firmy Seas group, který je určen jako lapač plynů pro výrobu VIP a je schopen zachytávat nejvýznamnější plyny obsažené v atmosféře (N₂, H₂O, H₂, CO, CO₂, O₂).



Obr. 12: Závislost součinitele tepelné vodivosti u vzorků VIP na bázi čistého PES na čase při teplotě +50 °C s různým vysoušelem

Z výsledků je patrné, že použité vysoušeadlo a lapač plynů má pozitivní vliv na počáteční „outgassing“, přičemž dojde bezprostředně po zavakuování ke zlepšení tepelné vodivosti oproti vzorku čistému. U VIP s CaO i s Saes gettrem je pak nárůst tepelné vodivosti pomalejší, proto lze hodnotit jejich přínos velmi pozitivně.

V rámci výzkumných prací byly ověřeny další alternativní suroviny, především se jednalo o jádrové izolanty vyrobené z lněných vláken a kombinaci lněných vláken s vlákny bavlněnými a PES [26]. Podíl přírodních vláken se pohyboval v izolantech v rozmezí 50-80 %. Výroba byla provedena ve dvou krocích. Nejprve byly vyrobeny vlákně rohože metodou termického pojení s množstvím 20 % bikomponentních PES vláken v objemových hmotnostech 25 a 30 kg/m³. Následně byly vzorky dolisovány za tepla na objemové hmotnosti v rozsahu 110–245 kg/m³. Cílem bylo dosažení co nejvyšší objemové hmotnosti za současného zachování příznivých tepelně izolačních vlastností. Jednalo se o tři následující typy izolantů:

- čistý len – izolant vyrobený z 80 % lněných vláken a 20 % pojivových BiCo vláken,
- len + bavlna – izolant vyrobený z 50 % lněných vláken, 30 % recyklovaných bavlněných vláken a 20 % BiCo vláken,
- len + PES – izolant vyrobený z 50 % lněných vláken, 30 % recyklovaných PES vláken a 20 % BiCo vláken,

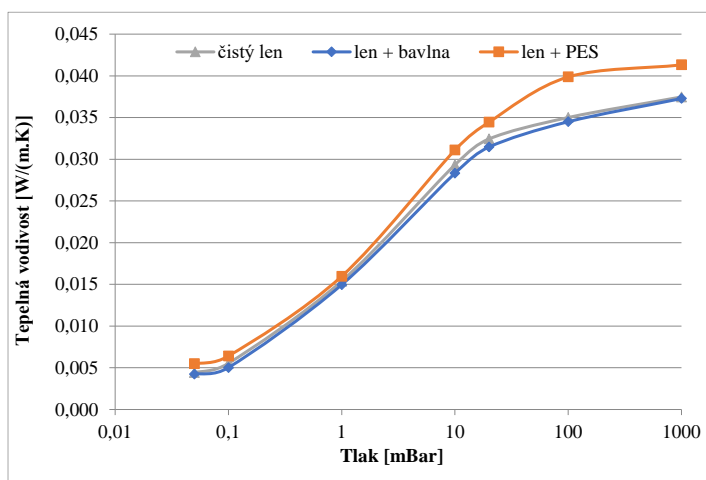
Tabulka č. 5: Přehled tepelně izolačních vlastností alternativních jádrových izolantů při normálním tlaku

Izolant	Tloušťka [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)]
čistý len	10,2	207,7	0,0375
len + bavlna	10,8	224,3	0,0373
len +PES	9,4	285,1	0,0413



Obr 13: Fotografie izolantu bázi čistých lněných vláken [26]

Dále bylo provedeno stanovení tepelné vodivosti v závislosti na tlaku od normálního tlaku až po vakuum (tlak 0,05 mBar). Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce a obrázku č. 13.



Obr. 14: Závislost součinitele tepelné vodivosti u alternativních jádrových izolantů na tlaku

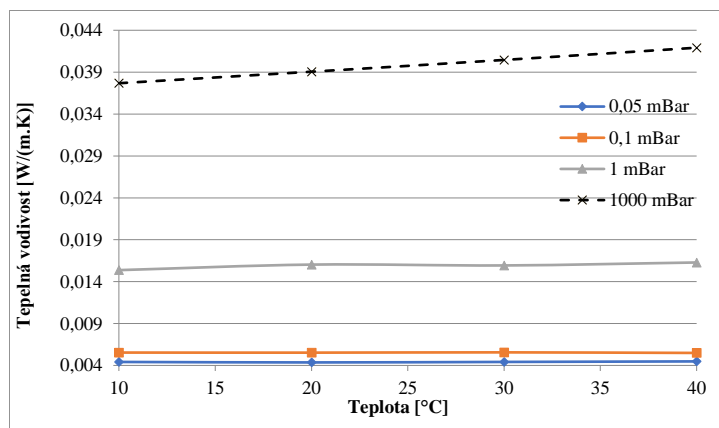
Tabulka č. 6: Přehled tepelně izolačních vlastností alternativních jádrových izolantů za vakua

Izolant	Tloušťka [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)]
čistý len	10,5	203,4	0,0044
len + bavlna	11,9	202,1	0,0042
len + PES	10,3	260,6	0,0055

Jak je patrné z dosažených výsledků, vzorky s podílem lněných vláken vykazují horší tepelně izolační vlastnosti oproti vzorkům na bázi čisté bavlny nebo PES, nicméně dosažené tepelně

vodivosti za vakua jsou stále velmi nízké a jsou cca 8–9x lepší, než vykazují tyto izolanty za normálního tlaku. Závislost tepelné vodivosti na tlaku je velice podobná, jako je tomu u skleněných vláken nebo u alternativních izolantů na bázi PES a bavlny.

V rámci provedeného výzkumu byl na vzorcích alternativních izolantů s podílem lnu ověřen vliv konvekce na tepelně izolační vlastnosti VIP a na jeho tepelnou vodivost při různých středních teplotách. Byla provedena série měření se středními teplotami od +10 °C do +40 °C. Výsledky jsou uvedeny na obr. 13.



Obr. 15: Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě u vzorků jádrového izolantu na bázi lnu za různého tlaku

Jak je patrné z průběhů tepelné vodivosti v závislosti na teplotě (obr. 13), u vzorků vláknitého izolantu do tlaku 0,1 mBar není pozorovatelná závislost tepelné vodivosti na teplotě, vzhledem k absenci plynného média uvnitř izolantu.

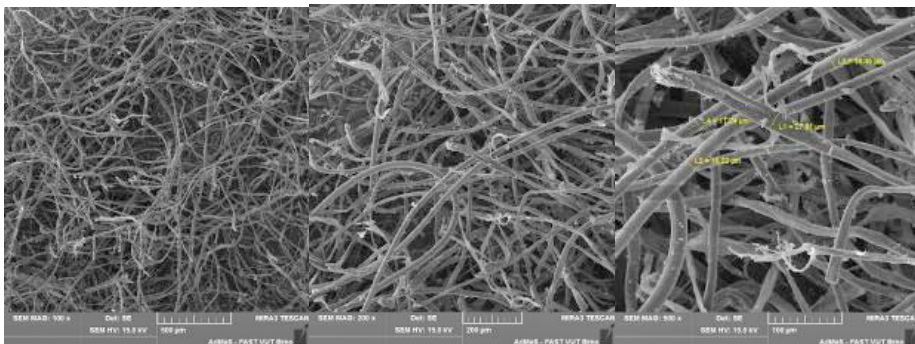
Vzhledem k tomu, že u většiny organických vláknitých jádrových izolací bylo při experimentálních pracích zjištěno přibližně obdobné chování, je i na základě výsledků patrné, že v oblasti velmi nízkých tlaků jsou dosažené výsledky přibližně srovnatelné. Dále pak cena čistých jemných vláken (jak primárních, tak i druhotných) v kvalitě využitelné pro výrobu VIP je relativně vysoká a pohybuje se v rozmezí 1–3 EUR za kg (cena BiCo vláken je obdobná). Tedy v přepočtu na 1 m³ VIP při objemové hmotnosti jádrového izolantu okolo 200 kg/m³ se jedná o 200–600 EUR na 1 m³ pouze za hlavní surovinu. Proto byla snaha hledat suroviny druhotné s nižší cenou, které se aktuálně nevyužívají pro výrobu stavebních materiálů, a které by mohly vykazovat v případě využití pro výrobu VIP zajímavé vlastnosti.

