



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM MOŽNOSTI OPTIMALIZACE VLASTNOSTÍ ALTERNATIVNÍCH TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN

STUDY OF POSSIBILITIES OF OPTIMALIZATION OF PROPERTIES OF ALTERNATIVE THERMAL
INSULATING MATERIALS ON NATURAL BASE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PAVEL BŘICHÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Pavel Břicháček
Název	Studium možnosti optimalizace vlastností alternativních tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken
Vedoucí diplomové práce	Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013	

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

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] Boštík, J., Vývoj izolačních materiálů na bázi technického konopí a studium jejich vlastností, Diplomová práce, VUT v Brně, FAST, Brno 2007
- [2] Pytlík, P., Vlastnosti a užití stavebních výrobků, VUTIUM, Brno 1998
- [3] Matoušek, M., Lehké stavební látky II, SNTL, Praha 1985
- [4] Šťastník, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály, CERM, Brno 2002
- [5] Šťastník, S., Zach, J., Zkoušení izolačních materiálů, CERM, Brno 2002
- [6] Slípková, A., Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken, Diplomová práce, VUT v Brně, FAST, Brno 2013

Zásady pro vypracování

Cílem práce bude studium mechanismů šíření tepla a vlhkosti ve struktuře tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken (konopí, len, ovčí vlna a pod.). Bude se jednat především o studium vlivu tloušťky vláken a objemové hmotnosti na tepelně vlhkostní vlastnosti a chování materiálů z pohledu tepelně vlhkostního transportu. V rámci diplomové práce budou provedena experimentální měření (stanovení tepelně izolačních vlastností v závislosti na druhu a tloušťce vlákna, na objemové hmotnosti izolantu a na orientaci vláken) na vybraných vzorcích přírodních izolací. Na základě naměřených výsledků budou formulovány obecné závěry, které by měly sloužit pro optimalizaci výrobních procesů přírodních izolantů s cílem dosažení co nejlepších tepelně technických vlastností.

Předepsané přílohy

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

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá studiem mechanismů šíření tepla a vlhkosti ve struktuře tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken. Hlavním cílem je experimentální ověření teoretických zákonitostí, uplatňujících se při transportu tepla a vlhkosti vláknitými materiály, především vlivu tloušťky vláken a objemové hmotnosti. Pro rozšíření výstupů práce byly zvoleny různé druhy přírodních vláknitých materiálů rostlinného i živočišného původu. Výsledky práce by měly sloužit pro optimalizaci výrobních procesů přírodních izolačních materiálů s ohledem na jejich optimální tepelné technické vlastnosti. Ze shromážděných dat jsou vyvozeny obecné závěry, sloužící pro lepší pochopení chování těchto materiálů.

Klíčová slova

izolační materiály z přírodních vláken, rostlinná vlákna, živočišná vlákna, technologie s vodorovným kladením, technologie s kolmým kladením, součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost, teplota, vlhkost, rychlost proudění vzduchu, tloušťka vlákna, délka vlákna, orientace vláken, převodní součinitele

Abstract

The presented work investigates the mechanisms of propagation of heat and moisture in the structure of heat-insulating materials based on natural fibers. The main aim of this work is the experimental verification of theoretical patterns, which are involved in the transport of heat and moisture in fibrous materials, especially the influence of fibers thickness and density of the fibrous materials. To widen outputs of the work were selected different kinds of natural fiber materials of vegetable and animal origin. The results of the work should help to optimize the production processes of natural insulation materials considering their optimal thermal properties. From the data collected are deduced general conclusions to better understanding the behavior of these materials.

Keywords

insulating materials made of natural fibers, vegetable fibers, animal fibers, technology with horizontal setting, technology with perpendicular setting, thermal conductivity coefficient, density, temperature, humidity, air velocity, fiber thickness, fiber length, fiber orientation, conversion coefficients

...

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Pavel Břicháček *Studium možnosti optimalizace vlastností alternativních tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken*. Brno, 2014. 98 s., 102 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 1. 2014

.....
podpis autora
Bc. Pavel Břicháček

Za kvalitní odborné vedení a cenné rady vedení při řešení diplomové práce děkuji Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D.

OBSAH

OBSAH.....	8
A. ÚVOD.....	11
B. TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1. Požadavky na vlastnosti izolačních materiálů.....	13
1.1. Legislativní předpisy v ČR pro oblast stavebních izolačních výrobků.....	13
1.2. Požadavky tepelně izolační.....	15
1.2.1. Tepelná vodivost.....	16
1.2.2. Tepelná jímavost.....	16
1.3. Požadavky na mechanické vlastnosti.....	17
1.3.1. Napětí v tlaku při 10% deformaci.....	17
1.3.2. Pevnost v tahu kolmo k rovině desky.....	18
1.4. Požadavky na požární odolnost.....	18
1.5. Požadavky environmentální.....	19
2. Přírodní vláknité materiály.....	20
2.1. Rostlinná vlákna.....	21
2.1.1. Len.....	21
2.1.2. Konopí.....	23
2.1.3. Bavlna.....	27
2.2. Živočišná vlákna.....	29
2.2.1. Ovčí vlna.....	29
2.3. Další příklady využití přírodních vláken.....	31
3. Technologie pojení.....	34
3.1. Vpichování.....	34
3.2. Termické pojení teplovzdušné.....	35
3.2.1. Bikomponentní vlákna.....	36
3.2.2. Technologie s vodorovným kladením vlákna.....	37
3.2.3. Technologie s kolmým kladením vlákna (STRUTO).....	38
3.3. Lisování hydrotermicky upravených vláken.....	38
4. Vlastnosti izolačních materiálů z přírodních vláken.....	40
4.1. Tepelně izolační vlastnosti.....	40
4.1.1. Vliv vlhkosti.....	40
4.1.2. Měrná tepelná kapacita.....	40
4.2. Reakce na oheň.....	41
4.3. Citlivost k vlhkosti.....	41

4.4.	Mechanické vlastnosti	42
4.5.	Akustické vlastnosti	42
4.6.	Odolnost proti škůdcům	43
4.7.	Environmentální vlastnosti.....	43
5.	Tepelně vlhkostní transport vláknitými materiály.....	44
C.	CÍL PRÁCE	47
D.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	48
6.	Metodika práce.....	48
6.1.	Zkoušené materiály	49
6.2.	Zkušební metody	50
6.2.1.	Stanovení délky a šířky.....	50
6.2.2.	Stanovení tloušťky	51
6.2.3.	Stanovení objemové hmotnosti	51
6.2.4.	Stanovení součinitele tepelné vodivosti.....	52
6.2.5.	Stanovení tloušťky vláken mikroskopicky.....	53
6.2.6.	Stanovení délky vláken	53
6.2.7.	Stanovení orientace vláken.....	54
6.2.8.	Stanovení rychlosti proudění vzduchu izolačním materiálem	54
7.	Provádění a výsledky zkoušek.....	55
7.1.	Etapa první – stanovení fyzikálních vlastností.....	55
7.1.1.	Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti.....	55
7.1.2.	Stanovení závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti	56
7.1.3.	Stanovení závislosti rychlosti proudění na objemové hmotnosti.....	64
7.1.4.	Stanovení závislosti tepelné vodivosti na teplotě.....	66
7.1.5.	Stanovení závislosti rychlosti proudění na teplotě	67
7.1.6.	Stanovení závislosti tepelné vodivosti na vlhkosti.....	68
7.2.	Etapa druhá – stanovení parametrů vláken.....	70
7.2.1.	Stanovení tloušťky vláken	70
7.2.2.	Stanovení délky vláken	74
7.2.3.	Stanovení orientace vláken.....	76
7.3.	Etapa třetí – zhodnocení výsledků zkoušek	77
8.	Diskuze výsledků	82
8.1.	Etapa první – stanovení fyzikálních vlastností.....	82
8.2.	Etapa druhá – stanovení parametrů vláken.....	84
8.3.	Etapa třetí – zhodnocení výsledků zkoušek	86
E.	ZÁVĚR.....	87

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	90
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	96
SEZNAM TABULEK.....	97
SEZNAM OBRÁZKŮ	97
SEZNAM GRAFŮ	98
PŘÍLOHY	99
Příloha A: Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2.....	99
Příloha B: Záznam z laboratorního stanovení tloušťky a délky vláken	101

A. ÚVOD

Vzhledem k neustále strmě rostoucím cenám energií a ubývajícím zásobám fosilních paliv se začíná již i v České republice pomalu rozšiřovat fenomén nízkoenergetických a pasivních staveb. Zatím zde tyto budovy sice nemají takovou tradici, jako v zemích západní Evropy, zejména Německu a Rakousku, kde již tvoří významný podíl v počtu novostaveb, do budoucna se však bude význam pasivní výstavby dále zvyšovat zejména s ohledem na **směrnici EU o energetické náročnosti budov 2010/31/EU**, podle které mají být od roku 2018 veřejné budovy stavěny a upravovány již pouze ve standardu s téměř nulovou spotřebou energie, navíc od roku 2020 se tento požadavek rozšíří i na ostatní budovy, tedy i rodinné domy. V současnosti většinu laické veřejnosti zpravidla odradí o 10 – 25 % vyšší cena stavby, nedostatky však lze nalézt také na poli nedostatečné osvěty a promyšlených státních dotací na výstavbu těchto objektů a s tím související stále ještě chybějící agendy pro jejich certifikaci. [1]

Jako pasivní můžeme označit dům s roční měrnou potřebou tepla na vytápění nepřesahující $15 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (pro stavby nízkoenergetické je v České Republice limitní hodnota $50 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). Kromě extrémně nízké spotřeby energie na vytápění je pro pasivní dům typické komfortnější vnitřní prostředí, zajištěné pravidelným a dostatečným přísunem čerstvého vzduchu, vysokou tepelnou pohodou v místnostech, vyšší dotykovou teplotou všech konstrukcí a dalšími faktory. Aby bylo dosaženo těchto parametrů, musí všechny stavební konstrukce splňovat řadu náročných požadavků. Kromě zvýšených požadavků na návrh objektu, orientaci ke světovým stranám, nucené větrání s rekuperací, vynikající těsnost objektu a další, je to zejména požadavek na velmi dobré tepelně izolační vlastnosti konstrukcí, tvořících obálku budovy. [2] Součinitel prostupu tepla U by měl u pasivních staveb dosahovat hodnot v rozmezí $0,10 - 0,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ podle druhu konstrukce (*viz příloha A*). [3]

Požadovaných tepelně izolačních parametrů jen stěží dosáhne jednovrstvá masivní konstrukce. Do jisté míry to znamená opustit současné zvyklosti při výstavbě objektů a nahradit je novými. Pro tyto účely se například velmi dobře osvědčují dřevostavby, díky své variabilitě, co se tloušťky tepelně izolační vrstvy týče. Kromě nesporných technických výhod v jejich prospěch hovoří také příznivá cena a využití obnovitelné suroviny s minimální spotřebou primární energie, přispívající k naplnění myšlenky trvale udržitelného rozvoje. V současnosti se u nás netěší takové oblibě, jako masivní zděné stavby, s dalším rozmachem pasivní výstavby však lze očekávat jejich větší rozšíření.

