

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 545*

ISSN 1213-418X

**Jiří Zach**

**VÝVOJ A STUDIUM CHOVÁNÍ  
TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ  
NA BÁZI PŘÍRODNÍCH  
SNADNOOBNOVITELNÝCH SUROVIN**



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

Ing. Jiří Zach, Ph.D.

**VÝVOJ A STUDIUM CHOVÁNÍ TEPELNĚ  
IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ NA BÁZI PŘÍRODNÍCH  
SNADNOOBNOVITELNÝCH SUROVIN**

DEVELOPMENT AND STUDY BEHAVIOR OF THERMAL  
INSULATION MATERIALS BASED ON NATURAL EASY  
RENEWABLE RAW SOURCES

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE  
OBOR: FYZIKÁLNÍ A STAVEBNĚ MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ



BRNO 2016

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tepelně izolační materiály, přírodní vlákna, snadnoobnovitelné suroviny, tepelná vodivost, tepelně vlhkostní chování

## **KEYWORDS**

Thermal insulating materials, natural fibers, easy renewable row sources, thermal conductivity, hygrothermal behavior

## **Název pracoviště, na kterém je uložen rukopis habilitační práce:**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců  
Originál práce je uložen v archivu PVO FAST.

## Obsah:

1	Úvod.....	5
2	Tepelné izolace ze snadno obnovitelných surovinových zdrojů ze zemědělství, lesnictví a chovu dobytka .....	6
3	Organická (přírodní) vlákna .....	8
4	Technologie výroby izolanů na bázi organických (přírodních) vláken .....	9
5	Cíle práce .....	11
6	Metodika práce.....	12
7	Výběr surovin, provedení mikroskopického rozboru a stanovení tloušťky vláken (Etapa č. 1) .....	13
8	Výroba zkušebních vzorků (Etapa č. 2) .....	15
9	Stanovení klíčových vlastností izolanů (Etapa č. 3) .....	17
10	Studium tepelně vlhkostního chování a provádění modifikace vlastností zkušebních vzorků z hlediska vlhkostního chování (Etapa č. 4) .....	20
11	Snížení výrobních nákladů u izolačních materiálů na bázi přírodních vláken (Etapa č. 5) .....	21
12	Možnosti využití izolanů na bázi přírodních vláken jako jádrových izolanů pro výrobu vakuových izolačních panelů (Etapa č. 6) .....	22
13	Závěr.....	23
14	Použitá literatura.....	26

## Představení autora:

Jméno a příjmení: Jiří Zach  
Datum a místo narození: 03. 07. 1977 v Brně  
Národnost: česká



### 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 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.

### Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce:

- 2001 - doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Věveří 95, 602 00 Brno, Výzkumný pracovník;
- 2002 - doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Věveří 95, 602 00 Brno, Akademický pracovník (asistent, od roku 2004 odborný asistent);
- 2003 - doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Věveří 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, Věveří 95, 602 00 Brno, Administrativní manažer centra;
- 2012 - doposud Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, Věveří 95, 602 00 Brno, Senior researcher;

Výzkumné zaměření: Výzkum a vývoj v oblasti stavebních materiálů s tepelně a akusticko izolačními vlastnostmi. Výzkumná činnost v oblasti fyziky stavebních látek. Vývoj nových pokročilých tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních, snadnoobnovitelných a druhotných surovin. Posudková činnosti v oblasti tepelně technických vad stavebních konstrukcí.

Pedagogická činnost: Zavedení předmětu BJ13 – Speciální izolace. Výuka předmětů: BJ13 – Speciální izolace, BJ06 – Fyzika stavebních látek, BJ07 – Izolační materiály, CJ54 – Počítačové vyhodnocení experimentů, CJ11 – Optimalizace užití stavebních látek, CJ01 – Aplikovaný software. Školitel 1 doktoranda s obhájenou prací v roce 2013-

Projekty a granty: Řešitel 1 mezinárodních a 9 národních externích grantů. Podílel a podílí se na řešení dalších 6 VaV projektů.

Publikační činnost do roku 2016: Celkem 7 vědeckých prací v časopisech s IF vyšším než 0,1; 44 prací v časopisech s IF nižším než 0,1 nebo bez IF; 43 příspěvků ve sborníku světového nebo evropského kongresu; 179 příspěvků ve sborníku národního nebo mezinárodního kongresu, symposia nebo konference; 85 publikací v odborném časopise.

# 1 ÚVOD

Používání kvalitních, tepelně izolačních materiálů, správný návrh energeticky úsporných stavebních konstrukcí a v neposlední řadě dodatečné zateplování stávajících konstrukcí má klíčový význam ve snížení jejich energetické náročnosti, čímž dochází rovněž k omezení emisí škodlivých plynů, sazí a prachu. Kvalita životního prostředí, na kterou se v současnosti klade velký důraz, není díky využití těchto materiálů natolik ohrožena, v porovnání s dnes v praxi běžně užívanými tepelně izolačními materiály. Vzhledem k negativním aspektům globálního oteplování je tato problematika obzvláště významná.

Problematika úspory energie a zajištění tepelné pohody uvnitř staveb řeší lidé již od dávné historie. Například již v období antiky došlo k prvním pokusům o aktivní využívání solární energie, aby bylo možné snížit spotřebu dřeva potřebného pro otop. Xenofonem z Efesu byl vypracován koncept tzv. „slunečního domu“, který je znám jako „Sokratův dům“. [1, 2].

Efektivním využitím vlastností přírodních materiálů lze získat moderní stavby, které vytváří tepelnou pohodu a dobré vlhkostní mikroklima. Význam izolačních materiálů na bázi přírodních vláken roste v současnosti i s přihlédnutím negativních aspektům globálního oteplování, a dále z pohledu podmínek Kjótského protokolu, který ČR ratifikovala v říjnu roku 2001. Dále pak s přihlédnutím ke směrnici Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU a požadavkům zákona č. 406/2000 Sb. - o hospodaření energií a souvisejících předpisech (ve znění zákona 318/2012 Sb. ze dne 3. 10. 2012), a s energeticko-klimatickým balíčkem „20-20-20“. Vzhledem k těmto skutečnostem a vzhledem k neustále strmě rostoucím cenám energií a ubývajícím zásobám fosilních paliv se začíná i v ČR pomalu rozšiřovat fenomén nízkoenergetických a pasivních staveb. V současné době se připravuje v rámci EU další koncepce pro snížení emisí CO<sub>2</sub> do roku 2030, kdy by mělo dojít k dalšímu snižování produkce CO<sub>2</sub> a ke zvýšení využití obnovitelných zdrojů energie.

Při výstavbě novodobých konstrukcí lze dosáhnout výrazné úspory CO<sub>2</sub> a současného zlepšení tepelně izolačních vlastností obvodového pláště použitím izolačních materiálů na bázi přírodních vláken. Tyto materiály jsou často výhodné také z ekonomického hlediska a představují moderní materiály vysoké důležitosti z pohledu trvale udržitelné výstavby. Ve většině případů se jedná o materiály na bázi snadnoobnovitelných surovinových zdrojů nebo o vlákna na bázi druhotných surovin. Použitím těchto materiálů by mělo dojít jednak k úsporám v oblasti primární vázané energie, dále pak také v oblasti karbonové stopy spojených s výrobou těchto materiálů a emisí skleníkových plynů (viz výše) v oblasti snížení energie konstrukcí na vytápění užitím izolačních materiálů. [3, 4].

Vlastnosti izolačních materiálů na bázi přírodních vláken jsou ve většině případů velmi dobré a jsou plně srovnatelné s vlastnostmi běžných izolantů. Problematickým faktorem je zde vyšší nasákavost, navlhavost a degradace tepelně izolačních vlastností těchto materiálů vlivem vlhkosti. Dalším významným problémem je často omezená životnost těchto materiálů v konstrukci a degradace klíčových vlastností těchto izolantů při dlouhodobém vystavení prostředí se zvýšenou vlhkostí. Tuto problematiku řeší řada vědeckých prací například [5, 6], nicméně vždy pouze z obecného hlediska, přičemž tyto práce nemapují celkové chování těchto materiálů během jejich životního cyklu a změnu jejich klíčových vlastností po zabudování do konstrukce.

## 2 TEPELNÉ IZOLACE ZE SNADNO OBNOVITELNÝCH SUROVINOVÝCH ZDROJŮ ZE ZEMĚDĚLSTVÍ, LESNICTVÍ A CHOVU DOBYTKA

Tepelně a akusticko izolační materiály na bázi alternativních přírodních surovinových zdrojů představují v dnešní době velmi perspektivní izolační materiály. Jednou z hlavních výhod je rychlá snadnoobnovitelnost přírodních surovinových zdrojů, a také jejich lokální dostupnost. Tyto surovinové zdroje vykazují výhodný poměr užitných vlastností a ceny, jejich produkce a následná úprava je energeticky a enviromentálně úsporná. Mezi ně lze zařadit suroviny pocházející ze zemědělství, lesnictví a z chovu dobytka. Často se také může jednat o druhotné suroviny získané recyklací různých druhů odpadního textilu (tímto způsobem lze získávat například vlákna bavlny nebo juty).

Průzkumy týkající se využívání stavebních hmot vyrobených z přírodních obnovitelných surovinových zdrojů ukázaly, že přírodní materiály většinou vykazují o něco méně příznivé mechanicko-fyzikální vlastnosti. Na druhé straně však bylo také prokázáno, že tyto nedostatky mohou být v praxi vyváženy jinak vysokou úrovní ostatních užitných vlastností. Nízký součinitel tepelné vodivosti a vláknitý charakter většiny rostlinných látek přispívají, po zabudování materiálu do konstrukce vnějšího pláště stavby, k výraznému zlepšení jeho tepelně-izolačních vlastností. Někdy se tyto látky využívají přímo pro výrobu stavebních, tepelně-izolačních materiálů. Přírodní materiály rostlinného původu poskytují oproti běžným silikátovým materiálům vyšší hodnoty tepelné kapacity  $c$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ], proto zabudování takových materiálů do stavby ovlivňuje tepelně-akumulační schopnost stavebních konstrukcí. Lze tak příznivě ovlivnit vnitřní klima v objektech z hlediska tepelné stability budov.

Přírodní materiály rostlinného původu jsou obecně propustné pro vodní páru a mohou akumulovat jisté množství vlhkosti sorpcí ze vzduchu. Příznivou vlastností rostlinné hmoty a materiálů z ní vyrobených je schopnost absorbovat vlhkost do vnitřního pórového systému při zvýšené vlhkosti vzduchu a při snížení vlhkosti vzduchu ji naopak pozvolna uvolňovat do okolního prostředí. Tento mechanismus příznivě ovlivňuje vlastnosti vnitřního mikroklimatu z hlediska vlhkosti vzduchu, především v zimním období, kdy může docházet k dlouhodobému snížení vlhkosti vzduchu uvnitř objektu. V neposlední řadě poskytují materiály na bázi rostlinných vláken dobré zvukově izolační vlastnosti, jak z hlediska vzduchové neprůzvučnosti, tak i akustického útlumu. Konkrétní vlastnosti však přímo závisejí především na struktuře a objemové hmotnosti použitého materiálu.