Jako potenciálně zajímavá byla zvolena vlákna lněná a bavlněná, která vznikají při úpravách a zpracování textilu a textilních vláken a jsou zachycena ve filtrových soustavách. Konkrétně se jednalo o vlákna z trhární textilu SK-Text Senica, nicméně obdobná vlákna vznikají i v dalších textilních odvětvích, například při výrobě netkaných textilií i při samotné výrobě jader VIP metodou termického pojení. Jedná se o velmi krátká vlákna, která mají však velmi malou tloušťku, a proto se jeví jako zajímavá surovina pro výrobu VIP.

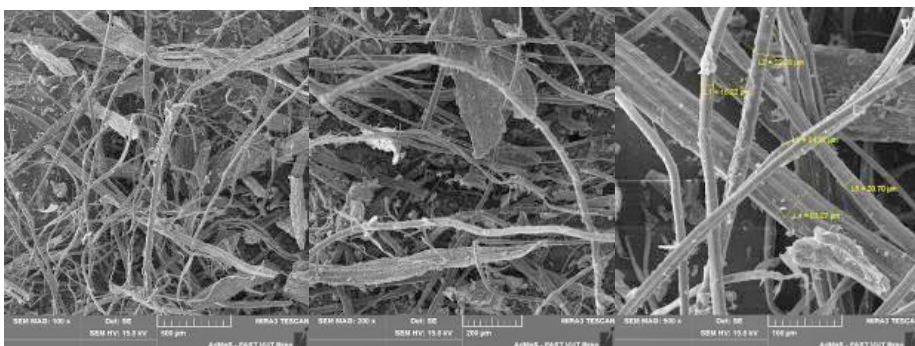
Na vláknech byla provedena makroskopická i mikroskopická analýza (včetně optické a REM mikroskopie), kde bylo zjištěno:

- oba typy vláken obsahují převažující podíl velmi jemných vláken,
- vzorek bavlny je homogenní a vlákna mají přibližně stejnou tloušťku,

- vzorek lnu obsahuje zbytky nerozvlákněných technických svazků a pazderí,
- délka vláken je v obou případech nižší než u primárních surovin, které byly zpracovávány, převažující podíl vláken ve vzorcích má délku v rozmezí 10-20 mm.



Obr. 16: Fotografie z elektronové mikroskopie – vzorek bavlny (zvětšení 100x, 200x a 500x)



Obr. 17: Fotografie z elektronové mikroskopie – vzorek lnu (zvětšení 100x, 200x a 500x)

Mikroskopická analýza potvrdila předpoklady makroskopické analýzy a byla stanovena délka a tloušťka obou typů vláken. Výsledky jsou uvedeny níže:

- Bavlna
 - Průměrná tloušťka vláken 12,49 μm (směrodatná odchylka 3,45 μm),
 - Průměrná délka vláken 1,6 cm (směrodatná odchylka 0,10 cm),
- Len
 - Průměrná tloušťka vláken 19,49 μm (směrodatná odchylka 11,66 μm),
 - Průměrná délka vláken 1,2 cm (směrodatná odchylka 0,05 cm).

Jak bylo zjištěno, zejména u lnu je tloušťka výrazně nižší než u běžných technických vláken lnu (viz výše). V případě bavlny je tloušťka obdobná, jako u čisté bavlny. Lze tedy konstatovat, že došlo u této suroviny prakticky k úplnému rozvláknění tkanin, ze kterých vlákna bavlny pochází (vlákna vznikla v trhárně při trhání bavlněného textilu na vlákna). Oba typy vláken jsou tedy potenciálně zajímavé z hlediska výroby jádrových izolantů vhodných pro VIP. Jedná se navíc o lokálně dostupné druhotné suroviny, pro které není v ČR ani na Slovensku prozatím sofistikované velkoobjemové

využití. Obecným problémem je především malá délka vláken, která brání jejich dalšímu zpracování pomocí klasických textilních technologií.

Pro výrobu jádrových izolantů byla využita (obdobně, jako v předchozích případech) bikomponentní polyesterová vlákna o tloušťce 2,2 dTex v množství 15 %. Surovinová vlákna byla homogenizována a kombinována s bikomponentními vlákny. Následně byly vzorky z vláken lisovány při teplotě 150 °C. Cílem bylo dosáhnout co nejvyšší objemové hmotnosti a homogenity vzorků. Výrobní postup byl následující:

- ruční homogenizace směsi vláken;
- uložení směsi vláken do ocelové formy a umístění do sušárny s teplotou + 150 °C po dobu 20 minut;
- ruční stlačení vzorku pomocí přitlačné desky;
- opětovné vložení vzorků ve formě do sušárny při + 150 °C na 20 minut;
- ruční stlačení vzorku na požadovanou kompresi;
- vyjmutí z formy a umístění do pece při + 150 °C po dobu 10 minut;
- ruční lisování na požadovanou tloušťku (v daném případě 10 mm) a ochlazení vzorku.

Tento postup byl odladěn pro dosažení co nejvyšší homogenity izolantu s ohledem na zjednodušenou laboratorní výrobu. Výsledek výroby před a po optimalizaci výrobního procesu je vidět na obrázku č. 18.



Obr. 18: Izolant na bázi bavlny před optimalizací výrobního procesu (vlevo) a po optimalizaci (vpravo)

U zkušebních vzorků bylo zajištěno stanovení základních fyzikálních vlastností:

- Stanovení tloušťky při dotlaku 250 Pa [32],
- Stanovení lineárních rozměrů a objemové hmotnosti [33, 34].

Po výrobě došlo u vzorků k následné expanzi (relaxaci), která byla, jak je patrné z výsledků uvedených v tabulce níže. Výrazně vyšší expanzi vykazovaly při výrobě vzorky bavlny.

Tabulka č. 7 Fyzikální vlastnosti izolačních materiálů na bázi bavlny a lnu (z filtrů)

Vzorek	Tloušťka [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Plošná hmotnost [kg/m ²]
Bavlna	15,60	119	1,86
Len	10,46	178	1,85

Dále bylo na vzorcích provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti v závislosti na tlaku (stejnou metodikou, jako v předchozích případech popsaných výše) [37, 38]. Tepelná vodivost byla stanovena při normálním tlaku a poté ve vakuu při 0,05 mbar, 0,5 mbar, 1 mbar, 10 mbar. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách 8 a 9.