At' již se bude jednat o výplň rámových polí dřevostaveb či sendvičové masivní konstrukce, v každém případě lze v blízké budoucnosti očekávat v souvislosti s nárůstem počtu nízkoenergetických a pasivních staveb zvýšenou potřebu kvalitních tepelně izolačních materiálů. Již dnes mají pro své výhodné tepelně izolační a difúzní vlastnosti nezastupitelnou úlohu vláknité materiály, zejména jako tepelné izolace v difúzně otevřených systémech, při zateplování obytných podkroví a v rámových konstrukcích. V převážné míře jsou používány

izolační rohože na bázi kamenných či skelných vláken. Jejich výhodné vlastnosti jsou však vykoupeny relativně vysokou energetickou náročností při výrobě. Tento fakt je nepříjemný jak s ohledem na stoupající ceny energií, tak také díky zvyšujícímu se zájmu o ekologickou výstavbu v souladu s myšlenkami trvale udržitelného rozvoje.

Alternativou k zmíněným materiálům může být využití tepelných izolací z přírodních vláken. Ty jsou, na rozdíl od izolací kamenných a skelných, vyrobeny téměř výhradně z obnovitelných zdrojů s minimální spotřebou primárních surovin a minimální energetickou náročností. Navíc není k jejich pojení použito syntetických pryskyřic, jejichž uvolňování může poškozovat lidské zdraví a mají i některé další výhodné vlastnosti, o kterých bude pojednáno dále v textu. Velkou brzdou jejich většího využití je opět nedostatečná osvěta a také jakýsi „zvyk“ a předsudky, zakořeněné v naší konzervativní společnosti a samozřejmě také fakt, že mnohdy jediným rozhodovacím kritériem dnešních stavebníků je cena.

Tato diplomová práce pokračuje ve výzkumu alternativních tepelných izolací z přírodních vláken s cílem optimalizace jejich výroby. V teoretické části jsou shrnuty současně platné, legislativně stanovené požadavky na vlastnosti stavebních izolačních materiálů, dále je provedeno zhodnocení vlastností izolačních materiálů z přírodních vláken včetně teoretických zákonitostí, uplatňujících se při transportu tepla a vlhkosti těmito materiály. Nechybí popis jednotlivých druhů přírodních vláken, vhodných pro výrobu stavebních izolačních materiálů se zvláštním důrazem na materiály, dostupné v našich podmínkách, a dále je proveden výčet a popis technologií, vhodných k pojení těchto vláken. Část experimentální se zabývá studiem mechanismů šíření tepla a vlhkosti ve struktuře vybraných tepelně izolačních materiálů z přírodních vláken a dále zkoumáním vlivu objemové hmotnosti, tloušťky vlákna a dalších materiálových charakteristik na tepelně izolační vlastnosti materiálu. Ze shromážděných dat jsou vyvozeny obecné závěry, sloužící pro lepší pochopení chování těchto materiálů.

B. TEORETICKÁ ČÁST

1. Požadavky na vlastnosti izolačních materiálů

Na úvod je třeba zmínit základní současně platné legislativní předpisy pro oblast stavebních tepelně izolačních materiálů. Tyto předpisy upravují požadavky na konstrukce i jednotlivé stavební materiály a jejich dodržování je všeobecně povinné. Materiál, nevyhovující daným požadavkům, nesmí být uveden na trh. Na jejich základě lze usuzovat na vlastnosti, které od izolačních materiálů budeme požadovat. Kromě základních požadavků na hygienickou nezávadnost a požární bezpečnost jsou to zejména na požadavky tepelně izolační vlastnosti a s ohledem na aplikaci v konstrukcích také vlastnosti mechanické.

1.1. Legislativní předpisy v ČR pro oblast stavebních izolačních výrobků

Základními předpisy jsou jednotlivé zákony, jejichž obecné znění je dále specifikováno v souvisejících vyhláškách, případně nařízeních vlády. Konkrétní technické požadavky na výrobky obvykle nalezneme v příslušných technických normách. Jejich dodržování je pouze doporučeno, pokud se však na jejich znění odkazují zákony, vyhlášky či nařízení vlády, získávají statut těchto předpisů, tedy stávají se závaznými. Zmíněné normy nazýváme normami požadavkovými. Normy výrobkové jsou závazné například při výrobkové certifikaci. Dále specifikují požadavky na výrobky, upřesňují jejich specifické vlastnosti, označování jednotlivých parametrů apod. Posledním typem jsou normy zkušební, ve kterých nalezneme postup pro stanovování jednotlivých vlastností stavebních materiálů.

Následuje výčet základních legislativních předpisů, postihujících zkoumanou problematiku, s citacemi nejvýznamnějších pasáží.

Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) ve znění pozdějších předpisů je základním předpisem pro všechny činnosti týkající se stavebnictví, tudíž i pro výrobu stavebních hmot a určování požadovaných vlastností výrobků pro užití ve stavebních konstrukcích. V § 156 - **Požadavky na stavby** se hovoří o tom, že pro stavbu mohou být navrženy a použity jen takové výrobky, materiály a konstrukce, jejichž vlastnosti zaručují, že stavba při správném provedení a běžné údržbě po dobu předpokládané existence splní požadavky. [4]

Definované požadavky jsou uvedeny ve **Vyhlášce č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby** (novelizovaná Vyhláškou č. 20/2012 Sb.), v § 8 - **Základní požadavky**. Jsou to:

- a) mechanická odolnost a stabilita,
- b) požární bezpečnost,
- c) ochrana zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí,

- d) ochrana proti hluku,
- e) bezpečnost při užívání,
- f) úspora energie a ochrana tepla. [5]

Každý z těchto požadavků je blíže specifikován v dalších souvisejících předpisech a na nich navazujících technických normách. Z pohledu zaměření této diplomové práce se jeví jako důležité především následující legislativní předpisy:

- Ad b) **Vyhláška č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb** (změněná Vyhláškou č. 268/2011Sb): podle § 6 – **Reakce na oheň** klasifikujeme stavební konstrukce a výrobky určené k zabudování do stavby podle reakce na oheň do tříd A až F dle ČSN EN 13 501-1. [6]
- Ad c) **Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů ve znění pozdějších předpisů** v § 76 uvádí, že osoba je při podnikatelské činnosti povinna doložit, že výrobky, které vyrábí, dováží nebo uvádí na trh nebo do oběhu a které mají být schváleny orgánem ochrany veřejného zdraví, byly schváleny. Orgány ochrany veřejného zdraví tvoří na celostátní úrovni zejména Ministerstvo zdravotnictví, na regionální úrovni jsou to krajské hygienické stanice. Co se týče ochrany proti hluku, některé povinnosti a pravomoci orgánů ochrany veřejného zdraví přechází také na Ministerstvo obrany, vnitra, pro místní rozvoj, ministerstvo životního prostředí a také krajské úřady. [7]
- Zákon č. 102/2001 Sb. o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů ve znění pozdějších předpisů** dle § 3 – **Obecné požadavky na bezpečnosti výrobku** považuje za bezpečný výrobek, který za běžných nebo rozumně předvídatelných podmínek užití nepředstavuje po dobu stanovenou výrobcem nebo po dobu obvyklé použitelnosti nebezpečí, nebo jehož užití představuje pro spotřebitele vzhledem k bezpečnosti a ochraně zdraví pouze minimální nebezpečí při užívání výrobku. [8]
- Ad f) **Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve znění pozdějších předpisů** – v § 6a - **Energetická náročnost budov** se praví, že stavebník musí zajistit splnění požadavků na energetickou náročnost budovy a splnění porovnávacích ukazatelů, které stanoví prováděcí právní předpis. Splnění těchto požadavků dokládá stavebník průkazem energetické náročnosti budovy. Vlastník budovy nesmí při užívání nových budov nebo při užívání budov dokončených po jejich změně mající vliv na všechny tepelně technické vlastnosti budovy překročit měrné ukazatele spotřeby tepla pro vytápění a chlazení a pro přípravu teplé vody stanovené prováděcím právním předpisem. [9]

Prováděcím předpisem tohoto zákona je **Vyhláška č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov**, [10] jejímž důležitým normativním doplňkem je **ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov**. Zejména její **část 2 – požadavky** je z pohledu zákona 406/2000 Sb. významná, neboť zde uvedené požadované hodnoty tepelně technických vlastností jsou v souladu s výše uvedeným zákonem závazné.

Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů ve znění pozdějších předpisů patří k základním předpisům v oblasti stavební výroby. Definiuje technické předpisy a technické normy, upravuje postup při certifikaci, akreditaci a autorizaci a popisuje postup při posuzování shody a uvádění na trh u tzv. **stanovených výrobků**. Těmi jsou podle § 12 výrobky, které představují zvýšenou míru ohrožení oprávněného zájmu (převážná většina stavebních výrobků). [11] Prováděcím předpisem tohoto zákona je **Nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky** (ve znění Nařízení vlády č.312/2005 Sb.). [12]

1.2. Požadavky tepelně izolační

Abychom mohli definovat požadavky na tepelně izolační materiály, je třeba nejprve definovat tepelně technické požadavky na stavební konstrukce. Dle ČSN 73 0540-2 [3] musí konstrukce splňovat požadavek na maximální hodnotu **součinitele prostupu tepla U**. Je to veličina, udávající míru tepelné výměny v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími s rozdílnou teplotou, oddělenými vyšetřovanou konstrukcí. Norma rozlišuje jednak hodnoty požadované, tedy hodnoty, zajišťující minimální tepelně technické vlastnosti konstrukce z hlediska její bezproblémové funkčnosti při užívání (těchto hodnot musí dle zákona 406/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů dosahovat veškeré nově zhotovované stavební konstrukce), a dále hodnoty doporučené, které zajišťují nadstandardní, technicky možnou a ekonomicky přijatelnou úroveň (*viz příloha A*). Dodržení těchto relativně přísných hodnot je bezpodmínečně nutným prvním krokem při návrhu a realizaci budov v pasivním standardu.