Nevýhodou většiny rostlinných materiálů je jistá vlhkostní citlivost. Nadměrná dlouhodobá vlhkost může zapříčinit biologickou korozi, tedy degradaci, působením bakterií, plísní či hub na materiál. Z toho důvodu by tyto materiály, zabudované ve stavební konstrukci, měly být vždy spolehlivě odděleny od zdrojů vlhkosti, anebo musí být při jejich zavlhčení zajištěna možnost jejich rychlého vysychání. Při správném návrhu skladby a provedení stavby by však s vlhkostí ve stěně neměly vznikat problémy. Další možností je použití impregnačních přípravků, pomocí níž je možné snížit nasákavost i navlhavost přírodních vláken. Ve většině případů však přírodní izolační materiály ani po provedení impregnace nemohou být dlouhodobě vystaveny vlhkosti v kapalné podobě.

Další nevýhodou rostlinných materiálů je jejich hořlavost (reakce na oheň v třídách E a F). Špatné požární vlastnosti je možné zlepšit pomocí přísad retardujících hoření. Požární odolnost konstrukcí z hořlavých materiálů se také značně zvyšuje nehořlavou úpravou povrchů (omítka nebo obklad). Proto je použití přírodních izolačních materiálů vhodné spíše pro menší bytové stavby.

Další významnou charakteristikou přírodních materiálů je skutečnost, že mají příznivý vliv na lidské smysly. Mnoho lidí dnes trpí alergiemi a zdravotními indispozicemi, které jsou vyvolány právě látkami zabudovanými do konstrukcí. Tyto problémy lze vyřešit právě aplikací stavebních hmot z přírodních surovinových zdrojů do konstrukcí. Přírodní stavební materiály dobře regulují

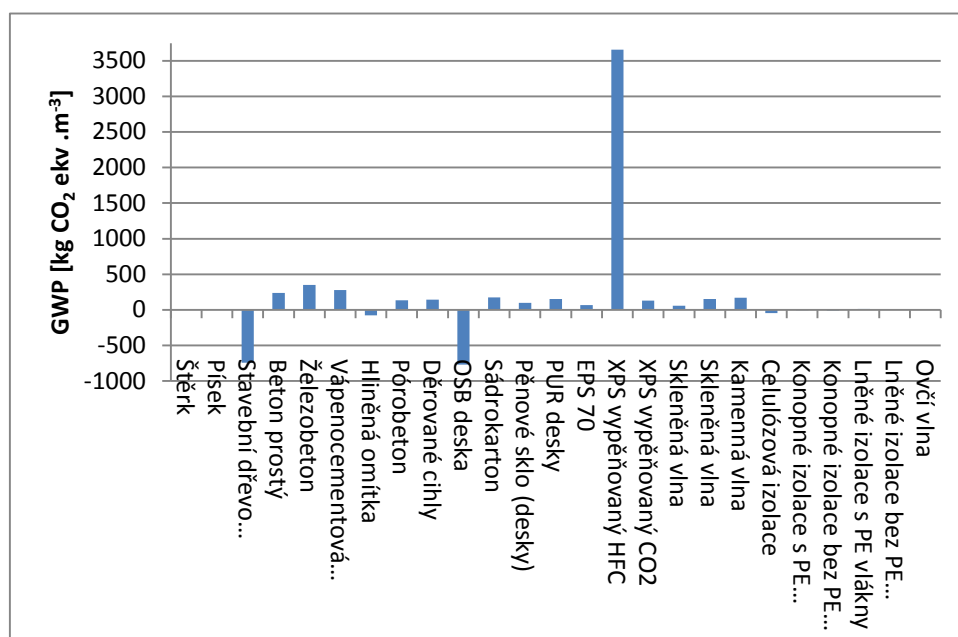
vlhkost vzduchu ve vnitřním prostředí, jejich charakteristická vůně působí blahodárně na lidskou psychiku.

Z hlediska emisí CO<sub>2</sub> mohou materiály na bázi přírodních vláken vstoupit do výrobního procesu jako sekundární suroviny s nízkou nebo dokonce nulovou energetickou bilancí a nulovými emisemi CO<sub>2</sub>. V případě odpadů určených ke spalování po skončení jejich životního cyklu, je recyklace proces pozitivní z hlediska emisí CO<sub>2</sub> (snížení emisí CO<sub>2</sub> díky recyklaci procesu). Snadno obnovitelné surovinové zdroje na přírodní bázi ze zemědělství vstupují do výrobního řetězce s negativní bilancí emisí CO<sub>2</sub>. Díky tomuto důsledku se celkové emise CO<sub>2</sub> finálního materiálu nebo výrobku sníží. S dobrou výrobní technologií může být konečná bilance CO<sub>2</sub> výrobního procesu i negativní.

Materiály na bázi přírodních vláken vykazují jen velmi nízkou hodnotu potenciálu globálního oteplení (*GWP*), případně mají hodnotu *GWP* zápornou. Celkově je závislá hodnota *GWP* především na technologii a zpracování vlákna a na počtu a náročnosti technologických kroků, které jsou při výrobě vlákna použity. Celkově však dochází k nejvýraznějším emisím CO<sub>2</sub> v procesu růstu rostlin, kdy je nutné započítat emise uvolněné při obdělávání zeminy, setí semen, sklizni a následné dopravě a úpravě zemědělských rostlin/plodin. Pokud je však zemědělská rostlina pěstovaná na vlákno, je velmi složité tyto prvotní emise CO<sub>2</sub> ovlivnit. Velmi podobné je to i s problematikou primární zabudované energie *PEI*. Pro snížení hodnoty *GWP* a *PEI* existují v zásadě dvě cesty, které je možné i vzájemně kombinovat:

1. Využití zemědělských plodin, které nejsou primárně určeny pro výrobu vláken (většinou pěstování na semeno) a stonků plodiny představuje nevyužitý odpad, který je možné dále recyklovat,
2. Omezení technologických procesů při zpracování rostliny na vlákno. Pro některé typy stavebních izolací je možné využít méně kvalitní vstupní vlákno (s nižší čistotou), které je možné připravit technologickou úpravou přímo na poli bez nutnosti dalšího zpracování v tárnách.

Tato problematika bude dále podrobně řešena v rámci praktické části předkládané práce. Celkově je však při hodnocení *GWP* a *PEI* nutné přihlídnout k objemové hmotnosti daných materiálů.



Obr. 1: Přehled hodnot *GWP* u vybraných stavebních materiálů přepočítaných na 1m<sup>3</sup>



### 3 ORGANICKÁ (PŘÍRODNÍ) VLÁKNA

Přírodní vlákna dělíme na vlákna živočišná, která se získávají (především) ze srsti zvířat (např. ovčí vlna), a rostlinná vlákna, 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. Rozlišujeme rostlinná vlákna [7, 8]:

- lýková (len, konopí, juta, kenaf, ramie...),
- ze semen (bavlna, kapok...),
- z listů rostlin (sisal, abaka...),
- z plodů rostlin (kokos...).

V rámci ČR se nejvíce využívají vlákna lýková, a to především vlákna lněná, konopná a jutová. Dále vlákna ze semen, a to vlákna bavlněná.

Využití těchto vláken pro výrobu tepelných izolací s využitím ve stavebnictví je v ČR relativně nové. Průmyslová výroba těchto izolantů v ČR začala cca před 10 lety (v letech 2006–2007). Nicméně existují některé příbuzné materiály získávané z druhotných surovin, například partikulární izolace z rozvlákněného papíru, které jsou na trhu v ČR již od roku 1991 (firma CIUR a.s. – materiál Climatizer +). Obecně se však tyto technologie dostávají do ČR z ostatních zemí, využití papíru pro výrobu partikulárních izolací je technologií užívanou historicky v především v Kanadě (například Kanadská firma Climatizer Insulation od roku 1977). Výroba vláknitých izolací na bázi odpadního textilu byla již v dřívějších dobách využívána například v USA nebo například v Jihoafrické republice. Co se týká izolací na bázi lýkových vláken, ty jsou například již dlouhodobě využívány a vyráběny v Německu, Francii, Holandsku a Finsku

Přírodní vlákna se skládají vždy ze svazků vláken a složení a tvar vláken je typický pro každou jednotlivou rostlinu a typ vláken. Každý svazek obsahuje několik desítek jednotlivých buněk nebo elementárních vláken (mikrofibril) spojených dohromady (pektinem). V případě lýkových vláken pak jeden stonek obsahuje 20–50 svazků vláken. Elementární vlákna se dále skládají z několika vrstev. Uvnitř buňky se nachází, pro lýková vlákna typický, lumen, který prostupuje celou délkou vlákna. Délka technického vlákna je závislá na výšce rostliny. Obecně rostlinná i živočišná vlákna mají různý tvar:

- Bavlněné vlákno má charakter zkroucené stužky, v příčném řezu fazolovitého tvaru;
- Lněné vlákno je tvořeno z vláken elementárních, jejichž tvar odpovídá až šestibokému hranolu, jehož oba konce jsou zakončeny špičkami;
- Konopné vlákno je tvořeno z elementárních vláken vřetenovitého tvaru s tupými nebo rozvětvenými konci. Z počátku vegetačního období rostlin jsou vlákna kulatá a postupně získávají mnohoúhelníkový tvar;
- Sisal má elementární vlákna mnohoúhelníkového tvaru se zaoblenými konci;
- Vlákna ovčí vlny mají přibližně válcový tvar, přičemž je tvoří tzv. pokožka, kůra a dřeň. [9]

Tab. 1: Přehled tlouštěk a délek vybraných druhů přírodních vláken [10]

Druh vlákna	Tloušťka vlákna [ $\mu\text{m}$ ]	Délka vlákna [cm]
Bavlna	10 – 35	1,2 – 5,5
Len	15 – 18 (elementární) až 600 (technické)	2,5 – 3 (elementární) 60 – 80 (technické)
Konopí	15 – 50 (elementární) až 600 (technické)	1,5 – 2 (elementární) 100 – 200 (technické)
Kenaf	20 (elementární)	0,25 (elementární) Až 200 (technické)
Sisal	17 – 50 (elementární) 50 – 200 (technické)	6 - 10
Juta	18 – 25 (elementární) 25 – 200 (technické)	0,1 – 0,5 (elementární) 150 – 400 (technické)
Ananas	20 – 80	5 – 10
Kokos	10 – 20 (elementární) 50 – 450 (technické)	0,1 (elementární) 10 – 30 (technické)
Ovčí vlna	10 – 40	5 – 40
Hedvábí	4	30000 – 90000

## 4 TECHNOLOGIE VÝROBY IZOLANTŮ NA BÁZI ORGANICKÝCH (PŘÍRODNÍCH) VLÁKEN

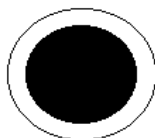
Z pohledu výroby izolačních materiálů z organických/přírodních vláken v podobě průmyslově vyráběných izolačních rohoží a desek existuje v současné době na světě několik technologií, které se od sebe liší ve způsobů vzájemného pojení vláken a také ve způsobu jejich orientace. Tyto technologie vychází obecně ze zavedených technologií textilního průmyslu a jsou upraveny pro výrobu izolačních materiálů.