Tabulka č. 8: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku u vzorku z bavlny

Tlak [mBar]	Tloušťka [mm]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
0,05	15,062	0,0051
0,5	14,389	0,0104
1,0	14,446	0,0143
10,0	14,364	0,0300
Normální tlak	14,776	0,0419

Tabulka č. 9: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku u vzorku ze lnu

Tlak [mBar]	Tloušťka [mm]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
0,05	10,300	0,0045
0,5	9,919	0,0091
1,0	9,893	0,0125
10,0	9,874	0,0287
Normální tlak	9,614	0,0434

Jak je patrné ze získaných výsledků, zkušební vzorky vykazují velmi nízké tepelné vodivosti při tlaku 5 Pa. U vzorku bavlny nebylo dosaženo stejných hodnot, jako u vzorku čistých bavlněných vláken, což je dáno horší homogenitou vzorku z krátkých bavlněných vláken a jejich horší orientací. U vzorku na bázi lnu byla zjištěna tepelná vodivost po zavakuování na úrovni izolačních materiálů na bázi SiO₂, jeho chování je pak v praxi obdobné, jako je tomu u izolačních materiálů na bázi čistých vláken. V tomto případě se pozitivně projevuje vyšší objemová hmotnost a menší délka vláken, kdy po vakuování je výrazně snížena tepelná vodivost oproti vzorku na bázi bavlny.

Na vyvíjených izolačních materiálech i na finálních VIP bylo provedeno stanovení reakce na oheň, která je velice důležitá z pohledu jejich možného využití ve stavebnictví. Byla provedena základní zkouška pro minimální třídu reakce na oheň E [39], tedy zkouška malým zdrojem plamene [40].

Zkušební vzorek byl vystaven plamenu po dobu 15 sekund, monitorování možného šíření plamene bylo po dobu 20 sekund. Po kontaktu malého plamene u žádného ze vzorků nedošlo

k rozvoji hoření. Nebylo dosaženo prahu 150 mm od místa doteku plamene. Filtrační papír pod vzorky nebyl zapálen, všechny vzorky včetně bariérové fólie vykazují třídu reakce na oheň minimálně E nebo lepší a lze je tedy využít i v oblasti stavebních konstrukcí. Vybrané fotografie demonstrující dosažené výsledky z měření jsou uvedeny na obrázcích níže. [28]



Obr. 19: Fotografie vzorku lnu před, během a po zkoušce malým zdrojem plamene [28]

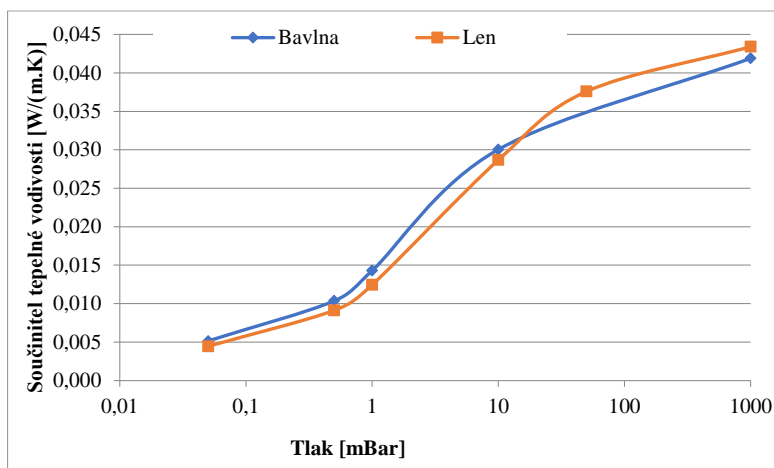


Obr. 20: Fotografie vzorku VIP (bariérové fólie) před, a po zkoušce malým zdrojem plamene [28]

Podle [24-25] byl vyhodnocen tlak $p_{1/2}$ [mBar] (jako tlak při zvýšení počáteční tepelné vodivosti o 12,75 mW/(m.K)). Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 10.

Tabulka č. 10: Přehled vypočítaných tlaků $p_{1/2}$ pro jednotlivé vzorky jádrových izolantů na bázi lnu a bavlny

Vzorek	Součinitel tepelné vodivosti (tlak 0,05 mBar) [W/(m·K)]	Tlak $p_{1/2}$ [mBar]
Bavlna	0,0051	2,47
Len	0,0045	2,81



Obr. 21: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku u vzorku jádrového izolantu na bázi bavlny a lnu

Jak je z výsledků patrné, hodnoty vakuové tepelné vodivosti (pro tlak 0,05 mBar) jsou relativně nízké, srovnatelné s izolanty na bázi SiO_2 , ale nedosahují extrémně nízkých hodnot srovnatelných se skleněnou vlnou (u izolátoru jádra na bázi vláken je $p_{1/2}$ typicky mezi 3 mBar a 7 mBar [24]) nebo s hodnotami, které byly zjištěny u izolantů s klasickými vlákny bavlněnými nebo vlákny na bázi PES (primárního i recyklovaného). Ohledně zjištěných hodnot tlaků $p_{1/2}$ bylo zjištěno, že tlaky jsou relativně nízké, proto tyto izolanty nejsou vhodné pro klasické stavební aplikace a pro jejich použití by bylo nutné použít fólii s klasickou hliníkovou fólií. Tyto hodnoty jsou obdobné, jako je tomu u jádrových izolantů na bázi skleněné vlny [5, 24, 31].

6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

V případě VIP, jak dokazují vědecké práce [5 – 7, 11, 23 – 24], je nutné volit vždy jádrový izolant s ohledem na požadované vlastnosti VIP a na jeho požadovanou životnost. Obecně platí, že při použití jádrových izolantů na bázi vláknitých struktur (jak anorganických, tak i organických) je možné dosáhnout počáteční tepelné vodivosti u VIP nižší než 0,002 W/(m.K). Nevýhodou je však vyšší citlivost ke změně tlaku uvnitř VIP, kdy i změna tlaku v řádu jednotek mBar zásadním způsobem degraduje tepelné izolační vlastnosti VIP. Typické hodnoty tlaku $p_{1/2}$ u těchto jádrových

izolantů se pohybují v rozmezí 1 – 20 mBar. U těchto typů VIP se využívají bariérové fólie obsahující silnější Al vrstvu, která zajišťuje vyšší difúzní odpor obálky vůči pronikání plynů obsažených v atmosféře do VIP, nicméně tyto fólie mají také vyšší tepelnou vodivost, a proto jejich využití způsobuje navýšení hodnoty λ_{ib} u výsledného VIP (zvýšení efektu tepelného mostu v oblasti okraje VIP). Tyto typy VIP se proto využívají především v chladiřenství, v obalovém průmyslu a v dalších oblastech, kde není vyžadována životnost VIP v řádu desítek let. Tyto panely by bylo možné použít i ve stavebnictví v oblastech, kde je možné tyto panely jednoduše demontovat, anebo v aplikacích, kde se předpokládá nižší životnost, např. přechodné stavby, mobilní stavby apod.

V případě jádrových izolantů na bázi SiO_2 je naopak většinou dosahována po zavakuování vyšší počáteční tepelná vodivost většinou okolo 0,004 W/(m.K), nicméně tepelné izolační vlastnosti finálních VIP na bázi SiO_2 jsou podstatně méně závislé na změně jeho interního tlaku, přičemž hodnoty tlaků $p_{1/2}$ se u těchto typů VIP pohybují v řádu stovek mBar (viz. tab. 11). Tyto typy VIP se využívají především v oblasti stavebnictví.