Základními veličinami, ovlivňujícími hodnotu součinitele prostupu tepla stavební konstrukcí, jsou tloušťka stavebního materiálu a jeho tepelná vodivost, reprezentovaná součinitelem tepelné vodivosti λ . Z logiky věci vyplývá, že při nižší tepelné vodivosti materiálu postačí jeho menší tloušťka a naopak. Pokud vezmeme hodnoty součinitele tepelné vodivosti běžných stavebních materiálů, jako je cihla plná ($\lambda = 0,75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) [13], dutinové cihelné bloky typu Therm střední kvality bez tepelné izolace v dutinách ($\lambda = 0,115 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) [14] a běžný pórobeton ($\lambda = 0,101 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) [15], jednoduchým výpočtem zjistíme, že pro splnění požadavku na maximální součinitel prostupu tepla obvodovou stěnou $U = 0,12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, připadající v úvahu pro pasivní domy, bychom potřebovali zeď z pórobetonu silnou 0,84 m, z dutinových cihelných bloků 0,95 m a z plných cihel dokonce 6,25 m. Tyto hodnoty jsou extrémní jak z hlediska pořizovacích nákladů

a pracnosti, tak také zbytečně zastavěné půdorysné plochy. Energetický aspekt je samozřejmě obdobný. Opět se tedy v této souvislosti dostáváme k potřebě vícevrstevných konstrukcí, opatřených dostatečnou vrstvou kvalitních a účinných tepelně izolačních materiálů, kde masivní zdivo plní pouze nosnou funkci, či konstrukcí rámových, vyplněných tepelnou izolací v celé tloušťce stěny. Vzhledem k tomu, že tepelná vodivost materiálu je při neměnných okrajových podmínkách konstantní, je jediným způsobem, jak snížit hodnotu součinitele prostupu tepla daným materiálem, zvětšení tloušťky tepelně izolační vrstvy. Tyto tloušťky mohou někdy dosahovat až extrémních hodnot. Například pro zmiňované pasivní domy se doporučuje cca 200 – 250 mm tepelné izolace v podlaze na terénu, 350 mm ve stěnách a 400 mm ve střeše. [3]

1.2.1. Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je základní tepelně technickou charakteristikou. Jejím číselným vyjádřením je **součinitel tepelné vodivosti** λ . Definován je jako množství tepla, které při ustáleném tepelném toku projde za jednotku času materiálem o jednotkové tloušťce při jednotkovém tepelném spádu. Jinak řečeno, je to materiálová konstanta, která vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo. Čím je jeho hodnota menší, tím lepší má materiál tepelně izolační vlastnosti. Jako tepelný izolant můžeme dle ČSN 73 0540-1 označit materiál, jehož součinitel tepelné vodivosti je za normálních podmínek menší než $0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Pro laboratorní stanovení používáme celou řadu metod. Základní dělení je podle teplotního stavu zkušební vzorku během měření na metody stacionární a nestacionární. U stacionárních metod je nutné zajistit ustálený tepelný tok, procházející od teplejšího povrchu zkušební vzorku k chladnějšímu. Naproti tomu u metod nestacionárních stanovujeme hodnotu hledané veličiny na základě sledování průběhu teplotní vlny vzorkem. Ze **stacionárních metod** rozeznáváme metodu válce (dle ČSN 72 7011), metodu koule (ČSN 72 7013) a v praxi nejpoužívanější metody desky, dále se dělí na metodu chráněné teplé desky (ČSN 72 7012-2, ČSN EN 12667 a ČSN EN 12939, ISO 8301) a metodu měřidla tepelného toku (ČSN 72 7012-3, ČSN EN 12667 a ČSN EN 12939, ISO 8302). Z **metod nestacionárních** jsou to zejména metoda nestacionárního tepelného toku (ČSN EN 72 1105) a metoda topného drátu (ČSN EN 993-14), méně často dále metoda záblesková a šokové metody. [16]

1.2.2. Tepelná jímavost

Tepelná jímavost b je schopnost materiálu o definované vlhkosti přijímat teplo. Je rozhodující veličinou při posuzování **tepelné akumulace** stavebních konstrukcí. Ta má klíčový význam zejména při hodnocení fázového posunu teplotní vlny a s tím související

tepelné stability interiérů budov. Brání rychlému vychládání objektů v zimním období, i jejich letnímu přehřívání. Ačkoliv ji lze do jisté míry nahradit zvýšením tepelně izolačních vlastností konstrukce, její vliv nelze zcela zanedbávat. Tepelná jímavost je definována vztahem:

$$b = \lambda \times c \times \rho \quad (1)$$

kde: b – je tepelná jímavost [$\text{W}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{K}^{-2}$]
 λ – je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 c – je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 ρ – je objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Měrná tepelná kapacita c udává množství tepla, které je třeba dodat 1 kilogramu materiálu, aby se jeho teplota změnila o 1 Kelvin. Stejně jako tepelná vodivost, je závislá na teplotě materiálu, při které mu teplo dodáváme a na obsahu vlhkosti. S rostoucí teplotou stoupá i měrná tepelná kapacita. K laboratornímu stanovení používáme kalorimetrické metody. Touto problematikou se zabývá například ČSN 72 1105. Z definice tepelné jímavosti vyplývá, že při snižování objemové hmotnosti, jež je žádoucí pro dosažení co nejlepších tepelně izolačních vlastností, také klesá. Právě v těchto případech může měrná tepelná kapacita stavebních materiálů hrát významnou roli.

1.3. Požadavky na mechanické vlastnosti

Základním požadavkem na stavební konstrukce, potažmo materiály, je dle vyhlášky č. 268/2009 Sb. mechanická odolnost a stabilita. Ačkoli tepelně izolační materiály jsou pouze zřídka materiály nosnými, určité zatížení obvykle přenášet musí, ať již je to zatížení od vlastní váhy, podlahové konstrukce či fasádního systému. Proto také s ohledem na plánovanou aplikaci těchto materiálů existuje celá řada zkušebních postupů, podrobojících materiály různému druhu zatížení v různých směrech. Každý z nich je samozřejmě zakotven v příslušné zkušební normě. Jsou to například zkouška ohybem (ČSN EN 12089), zkouška smykem (ČSN EN 12090), stanovení pevnosti v tahu v rovině desky (ČSN EN 1608) či stanovení odolnosti při bodovém zatížení (ČSN EN 12430). Pro obvyklou aplikaci vláknitých materiálů mají však největší význam stanovení napětí v tlaku při 10% deformaci (ČSN EN 826) a stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky (ČSN EN 1607).

1.3.1. Napětí v tlaku při 10% deformaci

Napětí v tlaku stanovíme dle ČSN EN 826 [17] tak, že pravoúhlý zkušební vzorek tvaru kvádry zatěžíme danou rychlostí kolmo na jeho větší rovnoběžné povrchy tlakovou silou za současného zaznamenávání poměrného stlačení:

- a) do porušení (dosažení meze tečení materiálu) a určíme příslušnou deformaci, pokud je menší než 10 %, výsledkem je pevnost v tlaku,
- b) pokud nenastane porušení do okamžiku 10% deformace.

Současně se zatěžováním zaznamenáváme pracovní diagram materiálu. Výslednou pevnost v tlaku či napětí při 10% stlačení poté stanovíme jako podíl stanovené síly a původní zatěžovací plochy tělesa. Všechna přetvoření pro výpočet poměrného stlačení měříme od tzv. bodu nulové deformace, který získáme z pracovního diagramu prodloužením lineární nejstrmější části jeho křivky k ose procházející počátkem.

Tato veličina je velice důležitá pro aplikaci izolačních materiálů do plovoucích podlah, popisuje totiž chování materiálu při stlačení a jeho schopnost vzdorovat zatížení od nášlapné vrstvy a zatížení provoznímu.

1.3.2. Pevnost v tahu kolmo k rovině desky

Pevnost kolmo k rovině desky stanovíme dle ČSN EN 1607 [18] jako podíl největší tahové síly, naměřené v průběhu tahového namáhání kolmo k povrchu výrobku a průřezové plochy zkoušeného vzorku, tvaru kolmého hranolu.

U vláknitých izolačních materiálů se jedná v podstatě o odpor proti rozvláknění a následnému odtržení horních vláknitých vrstev. V praktické aplikaci vyjadřuje například maximální hmotnost fasádního systému, kterou je materiál schopen přenést.

1.4. Požadavky na požární odolnost

Obdobně jako při hodnocení požadavků tepelně izolačních, také v případě požární bezpečnosti musíme nejprve stanovit požadavky na stavební konstrukci. Dle normy ČSN 73 0810 [19] označujeme jako **požární odolnost konstrukce** dobu v minutách, po kterou posuzovaná konstrukce splňuje charakteristické vlastnosti – mezní stavy (např. nosnost, celistvost, tepelná izolace, hustota tepelného toku, kouřotěsnost, apod.). Dalším faktorem je druh konstrukční části. Na základě těchto kritérií dále norma rozděluje jednotlivé stavební materiály podle jejich hořlavosti do sedmi **tříd reakce na oheň** (A1, A2, B, C, D, E a F). Zabudovávané materiály musí vykazovat odpovídající třídu reakce na oheň (nebo být odpovídajícím způsobem chráněny), aby hotová konstrukce splňovala požadavky na požární odolnost podle svého druhu.