V závislosti na zvolené technologii se liší výsledné vlastnosti izolantů a také i jejich kvalita. U některých technologií existují obecná omezení, například v podobě maximální možné tloušťky vyráběné izolace, maximální nebo minimální objemové hmotnosti izolace, apod. Každá z výrobních technologií je také jinak citlivá na kvalitu a čistotu vstupních surovin. Obecně existují tři základní technologie:

1. **mechanické pojení** (technologie vpichování, zpevňování paprsky vody),
2. **chemické pojení**,
3. **termické pojení** (pojení pojivovými bikomponentními vlákny, technologie kolmo kladených netkaných textilií /technologie Strutto/). [11]

V ČR je pro výrobu stavebních izolací nejvíce používaná metoda termického pojení v různých modifikacích. Výrobní technologie termického pojení je založena na mykání a tepelném pojení

směsi vstupních vláken a pojivových vláken. Ke spojování vlákenné vrstvy se používají dvoukomponentní vlákna (tzv. BiCo vlákna) nebo vlákna s nízkým bodem tání. V případě BiCo vláken se jedná o dvouvrstvá vlákna složená z dvou druhů plastických látek s rozdílným bodem tání. Vnitřní vlákno má výstužnou funkci a jeho bod tání je vždy podstatně vyšší než je tomu u plastické látky, která tvoří obal vlákna. Nejčastěji se používají vlákna na bázi polyethylenu, polypropylenu a polyesteru. Například u polyesterových BiCo vláken je vnitřní část tvořena z polyesterového jádra s bodem tavení 250 °C, které je obaleno vnějším obalem z nízkotavitelného polyesteru s teplotou tavení 120°C.



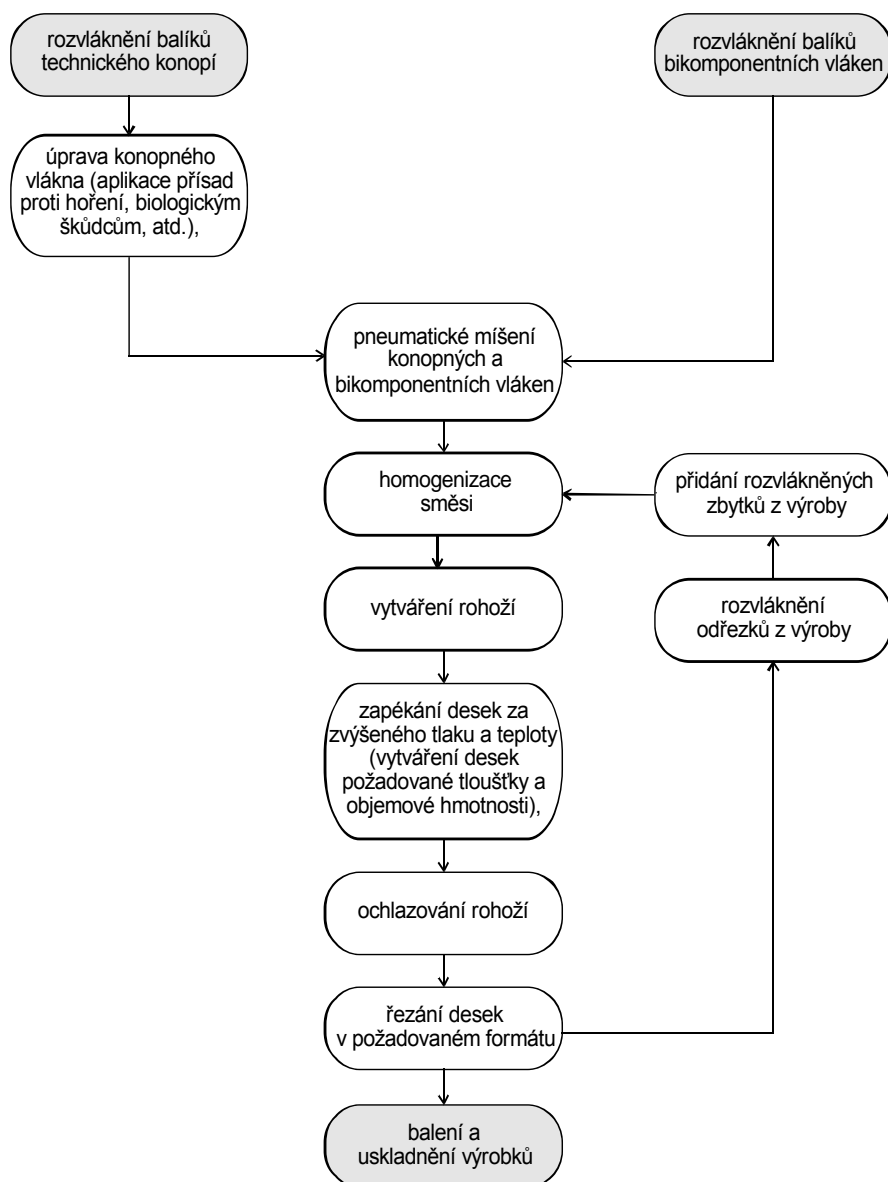
Obr. 2: Schematický náčrt průřezu bikomponentního vlákna [11]

Samostatnou skupinu nových, progresivních pojivových vláken tvoří tzv. PLA vlákna. Jedná se o polylaktidová vlákna, což jsou vlákna na bázi kyseliny polylactonové. Základní biopolymer se vyrábí pro různé aplikace v rozdílných kvalitách. Zásadní výhodou biopolymeru PLA je, že může být vyráběn biotechnologickými procesy z plně obnovitelných přírodních zdrojů – biomasy. Pro účely výroby pojivových vláken se získává biopolymer nejčastěji z kukuřičného škrobu. PLA vlákna podléhají biodegradaci, proto z hlediska zpracování odpadu jsou produkty s PLA vlákny plně recyklovatelné případně ekologicky likvidovatelné po skončení doby životnosti. [12]

Výroba izolačních rohoží může probíhat mnoha způsoby, přičemž nejrozšířenější je tzv. Air-Lay metoda, která je založena na aerodynamickém tvarování jednotlivých vrstev rohože. Dochází zde k působení vzduchu na jednotlivá vlákna a k jejich postupnému skládání do vrstev. Tímto způsobem docílíme rovnoměrného rozložení vláken po celé ploše.

Samotná výroba izolačních rohoží metodou Air-Lay probíhá v následujících krocích:

- rozvlákňování balíků vstupních vláken,
- úprava vláken, aplikace přísad proti hoření, proti biodegradaci a vlhkosti (většinou zkrápěním/nástřikem vodných roztoků a disperzí),
- sušení vláken (úprava vlhkosti na požadovanou hodnotu. U přírodních vláken je optimální vlhkost v rozmezí 8 – 12 %),
- rozvlákňování balíků pojivových vláken,
- pneumatická přeprava a míšení vláken,
- přidávání zbytků z výroby, které se po zpětném rozvlákňování vrací zpět do výrobního cyklu,
- mechanické míchání vláken,
- homogenizace vláken,
- vytváření izolační rohože vrstvením na pás,
- zapékání rohože za zvýšené teploty, rohož se protahuje mezi dvěma pásy se snižující se vzdáleností/šířkou štěrbinou, čímž dochází ke zhušťování rohože na požadovanou tloušťku a objemovou hmotnost,
- chlazení izolační rohože,
- řezání/sekání rohože do požadovaných rozměrů (většinou pomocí gilotinové sekačky) – zbytky se rozvlákňují a vrací zpět do výroby,
- balení a skladování.



Obr. 3: Schématický náčrt výroby izolačních rohoží pomocí termického pojení

Mezi nejvýznamnější výrobce strojních technologií v oblasti výroby izolačních rohoží metodou termického pojení patří firmy Bematic a Cormatex. V ČR v současné době provozují tyto linky například firmy Juta a Retex (v obou případech se jedná o linky firmy Bematic).

## 5 CÍLE PRÁCE

Cílem habilitační práce byl výzkum v oblasti vývoje a studia chování nových tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních snadnoobnovitelných surovin. Jedná se především o vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních organických vláken pocházejících ze zemědělství nebo chovu dobytka (včetně druhotných vláken), a dále pak o studium jejich chování a vlastností po zabudování do konstrukce.

Cílem práce bylo také posouzení ekonomické výhodnosti těchto materiálů a provedení návrhu snížení výrobních nákladů u těchto izolantů a provedení výzkumu možného speciálního uplatnění těchto izolantů v oblasti vakuových izolací.



## 6 METODIKA PRÁCE

Práce byla rozdělena do několika etap, které na sebe logicky navazovaly:

1. **Etapa č. 1** byla věnována vytipování a **výběru potenciálně zajímavých vstupních surovin** a provedení jejich základního rozboru, který spočíval ve stanovení délek, tloušťek a čistoty vláken. V rámci této etapy byly vybrány suroviny v podobě přírodních vláken pro výrobu zkušebních vzorků v rámci navazující etapy č. 2. Výběr byl proveden především s ohledem na dostupnost jednotlivých zdrojů vláken, jejich vlastností, a také na základě provedené literární rešerše, v rámci níž byly jednotlivé skupiny vláken vytipovány. Jednotlivé vybrané typy vláken jsou podrobně popsány níže.
2. **Etapa č. 2** byla věnována **výrobě zkušebních vzorků**. Výroba vzorků byla provedena ve všech případech metodou termického pojení, a to buď s rovnoběžnou nebo kolmou orientací vláken. Výroba zkušebních vzorků byla provedena na několika výrobních linkách. Jednalo se především o výrobní linky firem Canabest, Retex a Jilana.
3. **Etapa č. 3** byla věnována **stanovení klíčových vlastností izolantů**. Jednalo se především o stanovení součinitele tepelné vodivosti. Tepelná vodivost byla u všech vzorků stanovena stacionární metodou desky (metodou měřidla tepelného toku dle ČSN 727012-3 a ISO 8301). Měření byla prováděna na vzorcích vysušených i na vzorcích s různou vlhkostí, dále pak měření byla prováděna při různých středních teplotách (standardní měření byla prováděna při střední teplotě +10°C). Dále se jednalo o stanovení mechanických, akustických a sorpčních vlastností a o stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření.
4. **Etapa č. 4:** byla věnována **studiu tepelně vlhkostního chování a provádění modifikace vlastností zkušebních vzorků z hlediska vlhkostního chování**. V rámci této etapy byla prováděna série měření na vzorcích v závislosti na objemové hmotnosti a vlhkosti, a dále byla ověřena možnost hydrofobizace přírodních vláken pro snížení jejich nasákavosti a navlhavosti.
5. **Etapa č. 5:** byla věnována možnostem **snížení výrobních nákladů** u izolačních materiálů na bázi přírodních vláken pro zvýšení jejich konkurenceschopnosti na trhu. Jednalo se o studium možností eliminace některých technologických operací v oblasti přípravy vláken, aby bylo dosaženo jejich nižší ceny a tím došlo ke snížení výrobních nákladů izolantu.

**Etapa č. 6:** byla věnována **možnostem využití izolantů na bázi přírodních vláken jako jádrových izolantů pro výrobu vakuových izolačních panelů (VIP)**. Jednalo se o studium chování vyvinutých izolantů za sníženého tlaku a možnostem jejich modifikace, aby bylo dosaženo optimálních tepelně izolačních vlastností za sníženého tlaku blízkého k vakuu.