Tabulka č. 11: Přehled klíčových vlastností vybraných jádrových izolantů [24] (vzorky viz. obr. 6 výše a vybraných alternativních jádrových izolantů (viz. část 5 výše)

Vzorek	Součinitel tepelné vodivosti (vakuum) [W/(m.K)]	Součinitel tepelné vodivosti (normální tlak) [W/(m.K)]	Tlak $p_{1/2}$ [mBar]
skleněná vlna (I.)	0,00175	0,0340	3,2
skleněná vlna (II.)	0,00180	0,0341	7,0
skleněná vlna (III.)	0,00265	0,0331	14
nanosilika	0,00380	0,0210	670
PES primární	0,00249	0,0318	2,7
PES recyklované	0,00268	0,0320	2,6
bavlna vlákna (čistá)	0,00346	0,0328	2,5
len vlákna (čistý)	0,00440	0,0375	1,7
len + bavlna	0,00420	0,0373	1,9
len + PES	0,00550	0,0413	1,8
bavlna druhotná (filtry)	0,00510	0,0419	2,5
len druhotný (filtry)	0,00450	0,0434	2,8

Jak dokazují výsledky prezentovaných prací výše v části 5, alternativní jádrové izolanty vyrobené ze snadnoobnovitelných a druhotných surovin disponují vlastnostmi, které jsou blízké (z pohledu závislosti součinitele tepelné vodivosti na tlaku) skleněné vlně. Z pohledu počátečních tepelných vodivostí za vakua (při tlaku 0,05 mBar) disponují lepšími vlastnostmi izolanty z čistých vláken na bázi PES i bavlny. V případě vláken lnu (jak čistých, tak i ve směsi s bavlnou nebo PES vlákny) bylo zjištěno, že vlákna vykazují vysokou tloušťku a nejsou proto pro výrobu VIP tolik výhodná. V případě jemných lněných vláken z filtrů bylo zjištěno, že izolant vyrobený z těchto vláken má srovnatelnou tepelnou vodivost za nízkého tlaku, jako izolant vyrobený z čistých lněných vláken, ale má lepší chování za vyššího tlaku, proto se tato surovina jeví pro výrobu VIP jako výhodnější oproti klasickým vláknům. V případě druhotné bavlny z filtrů byla zjištěna stejná hodnota tlaku $p_{1/2}$ jako u izolantu z klasických bavlněných vláken. Vzorek z druhotných bavlněných vláken však vykazuje výrazně vyšší počáteční tepelnou vodivost za vakua, což je však dáno

nedostatečnou homogenitou a špatnou orientací vláken u zkušebních vzorků vyrobených za laboratorních podmínek. Lze se domnívat, že při vhodné výrobní technologii by i tento izolant mohl vykazovat za vakua velmi dobré tepelně izolační vlastnosti.

Za normálního tlaku vykazují vzorky na bázi PES i bavlněných vláken plně srovnatelné vlastnosti se skleněnou vlnou využívanou pro výrobu VIP. U vzorků s obsahem lněných vláken jsou pak tepelně izolační vlastnosti horší, nicméně s ohledem na typ a tloušťku přírodního vlákna lze dosažené vlastnosti (minimálně v případě čistého lnu a kombinace lnu s bavlnou) označit za dobré. Vzorky z jemných druhotných vláken z filtrů (len i bavlna) vykazovaly vlastnosti nejhorší, nicméně stále srovnatelné s vlastnostmi izolantů na přírodní bázi obdobné objemové hmotnosti.

7. ZÁVĚR

Jak dokazují zahraniční vědecké práce i práce prováděné na VUT v Brně, lze z alternativních surovin (snadnoobnovitelných i druhotných surovin) vyrobit izolanty, které mají dobré nebo dokonce velmi dobré tepelně izolační vlastnosti za normálního tlaku a dají se použít i pro výrobu VIP.

Tyto izolanty mají srovnatelné chování, jako izolanty na bázi skleněné vlny, které se používají pro výrobu VIP. Z pohledu nejnižší dosažitelné hodnoty tepelné vodivosti za vakua hraje roli především tloušťka vláken a jejich uspořádání (včetně objemové hmotnosti). U izolantů na bázi čistých PES nebo bavlněných vláken bylo dosaženo srovnatelných vlastností, jako u izolantů na bázi skleněné vlny. U izolantů na bázi druhotných vláken z filtrů a vláken lýkových (lněná vlákna a směsi vláken) bylo dosaženo obdobné tepelné vodivosti, jako u izolantů na bázi SiO_2 využívaných pro VIP. Výhodou snadnoobnovitelných a druhotných surovin je ale především jejich nižší cena, a lepší environmentální parametry oproti klasickým surovinám. Z pohledu životnosti celých VIP, u kterých bylo využito alternativních jádrových izolantů, potvrzují provedené práce chování podobné VIP se skleněnou vlnou, kdy (viz. obr. 11) při provedeném zrychleném testu stárnutí při teplotě 50°C došlo k postupné degradaci tepelně izolačních vlastností. Tento proces je rychlejší v počáteční fázi a později (cca po 20 dnech) se proces degradace u některých vzorků výrazně zpomaluje. Z pohledu průběhu vývoje součinitele tepelné vodivosti v čase vykazovaly vzorky na bázi recyklovaného PES lepší vlastnosti než vzorky z PES primárního. Jak dokazují provedené studie (viz. obr. 12), vlastnosti VIP s alternativním jádrovým izolantem lze výrazně zlepšit použitím vysoušedel a lapačů plynů, které se aktivně zapojují především v počáteční fázi degračního procesu a zabraňují degradaci tepelně izolačních vlastností vlivem „outgassingu“.

Celkově lze konstatovat, že alternativní jádrové izolanty mají velký potenciál především s ohledem na současný rozvoj využití VIP v obalovém průmyslu a v oblasti transportu. Do budoucna lze očekávat, že se začnou využívat alternativní jádrové izolanty v oblastech, kde není požadována dlouhá životnost, ale je vyšší tlak na nízkou cenu a nízkou počáteční tepelnou vodivost. Dále pak se vzrůstající spotřebou VIP začne postupně docházet k potřebě recyklace VIP po skončení jejich životnosti a alternativní suroviny mohou být kombinovány například s nanosilikou z recyklovaných VIP. Mohou vznikat tzv. hybridní jádrové izolanty, které mohou mít lepší životnost, a bude je možné využívat i v oblasti stavebnictví, například u neprůsvitných částí výplní otvorů a v dalších oblastech, kde bude požadována střednědobá životnost a nebude nutné využívat VIP na bázi čistého SiO_2 .

8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN 73 0540-2 (změna Z1/2021) Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011,
- [2] Zákon 406/2000 Sb (ve znění pozdějších předpisů) o hospodaření s energií,
- [3] Vyhláška č. 264/2020 o energetické náročnosti budov,
- [4] Mandilaras, I., Atsonios, I., Zannis, G., Founti, M., Thermal performance of a building envelope incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS, *Energy and Buildings* 85 (2014) 654-665,
- [5] Brunner, S., Wakili, K., G., Stahl, T., Binder, B., Vacuum insulation panels for building applications - Continuous challenges and developments, *Energy and Buildings*, vol. 85, pp. 592–596., 2014,
- [6] Kalnæs, S., E., Jelle, B., P., Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways, *Applied Energy*, vol. 116, pp. 355–375, 2014,
- [7] Simmler, H., Brunner, S., Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life, *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 11, pp. 1122–1131, 2005,
- [8] Nemanič, V., Žumer, M., New organic fiber-based core material for vacuum thermal insulation, *Energy and Buildings*, vol. 90, pp. 137–141, 2015,
- [9] J. Zach, V. Novák, J. Peterková, and J. Bubeník, Development of Vacuum Insulation Panels with Utilization of Organic By-Products, *Energies*, vol. 13, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13051165.
- [10] Vėjelienė, J., Impact of technological factors on the structure and properties of thermal insulation materials from renewable resources, Vilnius Gediminas Technica University Lithuania, 2012.
- [11] Chybík, J., Přírodní stavební materiály, Grada Publishing, Praha (2009), 272 s., ISBN: 978-80-247-2535-1
- [12] Cristaldi, G., Latteri, A., Recca G., Cicala, G., Composites Based on Natural Fibre Fabrics. Woven fabric engineering, *Sciyo* (2010), 414 s., ISBN 978-953-307-194-7,
- [13] Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., Hroudová, J., Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy and Buildings* 43 (2011), s. 2518 - 2523, ISSN: 0378-7788,
- [14] Zach, J.; Peterková, J.; Dufek, Z.; Sekavčnik, T. Development of vacuum insulating panels (VIP) with non-traditional core materials. *Energy and Buildings*, 2019, vol. 199, no. 2019, p. 12-19. ISSN: 0378-7788.
- [15] online: <http://www.explainthatstuff.com/vacuumflasks.html>
- [16] Fricke, J., Heinemann, U., Ebert, H., P., Vacuum insulation panels – From research to market, *Vacuum* 82 (2008) 680-690, 2008,
- [17] Patentschrift Nr. 516377, Klasse 80b, Gruppe 9 des Reichspatentamtes, Deutsches Reich, Sterchamolwerke Dortmund and Hemman O, Bad Dörenberg, 1930,
- [18] Baetens, R., Jelle, B., P., Thue, J., V., Tenpierik, M., J., Grynning, S., Uvsløkk, S., Gustavsen, A., Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond, *Energy and Buildings*. 42 (2010) 147–172,
- [19] online: www.turvac.eu