Klasifikací stavebních výrobků podle reakce na oheň se zabývá ČSN EN 13 501-1. [20] Odkazuje se na několik dalších zkušebních norem. V první řadě se jedná o ČSN EN ISO 11925-2 – zkouška malým zdrojem plamene. Pokud materiál po zkoušce nevyhoví v normě uvedeným parametrům, je zařazen do třídy F – hořlavé, v opačném případě do třídy E. O zařazení do vyšších skupin D, C či B se dále rozhoduje dle

ČSN EN 13823 – vystavení tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu. Materiály nehořlavé (tedy zařazené do třídy A2 či A1) musí splňovat stejné požadavky jako materiály třídy B, navíc se však ještě přidávají požadavky ČSN EN ISO 1182 – zkouška nehořlavosti a ČSN EN ISO 1716 – stanovení spalného tepla.

1.5. Požadavky environmentální

Člověk se odedávna snažil žít v souladu s přírodou. Znal přírodní zákonitosti a věděl, že vše, co potřebuje k životu, v přírodě najde. Na oplátku si bral jen tolik, kolik potřeboval a nezapomínal vzniklé mezery doplňovat pro budoucí generace. Dnes bychom řekli, že žil podle zásad trvale udržitelného rozvoje. V době průmyslové revoluce se však s nástupem industrializace přestěhoval se do měst, místo na poli pracoval v továrně a bez každodenního kontaktu s přírodou zapomněl její zákonitosti. Začal se k přírodě chovat majetnický, a proto ji drancoval a ničil. Založil svou existenci na nerostných surovinách a zapomněl na nutnost obnovovat ubývajících zdroje. S postupem technologického pokroku se rychlost tohoto počínání zvyšovala. Nastoupil konzumní způsob života, který přetrval do dnešních dnů. Dnes, na prahu energetické krize, si již velmi těžko hledáme cestu zpět k přírodě. Velmi nákladně se snažíme dosáhnout něčeho, co naši předci považovali za samozřejmost. Pokud tuto myšlenku vztáhneme konkrétně na stavebnictví, naším největším cílem je plně soběstačný dům. Tento model domu v historii nejen existoval, ale běžně fungoval. Byl to klasický venkovský statek. [2] Okolní polnosti vyprodukovali majitelům dostatek potravy i dřeva na topení, půda se na zimu zateplila slámou pro zvířata, zdi hranicemi z polen a okna se utěsnila mechem. Jen elektřinu nahrazovala síla zvířat a svíce na svícení. Samozřejmě životní úroveň již dnes poněkud pokročila, společně s ní však rostou i náklady na dosažení stejných výsledků. Pokud nazveme 19. století stoletím páry a 20. století stoletím vynálezů, mělo by 21. století být stoletím uvědomění a napravování starých škod.

Schválením **Kjótského protokolu** v prosinci 1997 se ČR zavázala do konce prvního kontrolního období (do konce roku 2012) snížit emise skleníkových plynů o 8 % v porovnání s rokem 1990. Na **konferenci v Doha** v prosinci 2012 byl schválen dodatek, zajišťující do konce druhého kontrolního období (konec roku 2020) snížení o 20 % v porovnání s rokem 1990. [21] České republice se podařilo zejména díky masivní transformaci průmyslu po roce 1990 dosáhnout k začátku roku 2008 snížení emisí až od 26 %, takže by se mohlo zdát, že se nás další snižování emisí již nemusí týkat, v porovnání s průměrem zemí E15 jsme však k témuž datu měli zhruba dvojnásobnou energetickou náročnost budov a domácností [22], proto by se naše pozornost měla upínat ke zvýšení počtu nízkoenergetických a pasivních novostaveb a s minimálně stejným nasazením také k promyšleným úpravám stávající zástavby tak, aby se těmito novostavbám co nejvíce blížila.

Důležitými parametry energetické úspornosti nových řešení jsou na jedné straně tepelně technické vlastnosti vznikajících konstrukcí, na druhé straně pak vlastnosti použitých materiálů. Zde je třeba zmínit pojem **ekologická stopa**. Je to číselná hodnota, která numericky definuje podíl energetické složky a míry znečištění prostředí pro daný výrobek, tedy jinými slovy, jak moc daný výrobek je či není environmentálně příznivý. Pro hodnocení ekologické stopy používáme jako kritéria množství vázané (tzv. šedé) energie, tvořené energií na těžbu, úpravu a dopravu suroviny, výrobu a dopravu produktu, dále emise CO₂ (neboli potenciál globálního oteplování) a emise SO₂ (potenciál zakyselení atmosféry). [23]

Vypouštění CO₂ a SO₂ do atmosféry je značně ovlivněno zejména spalováním fosilních paliv, potřebných pro většinu technologických procesů ve stavebnictví. Můžeme proto říci, že environmentálně příznivější jsou materiály recyklované a materiály přírodní (v našich podmínkách zejména dřevo), které jsou obnovitelné a navíc mají například bilanci CO₂ zápornou, což znamená, že při jejich zpracování unikne do ovzduší méně CO₂, než materiál během svého „života“ z atmosféry pojme. Pokud požadavek ještě více specifikujeme na výrobu izolačních hmot, měl by trend směřovat k náhradě materiálů s vysokou spotřebou energie (minerální vlákna) a materiálů, zatěžujících životní prostředí (penový polystyren) materiály environmentálně příznivějšími (například sláma, korek, len, konopí, ovčí vlna či výrobky z dřevní hmoty).

2. Přírodní vláknité materiály

Základní dělení přírodních vláken je na vlákna rostlinná a živočišná. Zatímco rostlinná vlákna jsou tvořena převážně celulózu, živočišná vlákna se skládají z bílkovin. Oba druhy jsou vhodnou surovinou pro výrobu tepelně izolačních materiálů. Díky moderním účinným a vysoce univerzálním technologiím pojení (jejichž popis je obsahem další kapitoly) lze s trochou nadsázky říci, že je možné vyrobit funkční stavební tepelně izolační materiál z téměř libovolné vláknenné suroviny. Tím se otevírá značné pole působnosti výzkumné činnosti především v oblasti rostlinných vláken, kterých je zejména v zahraničí mnoho druhů, dostupných často v dostatečném množství i kvalitě, eventuálně s možností průmyslového zpracování. Někdy lze vytipovat dokonce odpadní suroviny, které nemají jiné využití a jejich další zpracování je proto velmi účelné.

I zde však platí pojem **ekologická stopa**, a to zejména s ohledem na ekonomicky i ekologicky náročný dovoz, byť jinak velice slibných, cizokrajných vláknitých surovin. Síla přírodních stavebních materiálů obecně spočívá ve zpracování místních surovin s podporou místních zemědělců a drobných producentů, s minimem nákladů na dopravu a manipulaci a s expedicí místním uživatelům. Vezmeme-li navíc v potaz obvyklé víceúčelové využití zpracovávaných rostlin či chovaných zvířat, jejich význam dalece přesahuje oblast výroby stavebních hmot i celého stavebnictví. Z tohoto důvodu je v následujícím textu největší důraz

kladen na materiály dostupné v našem prostředí. Pro úplnost jsou na konci kapitoly ve stručnosti popsány i materiály cizokrajné a zajímavé novinky ze zahraničí.

2.1. Rostlinná vlákna

Tato vlákna získáváme z různých částí rostlin jako hlavní či vedlejší produkt jejich růstu. Tvořena jsou převážně celulózu. Vlákna se nalézají v semenech (například u kapoku či bavlny), plodech (kokos), lodyhách (len, konopí, juta, ramie, kenaf, kopřiva, klejcha) či listech (sisal, manilské konopí, novozélandský len, agáve, ananas, aloe či rašelina). [24] Z hlediska klimatických podmínek, potřebných pro růst, i historické tradice mají na území střední Evropy největší význam lýkové rostliny, zejména len a konopí.

2.1.1. Len

Len setý (*Linum usitatissimum* L.) je jednoletá, 90 – 130 cm vysoká, modře či fialově kvetoucí rostlina. Je citlivý především na zásobování vodou a proto by měl být pěstován v oblastech, kde je úhrn srážek minimálně 600 mm ročně, tedy především v podhorských oblastech. Kvete od června do srpna. [25] Co se týče chemického složení, hlavní složkou je celulóza s přibližně 80 procenty, dále přibližně 15 % tvoří hemicelulózy a 4 % pektiny. Vlákna jsou obsažena v kůře ve svazcích, nazývaných technické vlákno. Ty jsou tvořeny asi 15 – 30 elementárními vlákny, spojenými pektinem do těles délky 20 – 140 cm a tloušťky 200 – 300 μm . Jednotlivá elementární vlákna jsou dlouhé protáhlé buňky, na koncích uzavřené, v jejichž středu je lumen. Mají délku obvykle 17 – 40 mm a tloušťku 12 – 17 μm .

Len patří mezi univerzální plodiny, které se dají zpracovat celé, téměř bez odpadu. Mezi základní produkty patří dlouhé vlákno pro výrobu textilu (asi 7 % z celkového objemu), dále koudel (krátké vlákno), použitelná pro výrobu papíru či geotextilií (asi 9 %) a semena (asi 15 %) [26], ze kterých se vyrábí fermež či lisuje olej, používaný v kosmetickém a farmaceutickém průmyslu. Lněný olej má příznivé účinky na lidské zažívání a je kvalitním zdrojem nenasycených mastných kyselin. Zbytek po lisování oleje – pokrutina nachází uplatnění jako krmivo pro hospodářská zvířata. Asi 20 % celkového objemu rostliny tvoří ztráty a zbytek (tedy kolem 50 %) zdřevnatělých částí stonků, nazývaný pazdeří, má po nadrcení kladivovým drtičem široké uplatnění, zejména jako podestýlka pro dobytek, palivo, v nábytkářském průmyslu či pro různé aplikace ve stavebnictví.

Len se sklízí v době rané žluté zralosti, kdy poskytuje nejkvalitnější vlákno. Vytrhává se i s kořenem, aby sklizeň dlouhého vlákna byla co největší. Vlastní sklizeň má několik fází: vytrhání lnu, odsemenění a usušení (obracení). Nejčastější je tzv. přímá sklizeň, kdy se rostliny při trhání zároveň odsemeňují, ale lze použít i sklizeň dělenou, která zvyšuje účinnost rosení. K této fázi sklizně ještě patří odvoz a sušení výčesků (tobolek se semeny). Vysušené

výčesky se mlátí na stacionární mlátiče a získaná semena se ošetří podle zásad platných pro olejnatá semena.