V rámci praktických laboratorních měření bylo na zkušebních vzorcích vláken a tepelných izolantů z nich vyrobených provedeno následující:

1. Provedení mikroskopického rozboru a stanovení tloušťky vláken,
2. Stanovení součinitele tepelné vodivosti (dle ČSN EN 12667, ČSN 72 7012-3, ISO 8301),
3. Stanovení tloušťky (dle ČSN EN 823),
4. Stanovení délky a šířky (EN 822),
5. Stanovení objemové hmotnosti (ČSN EN 1602),
6. Stanovení krátkodobé nasákavosti částečným ponořením (ČSN EN 1609),
7. Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky (ČSN EN 1607),
8. Stanovení pevnost v tlaku/napětí při 10% deformaci (ČSN EN 826),

9. Stanovení propustnosti pro vodní páru (ČSN EN 12086),
10. Stanovení dynamické tuhosti (ČSN ISO 9052-1),
11. Stanovení činitele zvukové pohltivosti (ČSN ISO 10 534 – 1).
12. Stanovení rychlosti proudění vzduchu ve struktuře izolantů.

## 7 VÝBĚR SUROVIN, PROVEDENÍ MIKROSKOPICKÉHO ROZBORU A STANOVENÍ TLOUŠŤKY VLÁKEN (ETAPA Č. 1)

Pro výrobu zkušebních vzorků bylo použito několik různých druhů surovin, které se od sebe vzájemně lišily jednak druhem vláken, a také jejich čistotou. Snahou při výběru vláken bylo především:

1. Zohlednit lokální dostupnost surovin v ČR,
2. Zvolit suroviny cenově dostupné,
3. Zvolit suroviny, které je možné získat jako suroviny druhotné úpravou zemědělských, průmyslových a komunálních odpadů.

Na základě výše uvedených kritérií byla tedy vybrána:

- a. **konopná vlákna** – jednalo se o vlákna technického konopí pěstovaného v ČR, Rakousku a Francii. V rámci výzkumných prací byla použita vlákna připravena technologií rosení i vlákna nerosená. Dále pak se jednotlivé typy vláken lišily svou kvalitou, především čistotou vláken (tzn. obsahem pazdeří). V případě konopí byla konkrétně použita:

- I. čistá konopná vlákna vyrobena roseným způsobem označena jako **surovina K/JR**,
- II. čistá konopná vlákna vyrobena neroseným způsobem označena jako **surovina K/JN**,
- III. hrubá konopná vlákna s vysokým obsahem (okolo 40%) pazdeří označena jako **surovina K/H**,

Dodavatelem vláken byly firmy Canabia a Canabest.

- b. **lněná vlákna** – jednalo se o vlákna lnu olejného pěstovaného především v ČR nebo ve Francii. Byla použita klasická vlákna lnu pěstovaného na vlákno, a také byla ověřena možnost využití zbytků (rostlin) lnu olejného pěstovaného na semeno, který se standardně nevyužívá pro získávání vláken a je odpadem vznikajícím při pěstování lnu na semeno. V případě lnu byla konkrétně použita:

- I. čistá vlákna lnu olejného pěstovaného na vlákno s minimálním podílem pazdeří označena jako **surovina L/J**,
- II. vlákna lnu olejného s vyšším podílem pazdeří pěstovaného na vlákno s minimálním podílem pazdeří označena jako **surovina L/H**,
- III. vlákna lnu olejného pěstovaného na semeno, která byla připravena podrcením stonku lisovaného přímo na poli a označena jako **surovina L/A**,
- IV. vlákna lnu olejného pěstovaného na semeno, která byla připravena úpravou suroviny L/A posekáním/pokrácením vláken trhacím zařízením a označena jako **surovina L/B**
- V. vlákna lnu olejného pěstovaného na semeno, která byla připravena klasickým způsobem, jednalo se o upravený stonek avivovaný stonek posekaný a pokrácený trhacím zařízením a označena jako **surovina L/C**.

Dodavatelem vláken byly firmy Canabia, Canabest a Retex.

- c. **jutová vlákna** – jednalo se o čistá jutová vlákna dovážená do ČR z Asie dodaná firmou Canabia označená jako **surovina J/J**.

d. **vlákna z ovčí vlny** – jednalo se o vlákna vznikající jako odpad při zpracování vlny v česárnách vlny. Tato surovina byla volena zcela záměrně, protože cena surové vlny je velmi vysoká a výsledný izolant z čisté vlny by nebyl konkurenceschopný na stavebním trhu, byla snaha hledat nějaké alternativní řešení. Byly použity dva typy vláken lišících se svou jemností:

- I. jemná vlákna – jednalo se o vlákna ovčí vlny s převažujícím podílem jemných vláken s tloušťkou 23 mikrometrů označena jako **surovina V/23**,
- II. hrubá vlákna – jednalo se o vlákna ovčí vlny s převažujícím podílem hrubších vláken s tloušťkou 33 mikrometrů označena jako **surovina V/33**.

Dodavatelem vláken byly Nejdecké česárny vlny.

e. **recyklovaná textilní vlákna** – jednalo se o vlákna s převažujícím podílem bavlny. Vlákna byla připravena rozvlákněním vyřazeného textilu v podobě oblečení i technického textilu. Textil byl vyčištěn a byla z něj připravena trhanina (v závodu SK-Text Senica). Celkem byly využity následující typy vláken:

- I. textilní vlákna hrubě upravená s převažujícím podílem bavlny označena jako **surovina T/R**,
  - II. textilní vlákna čištěná s převažujícím podílem bavlny označena jako **surovina T/F**.
  - III. textilní vlákna recyklovaná s převažujícím podílem polyesteru jako **surovina T/PES**.
- Dodavatelem vláken byly firmy Canabest a Retex (úprava vláken proběhla v závodu SK-Text Senica).

Na vzorcích vláken byl proveden mikroskopický rozbor a byla stanovena délka a tloušťka vláken. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 2: Přehled naměřených délek a tlouštěk surovinových vláken

Označení vlákna	Popis vlákna	Tloušťka $t$ [mm]	Sm. odchylka $s_t$ [mm]	Délka $l$ [mm]	Sm. odchylka $s_l$ [mm]
K/JR	Konopí rosené	0,057	0,024	66,24	19,22
K/JN	Konopí nerosené	0,079	0,018	64,03	24,46
K/H	Konopí hrubé	0,155	0,045	58,15	21,52
L/H	Len hrubý	0,115	0,025	56,15	20,39
L/J	Len čistý jemný	0,059	0,015	61,25	18,55
L/A	Len na semeno hrubý	0,205	0,055	59,82	21,58
L/B	Len na semeno pokrácený	0,159	0,042	56,79	22,24
L/C	Len na semeno plně upravený	0,115	0,038	54,35	23,63
J/J	Juta jemná	0,094	0,022	71,21	15,45
V/23	Vlna jemná	0,024	0,005	28,11	12,04
V/33	Vlna hrubá	0,041	0,008	92,01	20,22
T/R	Textil hrubý	0,039	0,008	42,05	15,24
T/F	Textil čištěný	0,028	0,006	45,22	11,27
T/PES	Textil s převažujícím podílem PES	0,045	0,009	55,73	21,74

## 8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ (ETAPA Č. 2)

Ze surovinových vláken byly dále vyrobeny zkušební vzorky. Pro výrobu vzorků byly využity různé výrobní linky, jednalo se o výrobní linky firem Canabest, Retex a Jilana, přičemž v případě firem Canabest a Retex byla použita pro výrobu metoda termického pojení (Air lay metoda) s kladením vláken ve směru desky, u firmy Jilana se jednalo o metodu termického pojení s kolmým kladením vláken (o metodu Strutto). Podíl použitých bikomponentních vláken se pohyboval v rozmezí 10% – 20% hmotnostně.

V úvodu prací byly vyrobeny zkušební vzorky izolačních rohoží z lněných, jutových a konopných vláken. V případě konopí byly použity dva typy vláken: konopí čisté nerosené s podílem pazdří do 12% (K/JN) a konopí hrubé s podílem pazdří do 32% (K/H), v případě lnu byl použit hrubý len (L/H). Ve všech případech byly vzorky vyrobeny metodou termického pojení Air lay metodou s použitím 20% pojivových bikomponentních vláken na bázi PES. Výroba byla zajištěna firmou Canabia. Složení zkušebních vzorků je uvedeno v následující tabulce. V případě konopí byly vyrobeny vzorky různých objemových hmotností. U lnu a juty byly vyrobeny vzorky měkčných izolací o nižší objemové hmotnosti.

Tab. 3: Složení zkušebních vzorků jutových, lněných a konopných izolantů

Vzorek č.	J/J	L/H	K/JN	K/H
J	100%	-	-	-
L	-	100%	-	-
K-1	-	-	-	100%
K-2	-	-	100%	-
K-3	-	-	-	100%
K-4	-	-	100%	-

Pro studium vlivu druhu a tloušťky vlákna bylo navrženo dalších 18 receptur zkušebních vzorků ze dvou druhů lněných a dvou druhů konopných vláken. Ve všech případech byly vzorky vyrobeny metodou termického pojení Air lay metodou s použitím 15% pojivových bikomponentních vláken na bázi PES. Výroba byla zajištěna firmou Canabest na výrobní lince v Poštorné u Břeclavi. Ve všech případech byly vyrobeny vzorky měkčných izolací o nižší objemové hmotnosti. Složení zkušebních vzorků je uvedeno v tabulce níže.

Tab. 4: Složení zkušebních vzorků – měkčné izolace ze lnu a konopí

Vzorek č.	L/H	L/J	K/JR	K/JN
K+L-1	50%	0%	0%	50%
K+L-2	0%	50%	25%	25%
K+L-3	0%	50%	25%	25%
K+L-4	0%	50%	50%	0%
K+L-5	0%	50%	50%	0%
K+L-6	0%	50%	0%	50%
K+L-7	0%	0%	0%	100%
K+L-8	0%	0%	50%	50%
K+L-9	0%	0%	100%	0%
K+L-10	30%	0%	0%	70%
K+L-11	30%	0%	0%	70%
K+L-12	30%	0%	0%	70%
K+L-13	50%	0%	0%	50%
K+L-14	50%	0%	0%	50%
K+L-15	50%	0%	0%	50%
K+L-16	70%	0%	0%	30%
K+L-17	70%	0%	0%	30%
K+L-18	70%	0%	0%	30%



Dále byl vyroben vzorek izolantu se zastoupením pouze jemných rosených konopných vláken K/JR metodou Strutto ve výrobním závodě Jilana. Vzorek v podobě lamely byl pojen 15 % pojivových bikomponentních vláken a byl označen **ST-1**.

Dále byly vyrobeny pro ověření možnosti snížení výrobních nákladů tři typy izolantů s vyšší objemovou hmotností, kde byla ověřena možnost eliminace některých technologických operací při výrobě ve fázi přípravy a úpravy vstupního vlákna. Byly vyrobeny izolanty ze lnu olejného pěstovaného na semeno.