- [20] Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., Flores-Colen, I. A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems. *Applied Energy*. 257., 2019,
- [21] online: <https://va-q-tec.com/>
- [22] online: <https://csafeglobal.com/>
- [23] Kwon, J., S Jang, Ch., H., Jung H., Song, T., H., Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009, 52(23-24), 5525-5532. 2009,
- [24] Hanita Coatings, Thermal Conductivity of VIPs as a Function of Internal Pressure, 2015,
- [25] ČSN EN 17140 Tepelněizolační výrobky pro budovy - Vakuové izolační panely vyráběné výrobcem (VIP) – Specifikace, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021,
- [26] Zach, J., Novák, V., Bubeník, J., Sedlmajer, M., Možnosti využití organických vláknitých izolantů na bázi přírodních vláken pro výrobu vakuových izolačních panelů (VIP). *TZB-info*, 2020, č. 49, s. 1-9. ISSN: 1801-4399,
- [27] Zach, J., Novák, V., Peterková, J., Bubeník, J., Development of Vacuum Insulation Panels with Utilization of Organic By-Products. *ENERGIES*, 2020, vol. 13, no. 5, p. 1-11. ISSN: 1996-1073,
- [28] Zach, J., Novák, V., Bubeník, J., Sekavčnik, T., Mihelič, T. Development of VIP based on core insulators made from textile fibers. IVIS 2019, Japan: Faculty of Architecture, Kindai University, 2019. s. 3-6,
- [29] Zach, J., Peterková, J., Zachová, P., Novák, V. Study of thermal insulating properties of insulators based on by-products under vacuum. In International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM; Sofia. International multidisciplinary geoconference SGEM. Bulgaria, Sofia: Surveying Geology & Mining Ecology Management (SGEM), 2019. p. 263-269. ISBN: 978-6-1974-0876-8. ISSN: 1314-2704,
- [30] Heliiová, M., Studium chování vláknitých materiálových struktur za sníženého tlaku, diplomová práce, VUT v Brně, Fakulta stavební, 2019,
- [31] Kováriková, R., Možnosti využití netradičních surovin pro výrobu vakuových tepelných izolací s extrémně nízkou hodnotou tepelné vodivosti, diplomová práce, VUT v Brně, Fakulta stavební, 2018,
- [32] ČSN EN 823 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení tloušťky, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013,
- [33] ČSN EN 12085 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení lineárních rozměrů zkušebních vzorků, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013,
- [34] ČSN EN 1602 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení objemové hmotnosti, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013,
- [35] ČSN EN 826 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Zkouška tlakem, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013,
- [36] ČSN EN 12431 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení tloušťky izolačních výrobků pro plovoucí podlahy, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013,

- [37] ČSN EN 12667 Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001,
- [38] ISO 8301 Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus, International Organization for Standardization, 1991,
- [39] ČSN EN 13501-1+A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019,
- [40] ČSN EN ISO 11925-2 Zkoušení reakce na oheň - Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene - Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

9. PŘEHLED AUTOROVÝCH NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH PUBLIKACÍ

9.1 Původní vědecká práce ve vědeckém časopisu s impakt faktorem

- [1] KORJENIC, A.; PETRÁNEK, V.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *ENERGY AND BUILDINGS*. 2011. 43(9). p. 2518 - 2523. ISSN 0378-7788.
- [2] ZACH, J.; KORJENIC, A.; PETRÁNEK, V.; HROUDOVÁ, J.; BEDNAR, T. Performance Evaluation and Research of Alternative Thermal Insulations based on Sheep Wool. *ENERGY AND BUILDINGS*. 2012. 49(6). p. 246 - 253. ISSN 0378-7788.
- [3] DROCHYTKA, R.; ZACH, J.; KORJENIC, A.; HROUDOVÁ, J. Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste. *ENERGY AND BUILDINGS*. 2012. 58 (2013)(3). p. 319 - 323. ISSN 0378-7788.
- [4] ZACH, J.; NOVÁK, V.; SEDLMAJER, M.; HROUDOVÁ, J. Ceramic masonry units intended for the masonry resistant to high humidity. *Materiali in tehnologije*. 2015. 2015(49). p. 817 - 820. ISSN 1580-2949.
- [5] KORJENIC, A.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions. *ENERGY AND BUILDINGS*. 2016. 2016(116). p. 45 - 58. ISSN 0378-7788.
- [6] REIF, M.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. Study of the properties and hygrothermal behaviour of alternative insulation materials based on natural fibres. *Materiali in tehnologije*. 2016. 2016(50). p. 137 - 140. ISSN 1580-2949.
- [7] KRIVENKO, P.; GUZII, S.; BODNÁROVÁ, L.; VÁLEK, J.; HELA, R.; ZACH, J. Effect of thickness of the intumescent alkali aluminosilicate coating on temperature distribution in reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, 2016, vol. 8, no. 1, p. 14-19. ISSN: 2352-7102.
- [8] ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; KORJENIC, A. Environmentally efficient thermal and acoustic insulation based on natural and waste fibers. *JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY*, 2016, vol. 91, no. 8, p. 2156-2161. ISSN: 0268-2575
- [9] BODNÁROVÁ, L.; HROUDOVÁ, J.; BROŽOVSKÝ, J.; ZACH, J.; VÁLEK, J. Behaviour of cement composites with lightweight and heavyweight aggregates at high temperatures. *Periodica Polytechnica - Civil Engineering*, 2017, vol. 61, no. 2 (2017), p. 272-281. ISSN: 0553-6626.
- [10] PETERKOVÁ, J.; ZACH, J.; SEDLMAJER, M. Development of advanced plasters for insulation and renovation of building constructions with regard to their hygrothermal behaviour. *CEMENT & CONCRETE COMPOSITES*, 2018, vol. 2018, no. 92, p. 47-55. ISSN: 0958-9465.
- [11] ZACH, J.; PETERKOVÁ, J.; DUFEK, Z.; SEKAVČNIK, T. Development of vacuum insulating panels (VIP) with non-traditional core materials. *ENERGY AND BUILDINGS*, 2019, vol. 199, no. 2019, p. 12-19. ISSN: 0378-7788
- [12] ZACH, J.; NOVÁK, V. Polymer Matrix-bonded Polyester Fibers as a Substitute for Materials Used in the Cores of Vacuum Insulation Panels. *Materiali in tehnologije*, 2019, vol. 53, no. 4, p. 511-514. ISSN: 1580-2949.
- [13] ZACH, J.; NOVÁK, V.; PETERKOVÁ, J.; BUBENÍK, J. Development of Vacuum Insulation Panels with Utilization of Organic By-Products. *ENERGIES*, 2020, vol. 13, no. 5, p. 1-11. ISSN: 1996-1073