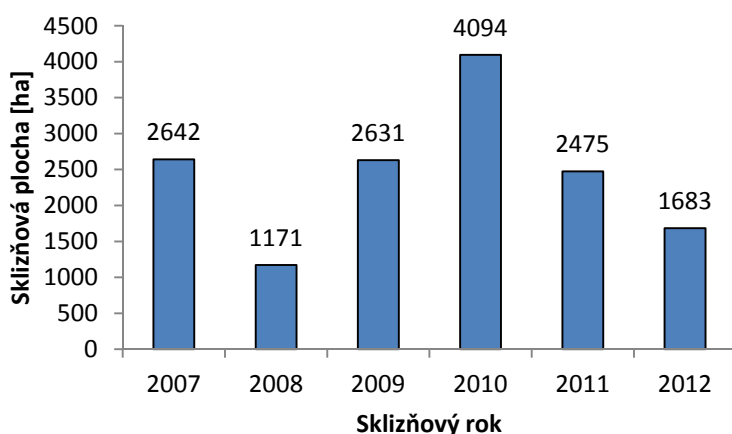
Dalším krokem je rosení, kterým bylo nahrazeno ekonomicky i ekologicky náročnější máčení. Je to biochemický proces, při kterém se lněný stonek nejprve zbaví vegetační vody, a při dalším vlhčení do něho se společně s vodou dostávají příslušné mikroorganismy, které enzymatickou činností rozkládají pektiny a tím uvolňují vlákna od ostatních částí stonku. Alternativou k rosení může být oddělování mechanické, které však poskytuje hrubé a nekvalitní vlákno, dále oddělování chemické či tzv. parní exploze. Tyto metody se však z důvodu vysoké ceny příliš nerozšířily. Jakmile je lýko dostatečně odděleno od dřeva, musí se stonky vysušit, čímž se přeruší rozkladný proces. Vlákna jinak ztrácí pevnost (dochází k přerosení lnu). Když klesne obsah vody na 15 – 18 %, lze stonky svinout do balíků a odvézt do tírny. [27]

Na tírni probíhá nejprve rovnání a pročešávání svazků vláken, poté zpravidla mechanické lámání, při kterém dochází k uvolňování pazdeří a následně potěrání, jímž se uvolněné pazdeří odděluje od vláken. Ta dále putují do vochlovny, kde se vochlováním, tedy pročešáváním speciálně upravenými hřebeny od sebe oddělují dlouhá vlákna a koudel. Dlouhá vlákna se následně v přádelně za sucha nebo za mokra spřádají. Konečným produktem je lněná příze.

Len se nejprve pěstoval pro olejnatá semena, později i pro jemná vlákna. V Mezopotámii, označované za kolébkou zemědělství, se len pěstoval a z lněných vláken se vyráběly provazy, sítě i tkaniny. Odtud se rozšířilo pěstování lnu přes Egypt dále do Persie, středomoří i Indie. Římané spolu se Slovany rozšířili pěstování lnu v Evropě. Na konci 18. století se len v Evropě s 18 % (vlna 78 %) významně podílel na celkové spotřebě textilních vláken. [28] V roce 2011 se celosvětová roční produkce lněných vláken (včetně koudele) pohybovala kolem 228 000 tun (což bylo asi 0,7 % všech textilních vláken), přičemž 37 % připadlo na EU. Nyní má ve světě dlouhodobě spíše klesavou tendenci. [29]

V Československu byl len přadný zejména za první republiky významnou zemědělskou plodinou především v bramborářských a podhorských oblastech. Například v roce 1925 bylo oseto 24 731 hektarů, výnos sklizeného lněného vlákna činil 13 070 tun. [30] Poté v návaznosti na dovoz ze zahraničí došlo k poklesu produkce, ale po 2. světové válce se produkce opět zvyšovala až do 80. let 20. století, kdy bylo oseto až 25 000 hektarů. Počátkem 90. let 20. století se vlivem otevírání trhu západní Evropy a také nerovných podmínek v zemědělství plocha pěstovaného lnu neustále snižovala, v roce 1998 činila pouze 2 000 hektarů. [27] Došlo k útlumu domácí textilní výroby, k snížení ceny lnu na světových trzích, pro pěstitele byl po vstupu do EU i méně výhodný dotační systém. V roce 2009 bylo oseto v ČR lnem pouze 150 hektarů a o rok později ukončila svoji činnost i společnost Čemolen, která se zpracováním lnu zabývala od 50. let 20. století a v dobách největšího rozmachu provozovala na našem území až 26 tíren. [31]

Dnes u nás bohužel vlivem mnoha okolností a zejména vlivem neprozíravé zemědělské politiky pěstování této plodiny s velmi dlouhou historickou tradicí mizí. V minulém roce (2012) již plocha osázená přadným lnem nedosáhla ani jednoho hektaru. Byť velmi kolísavě (viz graf 1), stále ještě se u nás pěstuje len olejný a zdá se, že by svou pozici mohl i do budoucna udržet. Hlavním produktem této rostliny je semeno, zpracovávané především na olej, a zbytek rostliny tvoří odpad, který se bez dalšího užitku zaorává či kompostuje. Stonek, který je kratší a více rozvětvený, než u lnu přadného, a neposkytuje dostatečně kvalitní vlákno pro textilní průmysl (po kterém u nás ostatně dnes ani není poptávka), by však podle předběžných výsledků projektu přeshraniční spolupráce Cíl 3 - Translinum mezi Českou republikou a Svobodným státem Sasko na léta 2007 až 2013 mohl poskytovat vhodnou surovinu pro výrobu tepelně izolačních materiálů. [32]



Graf 1 - Sklizňové plochy lnu olejného v ČR
v letech 2007 – 2012



Obrázek 1 - Len setý

2.1.2. Konopí

Konopí je tradičně pěstovaná jednoletá dvoudomá, až 4,5 m vysoká rostlina z čeledi konopovitých (Cannabaceae), pocházející z Asie, jejíž pěstování se rozšířilo také do Evropy, Severní a Jižní Ameriky. Daří se jí zejména na hlinitých, neutrálních či mírně zásaditých půdách, převážně v teplejších oblastech. [35] Složena je ze 75 % z celulózy, 18 % hemicelulózy a 4 % ligninu. Podobně jako v případě lnu se jedná o rostlinu lýkovou, vlákno tedy získáváme z kůry stonků. V porovnání s lnem je konopné vlákno tmavší, pevnější a odolnější namáhání i povětrnosti. Průměrná délka vlákna je 20 mm a tloušťka vlákna 22 µm. [26]

Rozeznáváme několik druhů konopí. Například je to konopí indické (*Cannabis Indica*), nechvalně proslulé pro vysoký obsah omamné látky THC v jeho pryskyřici (8 až 25 %). Jedná se o jednu z nejznámějších rostlinných drog vůbec. Množství účinných látek v rostlině se mění v závislosti na růstu rostliny a jejím stáří. Základními formami drogy z konopí je marihuana a hašiš. Marihuana (někdy rozlišovány dva druhy – bhang a ganja) jsou sušené listy a samičí květenství, užívané kouřením. Hašišem nazýváme vlastní pryskyřici, která se také kouří, nebo se z ní vyrábějí různé poživatiny. Účinek drogy spočívá v navození stavu opojení, při kterém dochází k vytváření příjemných iluzí, to vše při zachování vědomí. Dochází ke snížení motorických funkcí, k halucinacím, především zrakovým, ale také zvukovým a k navození slastného vzrušení, po kterém je člověk v apatii. [35]. Dalšími druhy konopí jsou konopí plané (*Cannabis ruderalis*), jednoletý plevel, hojně rozšířený v rozlehlých oblastech východní a střední Asie a Severní Ameriky, jehož průmyslové využití je nulové, a zejména **konopí seté** (*Cannabis Sativa*), neboli technické konopí, které se vyznačuje velmi nízkým obsahem THC (do 0,3 %) a vyšším, méně rozvětveným stonkem, poskytujícím delší a kvalitnější vlákno. To se dále dělí na několik poddruhů. Nejvýznamnějšími jsou konopí středoruské, vykazující větší výnosností semen (u nás nejrozšířenější druh) a konopí jižní, které poskytuje velmi kvalitní, dlouhé a jemné vlákno s velmi dobrými výnosy, naproti tomu výnos semen je nižší. [36]

Stejně jako len, ani konopí se nepěstuje pouze pro vlákno, ale využívá se téměř celá rostlina. Udává se, že z konopí lze zhotovit až 25 000 různých produktů. Obdobně jako u lnu jsou hlavními produkty semena, dlouhá vlákna, koudel a pazdeří. Ze semene se opět lisuje olej, zpracováváný v potravinářském, kosmetickém a farmaceutickém průmyslu, a také pro výrobu fermeže. Zbývající pokrutina se používá jako krmivo pro hospodářská zvířata, ale také se z ní mele konopná mouka. Celé konopné semeno je výživnou potravou a obsahuje 20 - 25 % bílkovin, 20 – 30 % karbohydrátů, 10 - 15 % vlákniny, stejně jako množství minerálů, například vápník, hořčík, fosfor, draslík, síru a vitamín A. Namočené konopné semeno se může zpracovat na neživočišné mléko, sýry a dokonce i na zmrzlinu. Významné jsou také prokázané léčivé vlastnosti konopí, které pomáhají například při léčbě astmatu, zeleného zákalu, epilepsie a křečí či depresí, tiší bolesti, zpomaluje růst nádorů a zmírňuje následky chemoterapií. [37] Dlouhé vlákno se samozřejmě používá zejména v textilním průmyslu. Ze všech přírodních vláken má nejvyšší odolnost vlivům povětrnosti a také vykazuje vysokou pevnost. Proto se odedávna používalo pro náročné aplikace na výrobu pytlů, lan a lodních plachet, ale i na obuv či oděvy, které jsou však obvykle hrubší, než například oděvy lněné. Koudel se používá jako vodovodní těsnění či pro výrobu netkaných textilií. Posledním a neméně významným produktem je konopné pazdeří, kterého rostliny obsahují zhruba o 5 % více, než je tomu u lnu. Kromě využití jako paliva či podestýlky hospodářských zvířat má stále širší uplatnění v ekologickém stavitelství například pro výrobu deskových materiálů jako náhrada dřevotřískových, překližkových či OSB desek, ale také jako přísada do hliněných omítek nebo v poslední době pro přípravu „hemcrete“, neboli

konopného betonu, tedy směsi konopného pazdeří, jílu a vápna, pucolánu či cementu. Samotná směs nedosahuje potřebných pevností, v kombinaci s rámovou či hrázděnou dřevěnou konstrukcí se však jedná o velmi zajímavý stavební materiál. [38] Pro výrobu stavebních tepelně izolačních materiálů není třeba zpracovávat pouze čisté vlákno, které lze použít pro ušlechtilější aplikace, bez významné změny sledovaných vlastností lze přidat i krátká vlákna a dokonce část pazdeří. Tím je možné zvýšit výtěžnost suroviny a příznivě ovlivnit mechanické vlastnosti výrobku.