Tab. 5: Složení zkušebních vzorků jutových, lněných a konopných izolantů

Vzorek č.	L/A	L/B	L/C
L-A	100%	-	-
L-B	-	100%	-
L-C	-	-	100%

Dále bylo navrženo celkem 11 receptur izolací z ovčí vlny. Vzorky se od sebe lišily složením, a také výrobní objemovou hmotností. Ve všech případech byly vzorky vyrobeny metodou termického pojení Air lay metodou s použitím 15% pojivových bikomponentních vláken na bázi PES. Výroba byla zajištěna firmou Nejdecké česárny vlny. Ve všech případech byly vyrobeny vzorky měkkých izolací o nižší objemové hmotnosti. Složení zkušebních vzorků je uvedeno v tabulce níže

Tab. 6: Složení zkušebních vzorků – měkké izolace z ovčí vlny

Vzorek č.	V/23	V/33
V-1	50%	50%
V-2	50%	50%
V-3	50%	50%
V-4	50%	50%
V-5	100%	0%
V-6	100%	0%
V-7	100%	0%
V-8	0%	100%
V-9	0%	100%
V-10	0%	100%
V-11	0%	100%

(recepturu č. 3 se nepodařilo při prototypové výrobě vyrobit v požadované homogenitě, proto byla dále z praktických testů vyřazena)

Dále bylo navrženo celkem 5 receptur textilních izolací. Vzorky se od sebe lišily složením, a také výrobní objemovou hmotností. Ve všech případech byly vzorky vyrobeny metodou termického pojení Air lay metodou s použitím 15% pojivových bikomponentních vláken na bázi PES. Výroba byla zajištěna firmou Retex. Ve všech případech byly vyrobeny vzorky měkkých izolací o nižší objemové hmotnosti. Složení zkušebních vzorků je uvedeno v tabulce níže.

Tab. 7: Složení zkušebních vzorků – měkké izolace ze lnu a konopí

Vzorek č.	T/F	T/R	PES
T-1	50%	0%	50%
T-2	0%	0%	100%
T-3	0%	45%	55%
T-4	0%	55%	45%
T-5	0%	0%	100%

## 9 STANOVENÍ KLÍČOVÝCH VLASTNOSTÍ IZOLANTŮ (ETAPA Č. 3)

U vzorků navržených a vyrobených izolantů bylo provedeno stanovení tloušťky  $d$  [mm] dle citované ČSN EN 823 na vzorcích o rozměrech 200 x 200 mm při jmenovitém zatížení 50 Pa. Dále stanovení objemové hmotnosti  $\rho_v$  [kg.m<sup>-3</sup>] dle ČSN EN 1602 na vzorcích 200 x 200 mm. Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno při střední teplotě +10°C a teplotním spádu 10K dle ČSN EN 12669. Měření byla provedena pro jmenovité stlačení při zatížení 50 Pa. Před zkouškou byly zkušební vzorky vysušeny při teplotě 105°C do konstantní hmotnosti.

Tab. 8: Přehled naměřených tlouštěk, objemových hmotností a tepelných vodivostí u zkušebních vzorků izolantů při jmenovitém zatížení 50 Pa dle ČSN EN 823, ČSN EN 1602 a ČSN EN 12667 (ve vysušeném stavu)

Vzorek č.	Tloušťka $d$ [mm]	Objemová hmotnost $\rho_v$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_{10,dry}$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Vzorek č.	Tloušťka $d$ [mm]	Objemová hmotnost $\rho_v$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_{10,dry}$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
J	81,21	26,1	0,0482	V-1	90,06	17,39	0,0378
L	77,41	32,1	0,0442	V-2	90,11	18,16	0,0370
K-1	77,92	30,2	0,0500	V-4	90,05	20,98	0,0365
K-2	79,61	29,6	0,0488	V-5	79,95	21,88	0,0341
K-3	67,02	56,8	0,0419	V-6	70,06	20,80	0,0332
K-4	40,22	82,1	0,0405	V-7	69,97	15,47	0,0355
K+L-1	58,36	34,3	0,0399	V-8	90,04	14,71	0,0409
K+L-2	58,02	34,5	0,0389	V-9	90,11	26,57	0,0374
K+L-3	56,82	31,7	0,0400	V-10	60,05	22,41	0,0381
K+L-4	53,62	30,9	0,0380	V-11	90,06	17,06	0,0382
K+L-5	55,41	31,8	0,0396	T-1	67,55	34,7	0,0360
K+L-6	56,85	33,9	0,0409	T-2	85,10	28,2	0,0424
K+L-7	56,77	27,8	0,0417	T-3	54,05	43,5	0,0367
K+L-8	55,45	32,2	0,0410	T-4	49,90	25,5	0,0397
K+L-9	51,22	35,5	0,0418	T-5	63,05	58,7	0,0366
K+L-10	58,49	31,8	0,0382				
K+L-11	57,73	29,4	0,0417				
K+L-12	55,68	30,0	0,0402				
K+L-13	53,99	29,4	0,0393				
K+L-14	61,77	31,8	0,0378				
K+L-15	56,22	29,9	0,0391				
K+L-16	57,57	28,8	0,0384				
K+L-17	54,37	28,5	0,0379				
K+L-18	60,29	28,1	0,0386				

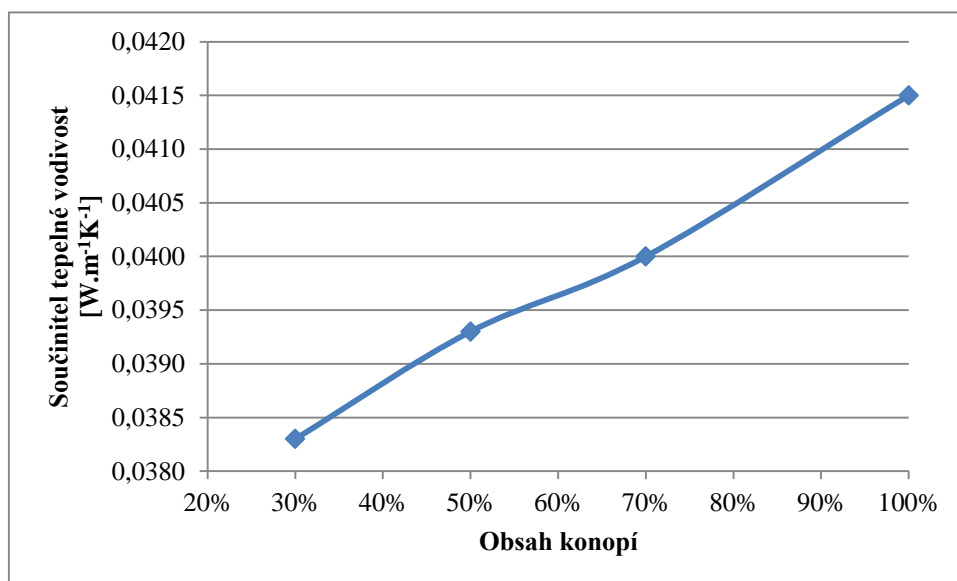
U konopno-lněných vzorků bylo provedeno stanovení koeficientu korelace  $\rho_{x,y}$  pro objemovou hmotnost (X) a součinitel tepelné vodivosti (Y). V daném případě byla zjištěna hodnota korelačního koeficientu  $\rho_{x,y} = 0,22$ , z čehož lze usuzovat, že mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemovou hmotností není žádná signifikantní závislost (v daném rozsahu objemových hmotností). Dalším krokem bylo stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na druhu vláken z naměřených hodnot u jednotlivých receptur.

Tab. 9: Přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti při jmenovitém zatížení 50 Pa vzorků **konopných a lněných izolantů** pro jednotlivé obsahy technického konopí

Obsah konopí	Receptura	$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
30%	16, 17, 18	0,0383
50%	1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15, 13	0,0393
70%	10, 11, 12	0,0400
100%	7, 8, 9	0,0415

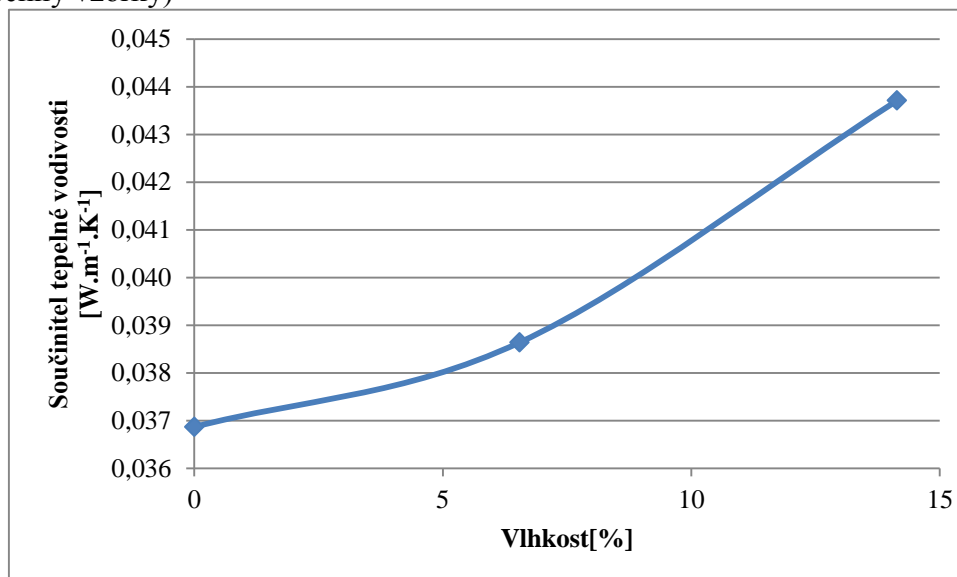
Mezi obsahem konopí a součinitelem tepelné vodivosti byla zjištěna silná závislost, přičemž koeficient korelace byl roven  $\rho_{x,y} = 1,00$ . Z naměřených hodnot je patrné, že z hlediska tepelně izolačních vlastností vykazují **lepší vlastnosti vzorky s převažujícím podílem lnu**.

Graf 1: Závislost součinitele tepelné vodivosti u vzorků **konopných a lněných izolantů** na obsahu konopí

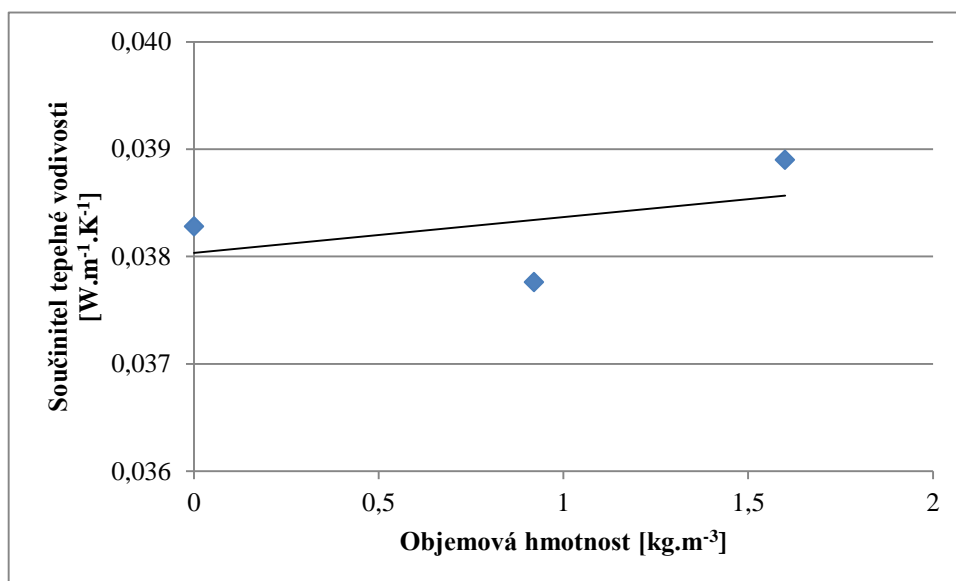


U vzorků izolantů z ovčí vlny a textilu bylo dále provedeno měření součinitele tepelné vodivosti ve stavu laboratorní vlhkosti (23°C a 50 % relativní vlhkosti) a ve stavu praktické vlhkosti (+23°C a 80% relativní vlhkosti). Průměrné výsledky jsou znázorněny v následujícím grafu.