- [14] BANEVIČIENE, V.; MALAIŠKIENE, J.; ZACH, J.; DVOŘÁK, K. Composite Binder Containing Industrial By-Products (FCCCw and PSw) and Nano SiO₂. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 1604, p. 1-14. ISSN: 1996-1944.
- [15] FEDORIK, F., ZACH, J., LEHTO, M., KYMÄLÄINEN, R., KUISMA, R., JALLINOJA, M., ILLIKAINEN, K., ALITALO, S., Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials, *Energy and Buildings*, Volume 253, 2021, 111528, ISSN 0378-7788,
- [16] KORJENIC, A.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. Schafwolle als alternativer Wärmedämmstoff und ihr hygrothermisches Verhalten. *Bauphysik*. 2014. 36 (2014)(5). p. 249 - 256. ISSN 0171-5445.
- [17] HROUDOVÁ, J.; KORJENIC, A.; ZACH, J.; MITTERBÖCK, M. Entwicklung eines Wärmedämmputzes mit Naturfasern und Untersuchung des? Wärme- und Feuchteverhaltens. *Bauphysik*, 2017, roč. 4, č. 39, s. 261-271. ISSN: 1437-0980.

9.2 Původní vědecká práce ve vědeckém časopisu

- [1] ŠŤASTNÍK, S.; ZACH, J. Untersuchung der termisch-hygrischen Eigenschaften von Ziegeln mit Holraumfüllung aus Recyclingmaterial. *Ernst und Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften*. 2004. 26(1). p. 35 - 38. ISSN 0171-5445.
- [2] BROŽOVSKÝ, J.; ZACH, J. Design Procedure Concerning Composition of Composites Containing Gypsum-Free Cement. *Advanced Materials Research*. 2012. 2012(450-451). p. 719 - 726. ISSN 1022-6680.
- [3] HROUDOVÁ, J.; ZACH, J. Development and study of the possibilities to use natural materials for thermal-insulation systems of ETICS. *Advanced Materials Research*. 2012. 587 (2012)(9). p. 31 - 35. ISSN 1022-6680.
- [4] ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; PETRÁNEK, V.; KOSÍKOVÁ, J.; KORJENIC, A. Investigation of Thermal Insulation Materials Based on Easy Renewable Raw Materials from Agriculture. *Advanced Materials Research*. 2011. 2011(335-336). p. 1412 - 1417. ISSN 1022-6680.
- [5] ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. Studium vybraných vlastností izolačních materiálů z alternativních surovinových zdrojů. *Waste forum*. 2011. 2011(3). p. 163 - 171. ISSN 1804-0195.
- [6] ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; SEDLMAJER, M. Utilization of Alternative Insulation Materials for Thermal Insulating Ceramics Blocks Production. *Advanced Materials Research*. 2012. 482-484(2). p. 1570 - 1575. ISSN 1022-6680.
- [7] ZACH, J.; HELA, R.; HROUDOVÁ, J.; SEDLMAJER, M. Utilization of Lightweight Aggregate from Expanded Obsidian for Advanced Thermal Insulating Plasters Production. *Advanced Materials Research*. 2011. 2011(335-336). p. 1199 - 1203. ISSN 1022-6680.
- [8] ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; SEDLMAJER, M. Hygrothermal behavior of thermal insulating material based on technical hemp and its application in construction. *Advanced Materials Research*. 2014. 860-863 (12). p. 1223-1226. ISSN 1022-6680.
- [9] SEDLMAJER, M.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. Development of masonry components protected against moisture. *Advanced Materials Research*. 2014. 860-863. p. 1248-1251. ISSN 1022-6680.
- [10] BODNÁROVÁ, L.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; VÁLEK, J. Methods for Determination of the Quality of Concretes with Respect to Their High Temperature Behaviour. 8. 2013. p. 260-265. ISSN 1877-7058.
- [11] BODNÁROVÁ, L.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; VÁLEK, J. Development of Concretes with Resistance to High Temperatures in the Czech Republic and Surrounding European Countries. *Advanced Materials Research*. 2013. 651 (2013). p. 120-125. ISSN 1022-6680.

- [12] ZACH, J.; HUBERTOŤ, M.; HROUDOŤ, J. Study of Thermal Technical Properties of Lightweight Concrete with Utilization of Non Stationary Hot-Wire Method. *Advanced Materials Research*. 2013. 650 (2013). p. 333-339. ISSN 1022-6680.
- [13] ZACH, J.; SEDLMAJER, M.; HROUDOŤ, J. Development of building elements with thermal insulation filler based on secondary raw material. *Advanced Materials Research*. 2012. 649 (2012). p. 147-150. ISSN 1022-6680.
- [14] ZACH, J.; KORJENIC, A.; HROUDOŤ, J. Study of behaviour of advanced silicate materials for heating and moisture rehabilitation of buildings. *Advanced Materials Research*. 2013. 650 (2013). p. 167-170. ISSN 1022-6680.
- [15] ZACH, J.; HROUDOŤ, J.; BROŽOVSKÝ, J.; KREJZA, Z.; GAILIUS, A. Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems. *Procedia Engineering*. 2013. 57 (2013). p. 1288-1294. ISSN 1877-7058.
- [16] HROUDOŤ, J.; ZACH, J.; HELA, R.; KORJENIC, A. Advanced, Thermal Insulation Materials Suitable for Insulation and Repair of Buildings. *Advanced Materials Research*. 2013. 688 (2013). p. 54-59. ISSN 1022-6680.
- [17] ZACH, J.; HROUDOŤ, J.; ŽIŽKOVÁ, N. Development of Materials Based on Flax for Thermal Insulation and Thermal Rehabilitation of Structures. *Advanced Materials Research*. 2013. 688 (2013). p. 153-157. ISSN 1022-6680.
- [18] HELA, R.; ZACH, J.; SEDLMAJER, M. Possibilities of regulation of temperature in concrete during hydration by means of selection of suitable input materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. p. 199-203. ISSN 1660-9336.
- [19] ZACH, J.; SEDLMAJER, M.; HROUDOŤ, J.; NEVAŘIL, A. Technology of concrete with low generation of hydration heat. *Procedia Engineering*. 2013. 203 (2013). p. 296-301. ISSN 1877-7058.
- [20] ZACH, J.; HROUDOŤ, J.; SEDLMAJER, M.; KORJENIC, A. Development of advanced masonry structures with utilization of alternative thermal insulating materials. *Advanced Materials Research*. 2014. 897 (2013). p. 113-116. ISSN 1022-6680.
- [21] ZACH, J.; HROUDOŤ, J.; ŽIŽKOVÁ, N. Possibilities of hydrophobization of thermo-insulating materials based on natural resources. *Advanced Materials Research*. 2014. 897 (2013). p. 153-156. ISSN 1022-6680.
- [22] ZACH, J.; HROUDOŤ, J. Study of the properties of the environmentally friendly insulation materials. *Advanced Materials Research*. 2014. 899 (2013). p. 435-439. ISSN 1022-6680.
- [23] SEDLMAJER, M.; ZACH, J.; HROUDOŤ, J. Properties of lightweight thermal insulation plasters. *Advanced Materials Research*. 2014. 1000 (2014). p. 310-313. ISSN 1022-6680.
- [24] ZACH, J.; HROUDOŤ, J.; SEDLMAJER, M.; KORJENIC, A. Study of heat transfer process in structure of thermal insulating materials based on natural fibers. *Advanced Materials Research*. 2014. 1000 (2014). p. 227-230. ISSN 1022-6680.
- [25] BODNÁROVÁ, L.; HROUDOŤ, J.; ZACH, J.; NOVÁKOVÁ, I. Study of Heat Transport in Structure of Concrete. *Advanced Materials Research*. 2014. 1000 (2014). p. 302-305. ISSN 1022-6680.
- [26] ZACH, J.; NOVÁK, V.; HROUDOŤ, J. Utilisation of polyurethane (PUR) granulate in development of new insulating materials. *Advanced Materials Research*. 2014. 1000 (2014). p. 133-136. ISSN 1022-6680.
- [27] ZACH, J.; HROUDOŤ, J.; REIF, M.; KORJENIC, A. Development of thermal insulating plasters with regulated capillary activity. *Advanced Materials Research*. 2014. 1000 (2014). p. 223-226. ISSN 1022-6680.