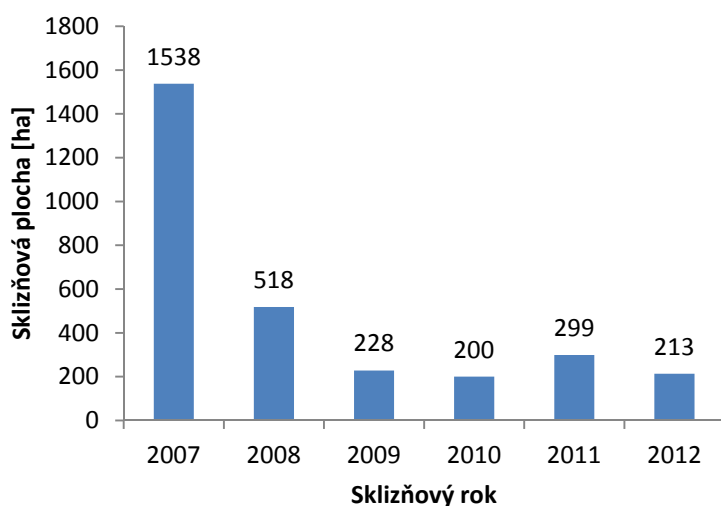
Konopí je jednou z nejstarších kulturních plodin. Již kolem roku 2800 před Kristem bylo v Číně používáno jako lék proti malárii, revmatismu a mnoha dalším chorobám. Z konopného vlákna se vyráběly látky na oděvy, ale i papír či velmi pevné plachty a lana pro lodě. Úpadek v pěstování nastal v 19. století, s ohledem na rozšíření parního stroje jako pohonu lodí. Teprve koncem 20. století se v souvislosti s novými způsoby využití a pěstování konopí začíná znovu rozšiřovat, a to zejména v zemích západní Evropy a Severní Ameriky. V roce 2011 činila celosvětová produkce konopí asi 52 000 tun vláken a 90 000 tun semen, v rámci EU to bylo 16 000 tun vláken a 40 000 tun semen. [29]

Dnes a zejména v blízké budoucnosti bude konopí významné jako vydatný zdroj celulózy jak pro výrobu papíru a chemický průmysl, tak také pro produkci plastů a celulózových kompozitů, nahrazujících petrochemické výrobky. Z konopného lánů sklídíme každým rokem i 4x více celulózy s nižším obsahem ligninu, než ze stejně velké plochy lesa, který navíc roste desítky let. V některých oblastech můžeme konopí sklízet i 2x do roka. Rostlina svým rychlým růstem zastíňuje půdu, čímž zabráňuje rozšíření plevelu. Obsahuje také látky, které odpuzují hmyz, při jejím pěstování tedy není nutné používat žádné herbicidy či insekticidy. Je navíc velmi nenáročná, proto může být vysazována opakovaně na stejném místě. Jedná se také o vhodnou předplodinu pro jiné rostliny, které poté vykazují zlepšený růst. Konopí je však třeba dostatečně hnojit hnojivy bohatými na dusík. Z 1 hektaru je možné získat až 12 tun suroviny. [23] Zajímavou alternativou, kterou také pravděpodobně odpovídajícím způsobem docení až budoucnost a s ní spojený akutní nedostatek fosilních paliv, je energetické využití konopí. Kromě přímého spalování pazdeří volně či ve formě pelet se nabízí také přeměna pyrolýzou za vzniku obdoby dřevěného uhlí a úniku plynu, použitelného pro pohon generátorů či svícení. Navíc konopné semeno obsahuje zhruba 30 % oleje, velmi dobře použitelného pro pohon leteckých či dieselových motorů. Konopí má tedy velké předpoklady stát se zdrojem pro trvale udržitelné, ekologické polní hospodářství. [37]

Také u nás má pěstování a zpracování konopí a lnu bohatou historii. Až do nástupu průmyslové revoluce v 19. století zaměstnávalo tkalcovství v některých částech naší země až 3/5 ekonomicky aktivního obyvatelstva. Po rozšíření parního stroje bylo však konopí postupně vytlačováno právě lnem, jehož sklizeň a zpracování bylo možné snáze mechanizovat. Princip těchto operací je u obou rostlin v podstatě stejný, mnohem pevnější konopné vlákno však nože sklizňových strojů velmi rychle tupí a ty je třeba často vyměňovat. Vlákno jinak tupé nože a poté i hřídele obalí a stroj je vyřazen z provozu. Při nepozornosti

obsluhy přitom může být i zničen. To sklizeň nejen zdržuje, ale také prodražuje. Ani tírenské zpracování velmi pevného, až 5 metrů dlouhého stonku není právě jednoduché. [39] Nejen tyto faktory, ale také spojitost s marihuanou a bojem proti ní způsobily, že pěstování konopí u nás i v Evropě bylo po několik desetiletí takřka tabu.

Renesance v pěstování konopí nastala i u nás koncem 90. let 20. století, neměla však bohužel příliš dlouhého trvání. Po maximu v roce 2005, přesahujícím 1500 ha osevní plochy nastal opět relativně strmý pokles (viz graf 2). Důvodů je několik. Jednak je to díky legislativním omezením, zakotveným v aktuálním zákoně o návykových látkách č. 167/1998 Sb., ve znění pozdějších předpisů (osoba pěstující konopí na ploše větší než 100 m² má totiž ohlašovací povinnost, navíc může pěstovat pouze schválené odrůdy s obsahem THC pod 0,1 % a i malé překročení této hranice hrozí tvrdými sankcemi včetně nepodmíněného odnětí svobody), dalšími faktory jsou již zmiňované obtíže při sklizni (ačkoliv například trojúrovňová sekačka z dílny české firmy Tebeco se jeví vcelku slibně) [40], ale hlavním důvodem je chybějící výrobní kapacita na prvotní zpracování stonku na vlákno, protože tírenské závody, které toto zpracování realizovaly (zejména již dříve vzpomínaná společnost Čemolen), díky nekonceptnosti řízení ekonomiky státu a vlivem nekoordinovanému chování privátní sféry téměř zcela zanikly. [32] Několik zbývajících drobných zpracovatelů pracuje s velmi malými kapacitami často ručně nebo ve značně provizorních podmínkách a jejich celkový přínos tak není velký. Je proto smutným faktem, že ačkoliv poptávka po konopném semeni, vlákně a ostatně i pazdeří mezi našimi zpracovateli existuje, jsme jako země s mnohasetletou tradicí pěstování konopí odkázáni na dovoz této suroviny ze zahraničí.



Graf 2 - Sklizňové plochy konopí setého v ČR
v letech 2007 – 2012 [33]



Obrázek 2 - Konopí seté [41]

2.1.3. Bavlna

Bavlna je nejrozšířenější průmyslově pěstovanou plodinou na světě s roční produkcí až 20 milionů tun. Roste na více než 1 % veškeré světové výměry zemědělsky obdělávané půdy. Bavlna vykvétá velkými bílými či žlutými květy, ze kterých se po opadnutí vyvíjí tobolek, v době zralosti (45 – 70 dní po odkvětu) pukající. Obsahují drobná, hnědá, olejnatá semena, využívaná na výrobu stolního oleje a mýdla. Osemení je kryté 20 – 60 mm dlouhými, bílými, jednobuněčnými chlupy bavlněných vláken, která slouží jako základní surovina pro textilní a oděvní průmysl. Bavlněné vlákno je tvořeno téměř výlučně celulózu (až 96 %). Představuje nejčistší přírodní zdroj celulózy, proto se ho využívá také pro speciální aplikace (například cigaretový papír, bankovní papír nebo jako surovina pro výrobu nitrocelulózy). Tloušťka vlákna se pohybuje v rozmezí 12 – 17 μm . [26]

Využití bavlněných vláken pro výrobu textilu je lidstvu známo po velmi dlouhou dobu. Například staří Egypťané pro tento účel bavlnu pěstovali údajně již před 12 000 lety. Různé odrůdy bavlníku byly nezávisle domestikovány i v Jižní Americe a v Indii. Naproti tomu v Evropě byla bavlna neznámá až do pozdního středověku. Hlavními textilními surovinami byly konopí a len. Bavlna a výrobky z ní se dostaly do širšího povědomí až v 16. století. Velká změna nastala v době průmyslové revoluce, kdy se bavlna díky svým výhodným fyzikálním vlastnostem a relativně snadno mechanizovatelnému zpracování stala velmi důležitou pro textilní průmysl a koncem 19. století představovala přibližně 80 % objemu všech textilních materiálů. V dnešní době si bavlna sice uchovává své postavení jako nejvýznamnější přírodní vlákno, ale její význam byl do značné míry nahrazen vlákny syntetickými. Na dnešní produkci textilií se bavlna podílí zhruba 30 %. Nepěstuje se ani v České Republice a v technicky použitelném množství ani jinde v Evropě. Do Evropy se dováží z velké části ze střední Asie a východní Afriky. [42]

Bavlna má pro výrobu stavebních izolačních materiálů velmi vhodné vlastnosti. Kromě výborných tepelně a akusticky izolačních parametrů je to zejména její schopnost vlhkostní regulace vnitřního prostředí. Omezujícím faktorem využití přírodní bavlny pro tyto aplikace je však vysoká ekologická náročnost jejího pěstování. Typické je zejména velmi hojné používání chemických pesticidů, herbicidů a defoliantů (slouží k odstranění listů před sklizní plodiny). Tyto přípravky se aplikují desetkrát až dvacetkrát do roka a zatížení životního prostředí (až 20 % celosvětově spotřebovaných pesticidů připadá právě na bavlnu), společně se zdravotními riziky pracovníků plantáží, je nedozírné. Budoucí snahy jsou tedy směřovány jednak k pěstování transgenní bavlny (bavlny odolné živočišným škůdcům), jejíž produkce je však zatím stále v počátečním stádiu, a zejména k důsledné recyklaci a maximálnímu využití použitých bavlněných vláken. [23]

Bavlna je stále ještě nenahraditelnou surovinou pro textilní průmysl. Podle délky bavlněného vlákna se z ní vyrábí například lehké tkané a pletené svrchní oblečení, spodní a ložní prádlo, posteloviny z kratších vláken dále tkaniny, méně náročné na stejnoměrnost

a hladkost příze, například džíny, prostěradla, hrubé ručníky či utěrky, krátká vlákna pak slouží například pro výrobu pracovních oděvů nebo čistících hadrů. Všechny tyto produkty dříve či později přestanou plnit svou úlohu a poté končí nejčastěji na skládkách komunálního odpadu či ve spalovnách, proto je jejich další využití ekonomicky i ekologicky žádoucí.