Graf 2: Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkost u vzorků **izolantů z ovčí vlny** (průměrné hodnoty pro všechny vzorky)



Graf 3: Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkost u vzorků **izolantů z textilu** (průměrné hodnoty pro všechny vzorky)



U textilních izolací byla zjištěna velmi malá sorpční vlhkosti, přičemž vzorky uložené v prostředí s relativní vlhkostí 50 % a teplotou +23°C vykazovaly ve většině případů stejné nebo lepší vlastnosti než vzorky vysušené, což souvisí jednak s nízkou sorpční vlhkostí, a také s objemovými změnami spojenými se změnou vlhkosti u vláken.

Stanovení dalších parametrů bylo provedeno na vzorcích izolantů upravených dle konkrétních technických norem a požadavků v nich uvedených. Jednalo se o stanovení plošné hmotnosti (dle ČSN EN 1602), dynamické tuhosti (dle ČSN ISO 9052-1), zvukové pohltivosti (dle ČSN ISO 10 534-1), propustnosti pro vodní páru (dle ČSN EN 72 7055).

Tab. 10: Přehled naměřených hodnot akustických a difúzních vlastností **jutových, konopných a lněných izolantů** ve stavu laboratorní vlhkosti

Vzorek č	Plošná hmotnost $m'$ [kg.m <sup>-2</sup> ]	Dynamická tuhost $s'$ [MPa.m <sup>-1</sup> ]	Jednočíselná hodnota zvukové pohltivosti $\alpha$ [-]	Faktor difúzního odporu $\mu$ [-]
J	2,11	3,1	0,40	2,1
L	2,39	3,6	0,40	2,9
K-1	2,50	3,0	0,45	2,8
K-2	2,25	3,1	0,40	2,2
K-3	3,75	4,0	0,55	3,8
K-4	3,33	7,4	0,35	4,5

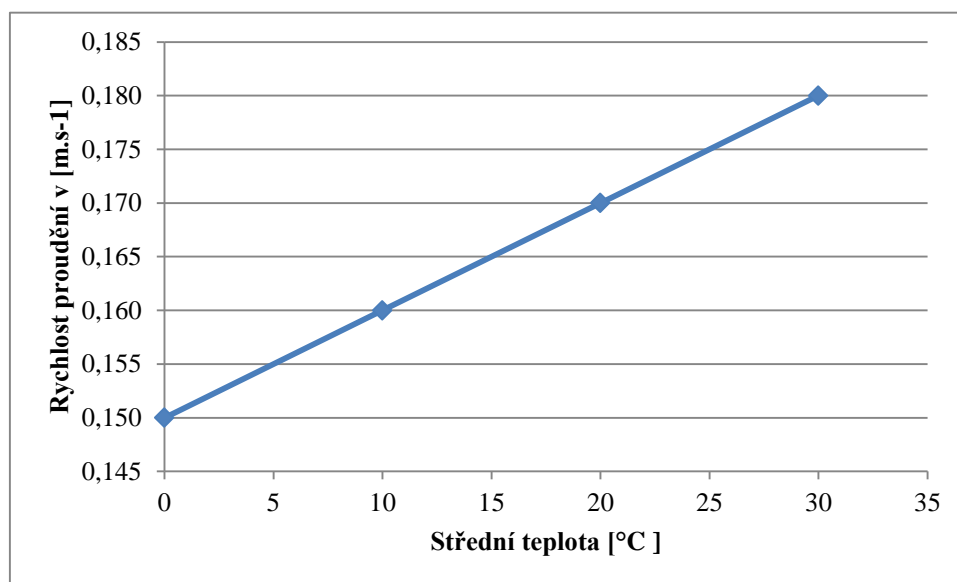
Tab. 11: Přehled naměřených hodnot akustických a mechanických vlastností u zkušebních vzorků **textilních izolantů** ve stavu laboratorní vlhkosti

Vzorek č	Plošná hmotnost $m'$ [kg.m <sup>-2</sup> ]	Dynamická tuhost $s'$ [MPa.m <sup>-1</sup> ]	Jednočíselná hodnota zvukové pohltivosti $\alpha$ [-]	Napětí při 10% deformaci $\sigma_{10}$ [kPa]
T-1	2,34	7,7	0,60	0,24
T-2	2,40	6,2	0,55	0,81
T-3	2,35	6,4	0,50	1,11
T-4	1,27	6,2	0,35	0,3
T-5	3,70	7,1	0,55	0,55



U vybraných vzorků bylo provedeno stanovení rychlosti proudění vzduchu u jednotlivých zkušebních vzorků během přenosu tepla (stanovení součinitele tepelné vodivosti). Měření bylo provedeno v dutině deskového přístroje při měření tepelné vodivosti za standardních okrajových podmínek pro různá stlačení vzorků od 0 do 50%, přičemž pro měření byly použity anemometrické sondy (od firmy Testo) pracující na principu žhaveného drátu zakoupené (aby byla dosažena vyšší reprodukovatelnost v výsledků – sondy se vzájemně liší svou konstrukcí a tloušťkou). Na vzorcích z technického konopí se podařilo prokázat přímou závislost mezi změnou objemové hmotnosti (potažmo hustoty tepelného toku) a rychlosti proudění uvnitř dutiny izolačního materiálu. Navíc pro tento materiál lze potvrdit úvodní tezi, že při zvyšující se objemové hmotnosti materiálu v oblasti levé klesající větve teoretické funkční závislosti tepelné vodivosti, a společně s ní klesajícím vlivu proudění tepla, klesá i rychlost proudění vzduchu uvnitř materiálu, a to až do bodu teoretického optima objemové hmotnosti, kde by rychlost proudění měla být minimální. U ovčí vlny byly dosaženy poměrně rozporuplné výsledky (s výjimkou vzorku č. V - 4), kdy u dvou vzorků prakticky nebyla prokázána závislost mezi rychlostí proudění vzduchu a objemovou hmotností zkušebního vzorku. Tato skutečnost je způsobena pravděpodobně nižší tloušťkou vláken, s níž při daných objemových hmotnostech klesá rychlost proudění vzduchu ve struktuře vzorku.

Graf 4: Závislost rychlosti proudění na střední teplotě měření u vzorku K-2



## 10 STUDIUM TEPELNĚ VLHKOSTNÍHO CHOVÁNÍ A PROVÁDĚNÍ MODIFIKACE VLASTNOSTÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ Z HLEDISKA VLHKOSTNÍHO CHOVÁNÍ (ETAPA Č. 4)

V rámci dalších výzkumných prací byla snaha o dosažení modifikace vlastností zkušebních vzorků z hlediska vlhkostního chování. Jednalo se především o snížení nasákavosti zkušebních vzorků, a také o snížení jejich navlhavosti. Poté byly vybírány různé přípravky pro přípravu impregnací, použitelné na konopné izolační rohože. Vhodné impregnační přípravky byly vybírány na základě provedeného průzkumu na trhu (stavebního i textilního trhu), a dále na základě výsledků předchozích výzkumů a publikovaných vědeckých prací v odborných časopisech.

Pro aplikaci byl zvolen vzorek měkké konopné izolace K+L/9. Celkem tedy bylo vyrobeno 8 modifikací zkušebních vzorků. U vzorků H-2, H-3, H-5, H-8 a H-9 byla úprava aplikována

nástříkem, u vzorku H-4 namáčením s následným vysušením vzorku a u vzorku H-6 a H-7 byla aplikována solgel metoda primární úpravy vlákna [13].

U zkušebních vzorků bylo provedeno stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření  $W_p$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ], dále rovnovážné sorpční vlhkosti pro teplotu  $+23^\circ\text{C}$  a relativní vlhkost 80%  $w_{23,80}$  [%] a součinitele tepelné vodivosti  $\lambda_{10}$  [%] ve vysušeném stavu a při zvýšené vlhkosti  $w_{23,50}$ . Z těchto hodnot byla stanovena změna součinitele tepelné vodivosti  $\Delta\lambda$  [%] zohledňující míru degradace tepelně izolačních vlastností zkušebních vzorků vlivem vlhkosti. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 12: Přehled naměřených tepelných a vlhkostních vlastností u modifikovaných izolačních materiálů

Vzorek	Ošetření	$W_p$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	$w_{23,80}$ [%]	Změna tepelné vodivosti [%]
H-1	Bez ošetření	2,39	16,1	43,4
H-2	Hexadecyltrimethoxysilan	0,61	15,6	33,1
H-3	2methoxyethoxy(vinyl)silan	0,81	15,9	33,4
H-4	Metylsilikonát draselný	1,69	16,0	32,4
H-5	Směs Izopropylalkoholu a isopropylacetátu	0,37	12,7	33,5
H-6	Solgel	1,75	21,7	40,6
H-7	Solgel + Hexadecyltrimethoxysilan	1,67	22,5	43,7
H-8	Oligomerní siloxan	1,18	16,0	35,6
H-9	Silan-siloxanové mikroemulze	1,48	16,1	37,5

Na základě provedených měření bylo zjištěno následující:

- solgel metoda není vhodnou pro úpravu organických vláken na přírodní bázi,
- vlivem hydrofobizace je možné účinně snížit nasákavost zkušebních vzorků, jako nejlepší se jeví úprava na bázi izopropylalkoholu a silanů,
- vlivem hydrofobizace je možné snížit navlhavost zkušebních vzorků v jen velmi omezené míře, jako nejlepší se jeví úprava na bázi izopropylalkoholu,
- hydrofobizací vláken lze snížit z části míru degradace tepelně izolačních vlastností izolantů při zvýšené vlhkosti, jako nejlepší se jeví úprava na bázi izopropylalkoholu, silanů a metylsilikonátu draselného.

## 11 SNÍŽENÍ VÝROBNÍCH NÁKLADŮ U IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN (ETAPA Č. 5)

V daném případě se tedy jednalo o snížení energetické náročnosti výroby, a o také snížení produkce  $\text{CO}_2$ . Těchto úspor bylo konkrétně dosaženo odstraněním vybraných výrobních operací, a to:

- Eliminací přípravné linky (např.: Temafa - rozvolnění balíků, tvorba vrstvy, lámání a vytřásání) – předpokládaná úspora je cca 50 kWh/tunu,
- Eliminací zpracovatelské linky na principu lámání a potěrání (např.: Charle) – předpokládaná úspora je cca 50 kWh/tunu,

- Úspory související s eliminací související vzduchotechniky a filtrace (s výše uvedenými operacemi) - předpokládaná úspora je cca 50 kWh/tunu.

Jak je uvedeno výše, pro účel studia možností snížení výrobních nákladů u izolačních materiálů na bázi přírodních vláken byly vyrobeny tři typy izolantů ze stonku lnu olejného pěstovaného na semeno. Stonky byly upraveny s různým stupněm použité mechanizace. Na vzorcích bylo provedeno stanovení klíčových vlastností z pohledu jejich možného využití ve stavebních konstrukcích.