- [28] ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; NOVÁK, V. Studying of the Behavior of Thermal Insulation Materials Based on Natural Fibers for Incorporation into the Building Structure. In *enviBuild 2014 Buildings and Environment, Advanced Materials Research*. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2014. p. 67 - 70. ISBN 978-80-214-5003-5, ISSN 1022-6680.
- [29] HROUDOVÁ, J.; ZACH, J.; REIF, M.; KORJENIC, A. Non-Traditional Thermal-Insulating and Rehabilitation Materials and their Hygrothermal Behaviour. In *enviBUILD 2014 Buildings and Environment, Advanced Materials Research*. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2014. p. 59 - 62. ISBN 978-80-214-5003-5, ISSN 1022-6680.
- [30] HROUDOVÁ, J.; ZACH, J. Acoustic and Thermal Insulating Materials Based On Natural Fibres Used in Floor Construction. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2014. 8(11). p. 749 - 752. ISSN 1307-6892.
- [31] SEDLMAJER, M.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; BODNÁROVÁ, L. Temperature Control in High Performance Concrete. In *Advanced Materials Research/Binders, Materials and Technologies in Modern Construction, Advanced Materials Research*. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 162 - 165. ISBN 978-3-03835-452-9, ISSN 1022-6680.
- [32] HROUDOVÁ, J.; ZACH, J.; SEDLMAJER, M.; HELANOVÁ, E.; REIF, M. Thermal Insulation Plasters Utilising Natural Fibres. In *Advanced Materials Research/Binders, Materials and Technologies in Modern Construction, Advanced Materials Research*. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 97 - 100. ISBN 978-3-03835-452-9, ISSN 1022-6680.
- [33] HROUDOVÁ, J.; ZACH, J.; SEDLMAJER, M. Development of Thermal Insulation, Capillary Active Plasters Suitable for Historical Buildings. In *Proceedings of the Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Advanced Materials Research*. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 35 - 38. ISBN 978-80-02-02539-9, ISSN 1022-6680.
- [34] ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; SEDLMAJER, M.; NOVÁK, V.; REIF, M. Possibilities of hydrophobization of masonry constructions for high-risk flood areas. In *Proceedings of the Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Advanced Materials Research*. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 70 - 73. ISBN 978-80-02-02539-9, ISSN 1022-6680.
- [35] HROUDOVÁ, J.; SEDLMAJER, M.; ZACH, J. Thermal Insulating Silicate Materials Suitable for Thermal Insulation and Rehabilitation Structures. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2015. 9 (2015)(9). p. 438 - 441. ISSN 1307-6892.
- [36] SEDLMAJER, M.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; ROVNANÍKOVÁ, P. Possibilities of Utilization Zeolite in Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2015. 5(9). p. 446 - 449. ISSN 1307-6892.
- [37] HROUDOVÁ, J.; SEDLMAJER, M.; ZACH, J. Hygrothermal Behaviour of Newly Developed Thermal Insulation Plasters with Natural Fibres. In *Elektronický sborník přednášek ICEBMP 2015 Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky/Ecology and new building materials and products, Advanced Materials Research*. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 63 - 68., ISSN 1022-6680.
- [38] REIF, M.; HROUDOVÁ, J.; ZACH, J. Possibilities of Using Natural Fibres for Production of Particular Insulation for Use in Civil Engineering. In *Elektronický sborník přednášek ICEBMP 2015 Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky/Ecology and new building materials and products, Advanced Materials Research*. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 111 - 116., ISSN 1022-6680.
- [39] SEDLMAJER, M.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. Possibilities of Development of Thermal Insulating Materials based on Waste Textile Fibers. In *Elektronický sborník přednášek ICEBMP 2015 Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky/Ecology and new building materials and*

- products, Advanced Materials Research. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 183 - 188., ISSN 1022-6680.
- [40] ZACH, J.; NOVÁK, V.; SEDLMAJER, M.; HROUDOVÁ, J. Application possibilities of hydrophobised ceramic walling in areas with higher risk of floods. In Elektronický sborník přednášek ICEBMP 2015 Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky/Ecology and new building materials and products, Advanced Materials Research. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 261 - 266., ISSN 1022-6680.
- [41] ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. Study of Hygrothermal Behavior of Insulation Materials Based on Natural Fibers. In Elektronický sborník přednášek ICEBMP 2015 Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky/Ecology and new building materials and products, Advanced Materials Research. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2015. p. 97 - 102., ISSN 1022-6680.
- [42] ZACH J.,HROUDOVÁ J., NOVÁK V. Possibilities of Using By-product Organic Fibres for Manufacturing Thermal Insulation Materials toBe Used in Civil Engineering. Waste forum. 2015. 2015(4). p. 205 - 210. ISSN 1804-0195.
- [43] BODNÁROVÁ, L.; HROUDOVÁ, J.; ZACH, J.; SOVOVÁ, K. Determination of Thermal Conductivity on Lightweight Concretes. In Special Concrete and Composites 2015, Key Engineering Materials (print). Pavel Reiterman. Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2016. p. 163 - 168. ISBN 978-3-03835-579-3, ISSN 1013-9826.
- [44] HROUDOVÁ, J.; SEDLMAJER, M.; NOVÁK, V.; ZACH, J. Simulation of hygrothermal behavior of developed plasters. In Energy Saving and Environmentally Friendly Technologies - Concepts of Sustainable Building, Applied Mechanics and Materials. Švýcarsko, Trans Tech Publications Inc. 2016. p. 598 - 605. ISBN 978-3-03835-709-4, ISSN 1662-7482.
- [45] SEDLMAJER, M.; ZACH, J.; NOVÁK, V.; HROUDOVÁ, J.; HORSKÝ, A. Alternative technology of constructing masonry structures designed for areas with increased seismic activity. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 151, no. 2016, p. 177-182. ISSN: 1877-7058.
- [46] ZACH, J., NOVÁK, V. Study of the Use of Vacuum Insulation as Integrated Thermal Insulation in Ceramic Masonry Blocks. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 1, no. 151, p. 206-213. ISSN: 1877-7058.
- [47] ZACH, J.; SLÁVIK, R.; NOVÁK, V. Investigation of the process of heat transfer in the structure of thermal insulation materials based on natural fibres. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 1, no. 151, p. 352-359. ISSN: 1877-7058.
- [48] SEDLMAJER, M.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. Effect of Plasticizing Admixtures on the Development of Hydration Temperatures and the Properties of Cement Pastes. *Key Engineering Materials* (web), 2017, vol. 1, no. 1, p. 1116-1119. ISSN: 1662-9795.
- [49] HROUDOVÁ, J.; ZACH, J. Computational Simulation of Behaviour of Developed Thermal Insulation Plaster Based on Silicates with the Use of Program WUFI 2D. *Materials Science Forum*, 2017, vol. 2017, no. 908, p. 111-117. ISSN: 1662-9752.
- [50] ZACH, J.; SEDLMAJER, M.; BUBENÍK, J.; NOVÁK, V. Utilization of Non-Traditional Fibers for Light Weight Concrete Production. *Key Engineering Materials* (web), 2018, vol. 760, no. 1, p. 231-236. ISSN: 1662-9795.
- [51] ZACH, J.; PETERKOVÁ, J.; NOVÁK, V. Development of New Advanced Plasters with Waste Fibers Content. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 1, no. 276, p. 248-253. ISSN: 1662-9779.
- [52] ZACH, J.; SEDLMAJER, M.; DUFEK, Z.; BUBENÍK, J. Development of light-weight concrete with utilization of foam glass based aggregate. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 276, no. 1, p. 276-281. ISSN: 1662-9779.