První pokusy o zpracování odpadní bavlny se datují do 90. let minulého století v USA. Nejprve se využívala nízkohodnotná přírodní bavlna, brzy však vyšlo najevo, že lze stejně zpracovávat také odpadní bavlněný textil. V současnosti jsou hlavní surovinou vyřazené džíny a odpady z výroby bavlněných tkanin – nejružnější odstřížky a odřezky, příze, či jinak nezpracovatelná textilní vlákna. Shromážděný textil se nejprve ručně třídí podle materiálu (přírodní, syntetické, celulózové), dále podle pevnosti a barvy. Následuje čištění a odstranění knoflíků a zipů. Dále se tkanina seká v rotačních či gilotinových sekacích strojích a poté směs prochází trhacím strojem, sestávajícím z několika ocelových válců, opatřených ocelovými kolíky. Ty z materiálu, přidržovaného podávacími válečky, vytrhávají chomáčky vláken. Výsledným produktem jsou vlákenné chomáče – trhanina [43]. Bavlněná trhanina se mísí s bikomponentními vlákny a solemi kyseliny borité či sodou, které působí jako zpomalovač hoření a také ochrana proti plísni a škůdcům. Následuje proces teplovzdušného pojení. Výsledný izolační materiál obsahuje minimálně 85 % recyklovaných bavlněných vláken. K výhodám patří kromě velmi dobrých tepelně a akusticky izolačních vlastností také 100 % recyklovatelnost, nízká energetická náročnost výroby, nulový obsah formaldehydů a dalších silně toxických látek. Při práci nejsou zapotřebí žádné ochranné pomůcky, nedráždí kůži ani sliznice.

Bavlněné izolační materiály pro stavebnictví v zahraničí postupně získávají na oblibě. Jejich výrobou se zabývají například americké firmy Bonded Logic (materiál s názvem UltraTouch) [44] a Applegate insulation (Cotton Armor) [45] nebo britský Recovery Insulation Ltd. (INNO-THERM) [46]. Z aplikací převládá výplňová tepelná izolace stěn v dřevostavbách, izolace podlah a šikmých střech, a to jak pro individuální, tak pro bytovou výstavbu. Například Bonded Logic, jeden z prvních producentů, udává pro své výrobky při objemové hmotnosti $19,2 \text{ kg.m}^{-3}$ součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0366 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

U nás je tento materiál zatím objektem výzkumu a jeho výroba neprobíhá, nicméně podle prvních výsledků zkoušek se ukazuje ve velmi dobrém světle. Zkušební vzorky byly zhotoveny z 85 % z odpadní bavlny ve formě trhaniny, získané ze starých džínů a dalších bavlněných výrobků, s příměsí 15 % pojivových bikomponentních vláken, teplovzdušným pojením klasickou technologií vodorovného vlákna (viz dále), břeclavskou firmou Canabest. Materiál díky malé tloušťce vlákna vykazoval velmi nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ (kolem $0,035 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, tedy nižší, než ostatní přírodní vlákna, ale také kamenná či skelná vlna, srovnatelné s pěnovým polystyrenem), a dále vynikající akustické vlastnosti (vážený činitel zvukové pohltivosti $\alpha_w = 0,9$ a dynamická tuhost $5 - 5,7 \text{ MPa.m}^{-1}$). Výzkumem se podrobněji zabývám ve své bakalářské práci. [47] Pro tyto své skvělé vlastnosti si materiál jistě zaslouží další výzkum a v budoucnu snad i praktické využití.



Obrázek 4 - Bavlník srstnatý [49]



Obrázek 3 - UltraTouch (izolační rohož z odpadní bavlny) [48]

2.2. Živočišná vlákna

Na rozdíl od přírodních vláken, složených zejména z celulózy, jsou vlákna živočišná tvořena na bázi bílkovin. Získáváme je buď ze srsti zvířat (vlna), nebo ze sekretu hmyzu (hedvábí) [50].

2.2.1. Ovčí vlna

Ovčí vlna je vlákno, získávané ze srsti ovce domácí. Je tvořeno převážně keratinem, tedy stejnou látkou, ze které se skládají lidské vlasy. Dalšími složkami jsou pigment a chemicky vázaná vlhkost. Z chemických prvků je 50 % zastoupen uhlík, s dalšími 40 % kyslík a dusík. Povrch vlákna je šupinovitý. [51] Tloušťka vlákna je silně ovlivněna druhem ovce, nejčastěji se pohybuje v rozmezí 25 – 45 μm , ale existují i výjimky. Délka vláken je dána délkou růstu srsti a druhem ovce, řádově se pohybuje v rozmezí 20 – 80 mm. Z ostatních druhů vlny se používá například vlna velbloudí, kašmír (tedy srst kozy kašmírské), mohér (srst kozy angorské), dále vlna z alpaky či angorských králíků.

Na světě žije asi 1,2 miliardy ovcí. Nejvíce z nich je chováno v Číně (170,8 milionu), v Austrálii (106 milionů) a na Novém Zélandu (70 milionů), v celé Evropské Unii je to asi 99 milionů. V ČR žije 209 052 ovcí (údaj z roku 2011) [52]. Základní dělení plemen ovcí je podle poskytovaného užitku na plemena masná, dojná, vlnářská a plemena s kombinovanou užitkovostí. Základními vlnářskými plemeny jsou Merino, Cheviot a Kříženecké (crossbred). U nás vznikla dvě plemena ovcí – ovce šumavská a ovce valašská. Obě patří mezi plemena s kombinovanou užitkovostí a obě jsou zařazena do genových zdrojů. [53]

Každá dospělá ovce, chovaná pro vlnu, ročně vyprodukuje 2,5 – 5 kg vlny (některá plemena až 18 kg), podle druhu, stáří a pohlaví a dožívá se 10 až 12 let. Vlna se získává ve formě rouna stříháním živých ovcí, kterým postupně dorůstá vlna nová. Získáváním ovčí vlny se tedy nesnižuje stav žádného přírodního zdroje. Stříhá se zpravidla jednou do roka, některá plemena lze stříhat i dvakrát ročně. Zkušený stříhač zvládne ostříhat přes 20 ovcí za hodinu, tedy zhruba 200 – 300 ovcí za den. Ostříháním získáme rouno surové, tzv. potní vlny. To je tvořeno souvislou vrstvou srsti, spojenou vlasovým tukem a potem. Podle umístění na těle ovce dělíme rouno do 7 kvalitativních kategorií. Nejvyšší kvalitu vlákna nalezneme na lopatkách a bocích, naproti tomu nejhorší kvalitu získáme za hlavou ovce a na nohách. Rouno obsahuje velké množství nečistot. Jsou to pot a močovina, ovčí tuk, prach, trus, a náhodné nečistoty, například rostlinné zbytky. Typická skladba ovčí vlny je 60 % vlákna, 5 % nečistot, 15 % vlhkosti, 10 % tuku a 10 % potu. Nečistoty se odstraňují opakovaným praním ve vodě o teplotě 40 °C s přidávkou 0,5 g pracího prášku a 1 g sody na 1 litr vody. Praním se separují nečistoty a lanolin. Lanolin tvoří ovčí tuk s obsahem voskového podílu. Skládá se z 65 % z vosku, 15 % parafinového oleje a 20 % vody. Má široké využití v kosmetice, textilním a kožedělném průmyslu a v lékařství. Typickými produkty jsou nejrůznější krémy či vosky, chránící proti vodě. [50]

Stejně jako len či konopí, i ovčí vlnu používá lidstvo k odívání od nepaměti. První zmínky pochází z oblasti přední Asie z doby před 11 000 lety. Odtud se rozšířilo ve starověku do Egypta a do Řecka, ve středověku pak dále do Evropy. Po velmi dlouhou dobu se vedle lnu a později bavlny jednalo o nejvýznamnější textilní surovinu. Potkal ji však stejný osud jako ostatní přírodní vláknité materiály – od poloviny 20. století ji počaly vytlačovat levnější umělá vlákna. I přes své některé vynikající vlastnosti (termoregulační schopnost, odvod potu, prodyšnost, hypoalergennost či antibakteriálnost) [54] od 80. let již zcela ztratila konkurenceschopnost a dnes se používá spíše okrajově pro kvalitnější svrchní oděvy, ložní či funkční prádlo. S tím logicky souvisí úbytek ovcí, pěstovaných pro vlnu a celosvětový přebytek surové vlny. Do velmi tíživé situace se tak dostávají domácí producenti, kteří musí investovat nemalé prostředky do ustájení a krmiva ovcí na zimní měsíce, na rozdíl od svých australských či novozélandských protějšků, kterým tamní podnebí umožňuje celoroční pastvu, což se samozřejmě také pozitivně projeví na kvalitě vlákna. Přesto i tato kvalitnější vlákna, která se dováží takřka do celého světa, mají dnes problémy s odbytem. [55]