Tab. 13: Přehled naměřených hodnot objemové hmotnosti a součinitele tepelné vodivosti u zkušebních vzorků **lněných izolantů** při jmenovitém zatížení 50 Pa (ve vysušeném stavu)

Vzorek č	Tloušťka $d$ [mm]	Objemová hmotnost $\rho_v$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_{10,drv}$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
L-A	78,41	101,8	0,0417
L-B	80,21	105,4	0,0439
L-C	77,42	90,8	0,0441

Tab. 14: Přehled naměřených hodnot akustických a mechanických vlastností u **lněných izolantů** ve stavu laboratorní vlhkosti

Vzorek č	Dynamická tuhost $s'$ [MPa.m <sup>-1</sup> ]	Pevnost v tahu kolmo k rovině desky $\sigma_{mt}$ [kPa]	Napětí při 10% deformaci $\sigma_{10}$ [kPa]
L-A	4,08	10,75	12,8
L-B	3,79	14,63	14,0
L-C	3,32	8,38	6,5

Z naměřených hodnot je patrné, že kvalita zpracování výsledné suroviny nemá na výsledné vlastnosti izolačního materiálu zásadní vliv. V případě tepelně izolačních vlastností byly zjištěné hodnoty součinitele tepelné vodivosti v případě všech tří surovin prakticky totožné. Rozdíly mezi zkušebními vzorky odpovídají rozdílné objemové hmotnosti. Závislost na výrobní objemové hmotnosti se projevila ještě signifikantnějším způsobem v případě mechanických vlastností, kde byla prokázána korelace mezi objemovou hmotností a napětím při 10% deformaci více než 90 %.

## 12 MOŽNOSTI VYUŽITÍ IZOLANTŮ NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN JAKO JÁDROVÝCH IZOLANTŮ PRO VÝROBU VAKUOVÝCH IZOLAČNÍCH PANELŮ (ETAPA Č. 6)

Bylo provedeno stanovení chování vláknitých izolantů za sníženého tlaku, aby byl vyloučen přenos tepla vlivem proudění, a to od normálního tlaku až po 99.9 % vakuum. Měření bylo provedeno na vybraných vzorcích izolantů:

- K+L-18,
- T - 1,
- T -2,
- T -3.

které byly lisováním za tepla stlačeny na vyšší objemovou hmotnost okolo 100 kg.m<sup>-3</sup>, aby u vzorků při případném reálném zavakuování nedošlo ke změně struktury a druhotnému stlačení.

Výsledky měření u vzorků za normálního tlaku a vakua jsou uvedeny v tabulce níže, přičemž kompletní průběh součinitele tepelné vodivosti v závislosti na tlaku u jednotlivých vzorků je uveden v obrázku níže.

Tab. 15: Přehled vlastností izolanů za normálního tlaku a za vakua

Vzorek :	K+L-18	T - 1	T - 2	T - 3
$\rho_v$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	92,44	119,75	101,52	126,58
$\lambda_{Normal}$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0,0352	0,0354	0,0360	0,0373
$\lambda_{Vacuum}$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0,0078	0,0051	0,0058	0,0051

Z výsledků je patrné jednak významné snížení součinitele tepelné vodivosti u vzorků stlačených na objemovou hmotnost okolo 100 kg.m<sup>-3</sup> oproti výsledkům uvedeným zjištěným při normálním tlaku, a dále pak snížení součinitele tepelné vodivosti o 76-86 %, kdy u vzorku 2 a 4 bylo dosaženo součinitele tepelné vodivosti 0.0051 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

## 13 ZÁVĚR

V rámci habilitační práce byl proveden výzkum v oblasti vývoje a studia chování nových tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních snadnoobnovitelných surovin. Praktická část práce byla rozdělena do 6 etap (viz. výše). Byl proveden výběr potenciálně perspektivních surovinových vláken, přičemž byly vybrány následující vlákna:

- konopná vlákna v třech variantách (K/JR, K/JN, K/H),
- lněná vlákna v pěti variantách (L/J, L/H, L/A, L/B, L/C),
- jutová vlákna (J/J),
- vlákna z ovčí vlny ve dvou variantách (V/23, V/33),
- textilní vlákna (T/R, T/F, T/PES).

Ze surovinových vláken byly dále vyrobeny zkušební vzorky (celkem 44 receptur – viz. část 8 výše). Pro výrobu vzorků byly využity různé výrobní linky a metody termického pojení (air lay metoda) s kladením vláken ve směru desky a s kolmým kladením vláken (metoda Strutto).

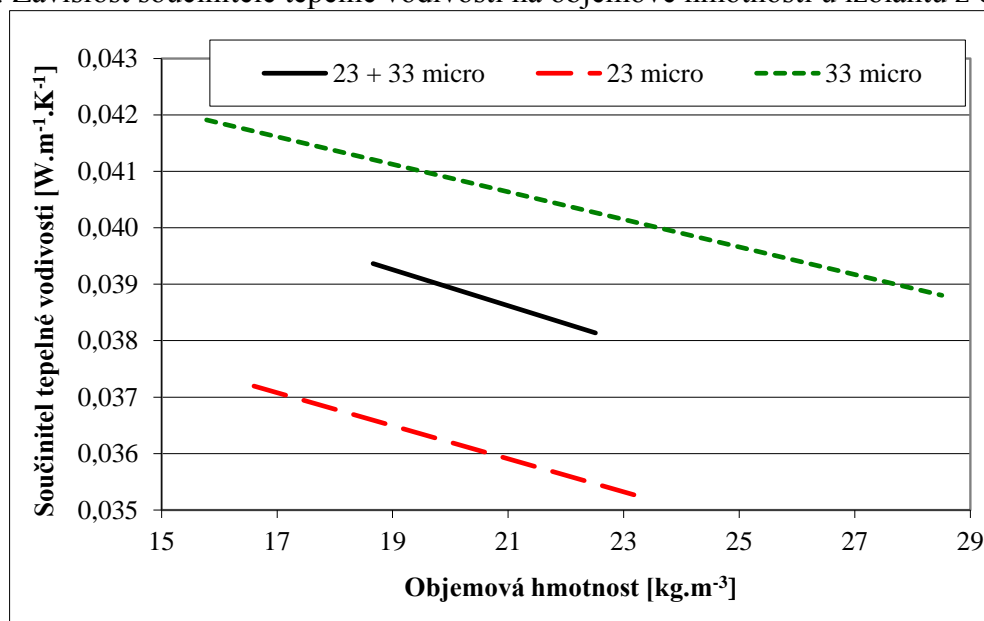
V rámci praktických laboratorních měření bylo na zkušebních vzorcích vláken a tepelných izolanů z nich vyrobených provedeno následující: mikroskopický rozbor, stanovení tloušťky vláken, součinitele tepelné vodivosti, tloušťky, délky a šířky, objemové hmotnosti, krátkodobé nasákavosti částečným ponořením, pevnosti v tahu kolmo k rovině desky, pevnost v tlaku/napětí při 10% deformaci, propustnosti pro vodní páru, dynamické tuhosti, činitele zvukové pohltivosti, rychlosti proudění vzduchu ve struktuře izolanů.

U počátečních vzorků byly zjištěny vyšší hodnoty tepelných vodivostí v rozmezí 0,0405 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> (vzorek K-4) až 0,0500 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> což bylo způsobeno především nižší objemovou hmotností v případě vzorků J, L, K+, K-2 a K-3. Dále pak byly vyšší tepelné vodivosti způsobeny v některých případech vyšší tloušťkou použitých vláken. V případě konopno-lněných izolací je patrné že některé vzorky vykazovaly výrazně nižší tepelné vodivosti oproti původním vzorkům. Lepších hodnot bylo dosaženo v případě použití kvalitnějších vláken (čistších vláken s nižší tloušťkou). Na základě provedených experimentů bylo dále zjištěno, že v oblasti nízké a střední objemové hmotnosti vykazují v případě izolanů z lýkových vláken nejlepší tepelně izolační vlastnosti izolanty z lněných vláken.

V případě vzorků z ovčí vlny je patrné, že zkušební vzorky vykazovaly při vyšším zastoupení jemných vláken velmi dobré tepelně izolační vlastnosti. Vlastnosti izolanů na bázi ovčí vlny se

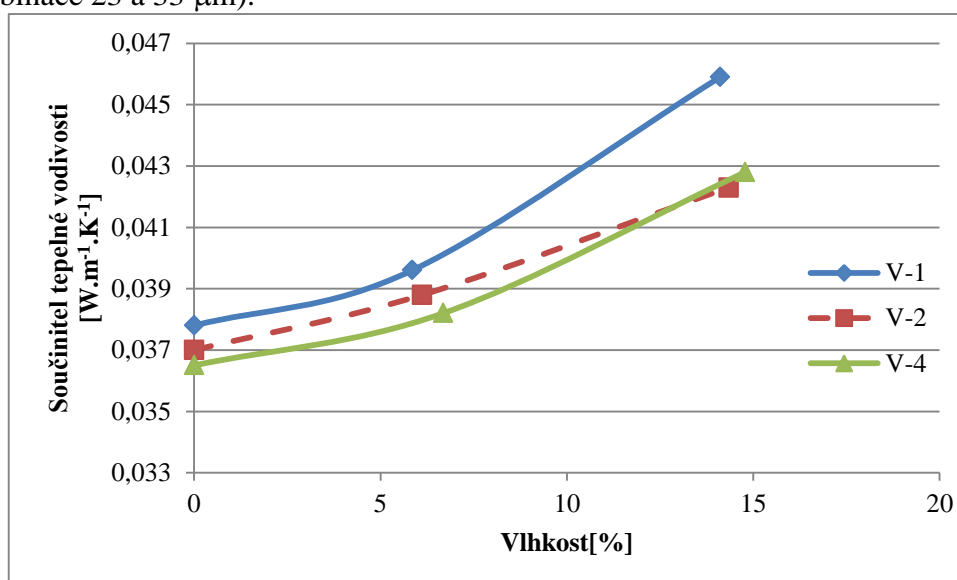
zlepšují se snižující se tloušťkou vláken a v oblasti nižší objemové hmotnosti spolu se zvyšující se objemovou hmotností – viz. následující graf.

Graf 5: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti u izolanů z ovčí vlny



Zkušební vzorky při expozici v prostředích s teplotou 23°C a 50 % relativní vlhkosti a dále s teplotou +23°C a 80% relativní vlhkosti vykazovaly vyšší hodnoty sorpčních vlhkostí a došlo u nich také k významné degradaci tepelně izolačních vlastností. Nižší míra degradace byla prokázána u vzorků s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti ve vysušeném stavu. Nebyla však celkově prokázána korelace míry změny tepelně izolačních vlastností vlivem vlhkosti ani na objemové hmotnosti, ani na tloušťce vláken.

Graf 6: Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti u vzorků z vláken z ovčí vlny (kombinace 23 a 33 μm).