- [53] ZACH, J.; NOVÁK, V. The Effect of Hydrophobization on the Properties of Mortar Mixtures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 385, no. 1, p. 1-6. ISSN: 1757-899X.
- [54] ZACH, J.; NOVÁK, V.; PETERKOVÁ, J. Study of the Behaviour of Thermal Insulation Materials Made with Recycled Textile Fibers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 385, no. 1, p. 1-6. ISSN: 1757-899X.
- [55] ZACH, J.; PETERKOVÁ, J.; BUBENÍK, J.; NOVÁK, V.; ZACHOVÁ, P. Development of new advanced insulation materials from recycled textile. International multidisciplinary geoconference SGEM, 2018, vol. 18, no. 6.3, p. 121-128. ISSN: 1314-2704.
- [56] NOVÁK, V.; ZACH, J. The Protection of Masonry Blocks with Using Hydrophobization Before Load Due to Increased Moisture. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2018, vol. 8, no. 6, p. 2435-2442. ISSN: 2088-5334.

10. KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

Autor předpokládá další rozvoj svých vědeckých, odborných i pedagogických činností v oblasti materiálového výzkumu, především v oblasti vývoje a studia vlastností izolačních materiálů na bázi alternativních surovin a v oblasti vývoje a studia vlastností superizolačních materiálů. Touto oblastí se aktuálně zabývá a snaží se výsledky výzkumu aplikovat do praxe i do výuky, jak v oblasti přednášek (např. v rámci předmětů Izolační materiály a Speciální izolace), tak i v oblasti závěrečných prací (bakalářských i magisterských). Autor by rád dále při svém dalším období prohluboval svoji spolupráci a svých spolupracovníků se zahraničními univerzitami a pracovišti (především s významnými výrobci vakuových izolací). Jedná se především o spolupráci s Univerzitou v Lublaně, Technickou univerzitou ve Vídni, Technickou univerzitou ve Vilniusu, a dále spolupráci s firmami Turvac ve Slovinsku a Hanita Coatings v Izraeli. Dále bude snahou podílet se (jako doposud) na spolupráci v rámci sdružení VIPA INTERNATIONAL a věnovat se řešení aktuálních výzkumných úkolů v oblasti vývoje a studia chování superizolačních materiálů (včetně VIP). Tímto způsobem je možné velice dobře zajistit sdílení poznatků mezi vědeckou komunitou a výrobci, získávat nejnovější informace v dané oblasti, které je možné využít při výuce na VUT v Brně a zároveň výsledky vlastního výzkumu lépe sdílet s širší vědeckou komunitou a výrobní sférou.

Z odborného hlediska by autor rád v následujícím období rozvíjel především následující oblasti výzkumu:

- možnosti využití alternativních surovin při výrobě VIP s využitím v oblasti stavebnictví. Doposud se autor věnoval především vláknitým strukturám jádrových izolantů využitelných v oblasti VIP, které se dají ve stavebnictví využít jen v omezeném množství, proto bude snahou rozvíjet výzkumnou činnost především v oblasti hybridních jádrových izolantů pro VIP, které poskytnou při výrobě VIP vyšší životnost a bude je možné využít i v oblasti běžných stavebních konstrukcí,
- výzkum v oblasti životního cyklu a možnosti zabudování VIP v oblasti novodobých stavebních konstrukcí. V této oblasti předpokládá autor spolupráci s výzkumným týmem z Univerzity v Lublaně a zapojení studentů doktorského i magisterského studia do výzkumných prací,
- další oblastí, kde by autor rád prohluboval svoji výzkumnou i pedagogickou činnost je oblast životního cyklu VIP, včetně možnosti jejich recyklace a znovuvyužití ve výrobě nových VIP nebo v dalších oblastech výroby stavebních materiálů. Aktuálně tuto problematiku řeší spolu se studenty v rámci závěrečných prací. Předpokládá se i

spolupráce v této oblasti v rámci VIPA International (která identifikuje tuto problematiku, jako jeden z největšího problému současné doby, který je spojen s rozvojem využití VIP v posledních dvou letech,

- autor by také rád pokračoval v šíření a prohlubování znalostí mezi doktorandy a studenty bakalářského i magisterského programu a bude se snažit aplikovat všechny nové poznatky v oblasti vývoje nových izolačních materiálů (především materiálů superizolačních) při výuce a vedení závěrečných prací v rámci svého akademického působení na VUT v Brně,
- autor také předpokládá další rozvoj svých činností v oblasti základního výzkumu, především v oblasti šíření tepla uvnitř hybridních struktur VIP a v oblasti inteligentních/smart VIP (tzv. sVIP), které budou umožňovat aktivní sledování jejich vlastností po dobu jejich životního cyklu v konstrukci.

11. ABSTRACT

In the presented work, the author tries to summarize new world knowledge and knowledge from his own scientific research activities, which relate to the development and study of thermal insulation materials based on easily renewable and secondary raw materials under normal and reduced pressure. From a practical point of view, this issue is closely connected with the development and use of vacuum insulation panels (VIP) and with the possible use of alternative core insulations for their production, as substitutes for glass wool and SiO₂-based insulators, which are currently mainly used for VIP production.

These insulators have comparable behavior as glass wool insulators. From the point of view of the lowest achievable value of thermal conductivity under vacuum, the thickness of the fibers, their arrangement and bulk density play a big role. Polyester (PES) or cotton fiber based insulators have comparable properties as glass wool insulators. Insulators based on secondary fibers from filters and bast fibers (flax fibers and fiber mixtures) achieved similar thermal conductivity as in core insulators based on SiO₂.

The advantage of easily renewable and secondary raw materials is mainly their lower price and better environmental parameters compared to conventional raw materials. From the point of view of durability of final VIPs based on alternative core insulators, the performed work confirms the behavior similar to VIPs with glass wool, when during the accelerated aging test at 50 ° C there was a gradual degradation of thermal insulation properties. This process is faster in the initial phase and later (after about 20 days) the degradation process in some samples slows down significantly. From the point of view of the course of development of the thermal conductivity over time, the samples based on recycled PES showed better properties than the samples from the primary PES. As the studies show, the properties of VIPs with an alternative core insulator can be significantly improved by using desiccants and getters, which are actively involved especially in the initial phase of the degradation process and prevent degradation of thermal insulation properties due to outgassing.

Alternative core insulators have great potential, especially given the current development of the use of VIPs in the packaging and transport industries, and alternative core insulators can be expected to be used in the future in areas where long durability is not required but higher pressure is on low cost and low initial thermal conductivity. With the growing consumption of VIPs, the need to recycle VIPs will gradually begin at the end of their service life. Alternative raw materials can be combined with nanosilica from recycled VIPs and so-called hybrid core insulators can be created (with higher durability), and can be used in building constructions in applications where medium durability is required as replacement of VIP based on pure SiO₂.