U vzorků textilních izolací vykazovaly nejlepší vlastnosti vzorky s vyšším podílem bavlny. U těchto vzorků byla zjištěna vysoká míra korelace mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemovou hmotností. Součinitel tepelné vodivosti se u těchto vzorků pohyboval v rozmezí 0,0360 (vzorek T-1) až 0,0397 (vzorek T-4). U vzorku s převažujícím podílem PES (vzorek T-2) byla hodnota tepelné vodivosti vyšší a dosahovala hodnoty 0,0424 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. U vzorků textilních izolací byla zjištěna

velmi malá vlhkostní citlivost. K výraznějšímu zhoršení došlo pouze u vzorku T-3, kde došlo k výraznějšímu nárůstu sorpční vlhkosti, která však ve všech případech nepřesáhla hodnotu 3,2%.

Na vybraných zkušebních vzorcích bylo také provedeno měření proudění uvnitř vzorku při průchodu tepla vzorkem (během zkoušky tepelné vodivosti), a to u všech vzorků pro různé míry stlačení. U vzorků izolací z technického konopí byla prokázána korelace mezi objemovou hmotností a rychlostí proudění. Navíc pro tento materiál lze potvrdit úvodní tezi, že při zvyšující se objemové hmotnosti materiálu v oblasti levé klesající větve teoretické funkční závislosti tepelné vodivosti, a společně s ní klesajícím vlivu proudění tepla, klesá i rychlost proudění vzduchu uvnitř materiálu, a to až do bodu teoretického optima objemové hmotnosti, kde by rychlost proudění měla být minimální. U ovčí vlny byly dosaženy poměrně rozporuplné výsledky (s výjimkou vzorku č. V - 4), kdy u dvou vzorků prakticky nebyla prokázána závislost mezi rychlostí proudění vzduchu a objemovou hmotností zkušebního vzorku.

Na vzorku K+L/9 kondiciovaném při teplotě +23 °C a relativní vlhkosti 80 % bylo zjištěno, že při zvyšující se objemové hmotnosti dochází ke snižování součinitele tepelné vodivosti. Toto chování je ve stavu zvýšené vlhkosti odlišné od chování suchých vzorků. Snižování tepelné vodivosti je v oblasti nízké a střední objemové hmotnosti významnější v případě vlhkých vzorků než v případě vzorků suchých.

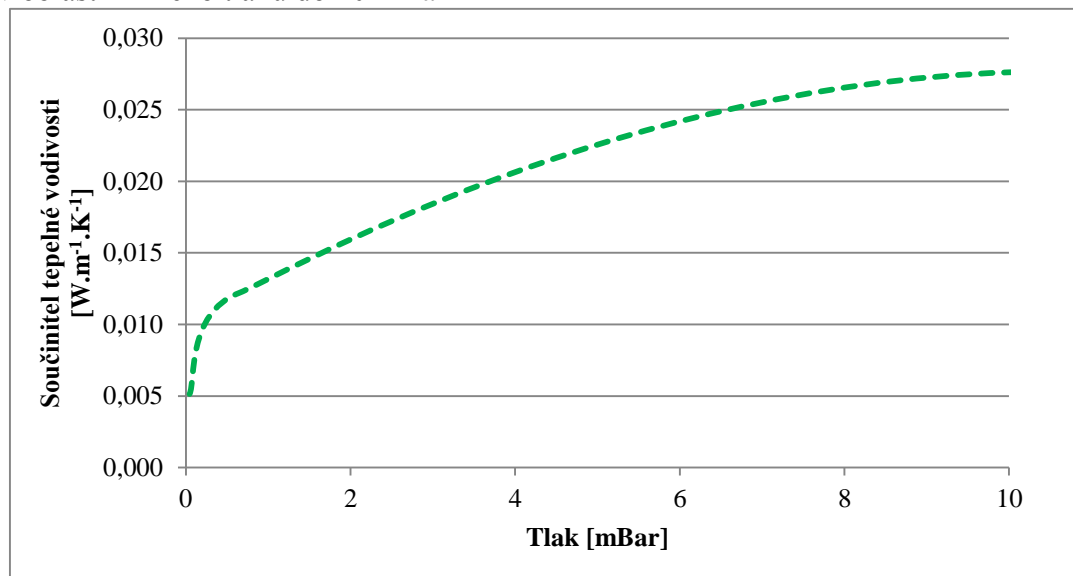
V oblasti modifikace navlhavosti a nasákavosti u vzorků přírodních izolací bylo zjištěno že:

- solgel metoda není vhodná pro úpravu organických vláken na přírodní bázi,
- vlivem hydrofobizace je možné účinně snížit nasákavost zkušebních vzorků, jako nejlepší se jeví úprava na bázi izopropylalkoholu a silanů,
- vlivem hydrofobizace je možné snížit navlhavost zkušebních vzorků v jen velmi omezené míře, jako nejlepší se jeví úprava na bázi izopropylalkoholu,
- hydrofobizací vláken lze snížit z části míru degradace tepelně izolačních vlastností izolantů při zvýšené vlhkosti, jako nejlepší se jeví úprava na bázi izopropylalkoholu, silanů a metylsilikonátu draselného.

V rámci studia možností snížení výrobních nákladů u izolačních materiálů na bázi přírodních vláken bylo zjištěno, že kvalita zpracování výsledné suroviny nemá na výsledné vlastnosti izolačního materiálu zásadní vliv. V případě tepelně izolačních vlastností byly zjištěné hodnoty součinitele tepelné vodivosti v případě všech tří surovin prakticky totožné. Rozdíly mezi zkušebními vzorky odpovídají rozdílné objemové hmotnosti. Závislost na výrobní objemové hmotnosti se projevila ještě signifikantnějším způsobem v případě mechanických vlastností, kde byla prokázána korelace mezi objemovou hmotností a napětím při 10% deformaci více než 90 %. Celkově bylo zjištěno, že při využití alternativních zdrojů ze zemědělství, jako je například stonek lnu olejného a eliminací některých kroků při zpracování vlákna, lze dosáhnout úspor cca až 50% nákladů za vstupní surovinu. K energetickým úsporám lze vztáhnout úspory v oblasti emisí CO<sub>2</sub>, kdy snížením technologických kroků odpovídajících spotřebě 150 kWh na tunu dojde k předpokládanému snížení emisí CO<sub>2</sub> o 176 kg na tunu. K dalším úsporám dochází v dalších krocích přiměřeně k dopravním vzdálenostem.

Při studiu vlivu tlaku na vlastnosti vláknitých izolantů z pohledu možnosti jejich využití jako jádrových izolantů pro výrobu vakuových izolačních panelů bylo zjištěno, že po zavakuování dojde k významnému snížení součinitele tepelné vodivosti u vzorků stlačených na objemovou hmotnost okolo 100 kg.m<sup>-3</sup> oproti výsledkům zjištěným při normálním tlaku, a dále pak snížení součinitele tepelné vodivosti o 76-86 %, kdy u vzorku 2 a 4 bylo dosaženo součinitele tepelné vodivosti 0.0051 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>.

Graf 7: Závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku u vzorku T-1 při objemové hmotnosti  $126 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  v oblasti nízkého tlaku do 10 mBar



## 14 POUŽITÁ LITERATURA.

- [1] Vaverka, J., Pasivní domy II. - Navrhování budov s nízkou energetickou náročností, *archiweb*, [online 13. 3. 2016]. Dostupné z: <http://www.archiweb.cz/salon.php?action=show&id=995&type=10>
- [2] Sokratov dom, *Wikipedia: the free encyclopedia*, [online 13. 3. 2016], Dostupné z: [https://sk.wikipedia.org/wiki/Sokratov\\_dom?oldid=3850271](https://sk.wikipedia.org/wiki/Sokratov_dom?oldid=3850271)
- [3] Franzoni, E., Materials selection for green buildings: which tools for engineers and architects?, *Procedia Engineering* 21 (2011), s. 883-890, ISSN: 1877-7058, doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2090
- [4] 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, doi:10.1016/j.enbuild.2011.06.012
- [5] Kymäläinen, H-R, Sjöberg, A-M., Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations, *Building and Environment* 43 (2008), s. 1261–1269, ISSN: 0360-1323, doi:10.1016/j.buildenv.2007.03.006
- [6] Zampori, L., Dotelli, G., Vernelli, V., Life Cycle Assessment of hemp cultivation and use of hemp-based thermal insulator materials in building, *Environmental Science & Technology* 47 (2013), s. 7413-7420, ISSN 0013-936X, doi: 10.1021/es401326a
- [7] Chybík, J. Přírodní stavební materiály. *Grada Publishing*, Praha (2009), 272 s., ISBN: 978-80-247-2535-1
- [8] Rostlinná vlákna. *Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, Katedra materiálového inženýrství*, [online 13. 3. 2016], Dostupné z: [http://www.kmi.tul.cz/studijni\\_materialy/data/2013-10-04/08-12-52.pdf](http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-10-04/08-12-52.pdf)
- [9] Brázdová, L., Příprava keratinového hydrolyzátu alkalickoenzymovým, Diplomová práce, *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*, Zlín (2010)
- [10] Materiálová skladba a charakteristika vláken – teoretická část, *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze*, [online 13. 3. 2016], Dostupné z:

[http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res\\_materialova\\_skladba\\_text\\_vlaken/teorie.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_materialova_skladba_text_vlaken/teorie.htm).

- [11] Netkané textilie, *Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, Katedra hodnocení textilií*, [online 13. 3. 2016], Dostupné z: [www.kht.tul.cz/items/TZO/TZO%2011A.ppt](http://www.kht.tul.cz/items/TZO/TZO%2011A.ppt)
- [12] Budoucnost je v textilu ..... textil je budoucnost!, *Strategická výzkumná agenda, ČTPT – Česká technologické platformy pro textil*, [online 13. 3. 2016], Dostupné z: [www.ctpt.cz/dwn.php?ID=1164](http://www.ctpt.cz/dwn.php?ID=1164)
- [13] Li, Z., Xing, Y., Dai, J., Superhydrophobic surfaces prepared from water glass and non-fluorinated alkylsilane on cotton substrates. *Applied Surface Science* 254 (2008), s. 2131-2135, ISSN 00169-4332, doi:10.1016/j.apsusc.2007.08.083



## Abstract

The present habilitation thesis focuses on the development of thermal insulation materials based on natural and renewable resources and study their behaviour. The main topic of the thesis acknowledges the increasing requirements on the energy performance of buildings as articulated in Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council and in the context of Czech legislation in the Energy Management Act No. 406/2000 Coll. (as amended by Act No. 318/2012 Coll. from 3rd October 2012) and standards (ČSN 73 0540). It also responds to the need of using renewable raw material resources, reducing energy consumption during the production of new building materials and reducing CO<sub>2</sub> emissions. Using the materials, the development of which is described herein, should bring savings in terms of primary energy intensity, a less severe carbon footprint connected with the production of these materials and a reduction in greenhouse gas emissions (see above) connected with less consumption of energy needed for the heating of buildings insulated by these materials.

The goal of the habilitation thesis is primarily the development of thermal insulation materials based on natural organic fibres of crop or livestock origin (including secondary fibres) and the examination of their behaviour and properties once they have been installed in a structure. A separate part of the thesis deals with the hygrothermal behaviour of these materials and the possibility of modifying their key properties (water absorption and hygroscopicity). Another goal of the thesis was to assess the financial advantages of these materials and to suggest ways of saving costs during their manufacturing. The final part of the thesis discusses a part of the research, which addresses the application of these materials as vacuum insulations. This part investigated the behaviour of selected newly developed insulations under conditions of reduced pressure up to 99.9 % vacuum.