Současný přebytek ovčí vlny otevírá takové možnosti jejího využití, které by ještě před několika lety byly z ekonomického hlediska zcela nereálné, například i využití jako stavební izolační materiál. Pro tento účel je ovčí vlna mimořádně vhodná zejména díky svým velmi dobrým sorpčním vlastnostem. Je totiž schopna ze vzduchu přijmout i přes 30 % vlhkosti, která je vsřebávána přímo vlákny a proto nezhoršuje izolační schopnosti materiálu, a poté ji v případě potřeby opět neškodně uvolnit. Tato přirozená regulace vlhkosti vytváří v interiéru příjemné a zdravé mikroklima. K dalším výhodným vlastnostem patří nízký součinitel tepelné vodivosti ($\lambda = 0,038 - 0,050 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) a trvalá pružnost. Ovčí vlnu lze

také využívat pro čištění ovzduší interiéru od některých škodlivin, neboť je schopna trvale pohlcovat například formaldehyd, organická ředidla, prach, pyly, cigaretový kouř či ozon. Po nasycení škodlivinami je však nutné ji vyměnit. Na výrobu 1 m² izolační rohože tloušťky 10 cm je zapotřebí vlny ze 2 ovcí. [56][57] Stejně jako v případě bavlny, i zde lze zpracovat ovčí vlnu méně jakostní, odpadní či recyklovanou. Některé zahraniční firmy již s tímto materiálem dosahují zajímavých výsledků. [58]

I u nás se již izolace z ovčí vlny začínají používat. Většinou se k nám však dováží (významným dovozcem je například rakouská firma Isolena [59]), nebo se dováží alespoň surovina. Zpracování naší vlny našimi firmami je zatím v počátcích, avšak je to rozhodně jeden z velmi progresivních směrů. Kvalita vlny našich ovcí sice nedosahuje kvality špičkových zahraničních vláken, pro tyto účely však bohatě postačuje. Naši producenti pro vlnu v současné době nemají využití, a proto jí velké množství putuje k likvidaci, navíc se velmi rychle zvyšuje také počet drobných chovatelů s několika málo zvířaty, potenciální materiálová základna je proto solidní. Případná státní podpora produkce by jednak pozitivně ovlivnila životní prostředí, především by však pozvedla zemědělskou produkci a zaměstnanost zejména v odedávna problematických horských a podhorských oblastech, kde se ovce přirozeně chovají po staletí. Toto by měla být hlavní idea využití přírodních materiálů v našem stavebnictví.

2.3. Další příklady využití přírodních vláken

Bez nadsázky lze konstatovat, že snahy o zpracování přírodních vláken dnes probíhají s větším či menším úspěchem a na různé technické úrovni po celém světě. Příspěvky na vědecké konference překvapivě nepřicházejí pouze ze zemí, kterým my říkáme „vyspělý západ“, stále intenzivnější výzkum naopak probíhá například v Asii, Střední a Jižní Americe či dokonce v Africe.

Zatímco například ve střední Evropě je typické na výrobu tepelně izolačních výrobků zpracovávat kulturně pěstované plodiny (viz konopí, len, atd.), v zemích s méně rozvinutým průmyslem se do popředí zájmu dostávají buďto odpady ze zemědělství, nebo i volně se vyskytující rostliny, jsou-li dostupné v dostatečném množství. Až budoucnost ukáže, nakolik budou tyto materiály schopné prosadit se na trhu. Na následujících řádcích budou stručně shrnuty některé výsledky zahraničních výzkumů.

Například v Thajsku vznikl projekt, využívající vláken orobince úzkolistého. Tato jednoletá vlhkomilná rostlina, lidově označovaná jako rákosí, roste i u nás na březích rybníků a jiných vodních ploch, rozhodně však ne v technicky významném množství. Naproti tomu v subtropických a tropických oblastech se jí daří velmi dobře a konkrétně v Thajsku pokrývá obrovské plochy nejen u rybníků a jezer, ale také rýžovišť a vodních toků, čímž významně poškozují ostatní zemědělské plodiny v okolí. Proto místní výzkumníci hledají možnosti

jejího využití. Zmiňovaný projekt zkoumal možnosti využití orobince pro tepelně izolační účely. Listy byly nejprve nasekány na kousky, dlouhé asi 10 cm, poté rozvlákněny v drtiči dřevní hmoty a po nástřiku MDI (methylen difenyl diisokyanát) pojivem za zvýšené teploty a tlaku vytvrzeny. Na vyrobených deskách s objemovou hmotností $200 - 400 \text{ kg.m}^{-3}$ bylo poté provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou měřidla tepelného toku. Naměřené hodnoty se pohybovaly v rozmezí $0,0438 - 0,0606 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, výsledky jsou tedy více než slibné. [60]

Další možností může být obilná či rýžová sláma. Tento materiál již není neznámý ani u nás. Tu a tam se objeví novostavba, využívající slaměných balíků, dokonce i některé firmy se věnují průmyslové výrobě slaměných stavebních materiálů (za všechny jmenujme například společnost EKOPANELY CZ s. r. o. [61]). V zahraničí je tomu jinak. Například v Číně řeší již delší dobu tým na univerzitě v Nanjingu problém využití slámy, které se v zemi ročně vyprodukuje asi 0,4 bilionu tun a jelikož pro velkou část z ní není smysluplné využití, je nutné ji spalovat s nepříliš příznivými dopady na životní prostředí. Zkušební desky byly zhotoveny z nasekané pšeničné slámy smísením s asi 2 % MDI a následným vytvrzením za zvýšené teploty a tlaku. Na tělesech s objemovou hmotností $150 - 250 \text{ kg.m}^{-3}$ byl metodou měřidla tepelného toku stanoven součinitel tepelné vodivosti v rozmezí $0,0438 - 0,0521 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. [62]

O několik let později na stejné univerzitě proběhl také výzkum využití bavlněných stonků. Jak již bylo řečeno, vlákna se nachází v osemení bavlněných plodů, většina rostliny proto nemá další využití a stává se odpadem, který se opět zpravidla spaluje či jinak likviduje. Vlákna, obsažená v bavlněném stonku přitom dosahují vcelku výhodných rozměrů (délka $0,75 - 0,91 \text{ mm}$, průměr $16,4 - 22,8 \text{ }\mu\text{m}$) ze kterých lze usuzovat na zajímavé tepelně izolační vlastnosti. Stonky pro výzkum byly zbaveny větviček, byly od nich odděleny bavlněné slupky a ostatní cizí částice a poté byly naštipány. Vlákna byla získána po namočení do vody a následném působení páry o tlaku 1,2 bar. Po vysušení byla vlákna spojena tlakem bez použití syntetických pojiv. Technologie výroby je podobná například naší výrobě měkkých dřevovláknitých desek, v porovnání s ní však spotřebuje asi o 15 % méně tepelné energie. Vyrobené desky dosáhly při objemové hmotnosti $150 - 450 \text{ kg.m}^{-3}$ součinitele tepelné vodivosti $0,0585 - 0,0815 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. [63]

Dalším Thajským projektem byl vývoj tepelně izolačního materiálu ze směsi nadrcené kůry durianu (rod tropických stromů) a kokosových vláken. Jednotlivé složky byly v různém poměru smíseny, opatřeny nástřikem z močovinoformaldehydové pryskyřice a parafinového vosku a po vytvarování vytvrzeny za zvýšeného tlaku a teploty. Výsledkem zkoumání byl součinitel tepelné vodivosti $0,0748 - 0,1342 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ při dosažené objemové hmotnosti $311 - 856 \text{ kg.m}^{-3}$. Tepelně izolační schopnosti materiálu nejsou tak výhodné jako u předcházejících výrobků, výrazně lepších hodnot však dosahují mechanické vlastnosti. Materiál lze srovnávat například s našimi dřevovláknitými deskami střední hustoty. [64]

Japonští vědci obrátili svoji pozornost na využití kenafu. Tato jedno- až dvouletá rostlina, podobná jutě, dorůstá výšky až 3,5 metru a je hojně rozšířena zejména v Asii. Z lýka se získávají hrubší vlákna, používaná například pro výrobu koberec, technických a netkaných textilií. Pro výrobu izolačních desek bylo použito zdřevnatělého jádra, které v současnosti nemá jiné smysluplné využití. Po nasekání a vytvarování proběhla hydrotermická úprava a následné lisování mokřím způsobem bez použití syntetických pojiv. S objemovou hmotností $100 - 250 \text{ kg.m}^{-3}$, ji odpovídajícím součinitelem tepelné vodivosti $0,040 - 0,065 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a nízkými výrobními náklady se jedná o ideální stavební materiál pro rychle se rozvíjející asijské země. [65]

Výzkumníci na ostrově Trinidad v Karibiku zkoumali využití vláken z kokosu a cukrové třtiny. Kokos je plodem kokosové palmy. Ochranou schránku plodiny tvoří pevná skořápka, pokryta vlákny. Po rozloupnutí kokosu a vysušení na slunci se vlákna samovolně oddělují. Cukrová třtina je mohutná tráva z čeledi lipnicovitých, pěstovaná ve velkém množství na plantážích zejména v tropických oblastech. Stéblo je vyplněno měkkou dřevinou, která obsahuje až 20 % cukru, proto patří k základním cukrovarnickým surovinám. Vlákna se získávají jako odpadní surovina z vylisovaných zbytků stébel. Tepelná vodivost byla stanovena stacionární metodou desky na volně ložených vláknech, umístěných v polystyrenovém rámečku, stlačovaných na různou objemovou hmotnost. Výslednými hodnotami jsou tepelná vodivost $0,04800 - 0,05624 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ při objemové hmotnosti $40 - 90 \text{ kg.m}^{-3}$ (minimální tepelná vodivost dosažena při objemové hmotnosti 80 kg.m^{-3}) pro kokosová vlákna a $0,04610 - 0,04977 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ při objemové hmotnosti $70 - 120 \text{ kg.m}^{-3}$ (optimální objemová hmotnost 100 kg.m^{-3}) pro vlákna z cukrové třtiny. [66]

Veškeré uvedené výsledky zahraničních výzkumů jsou pro větší přehlednost shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 1 - Shrnutí zahraničních výsledků zpracování přírodních vláken

Materiál	Objemová hmotnost [kg.m⁻³]	Souč. tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹]	Zdroj
Orobinec úzkolistý	200 - 400	0,0438 - 0,0606	Luamkanchanaphan a kol. [60]
Pšeničná sláma	150 - 250	0,0481 - 0,0521	Zhou a kol. [62]
Bavlněné stonky	150 - 450	0,0585 - 0,0815	Zhou a kol. [63]
Směs durianu a kokosu	311 - 856	0,0748 - 0,1342	Khedari a kol. [64]
Kenaf	100 - 250	0,040 - 0,065	Xu a kol. [65]
Kokosové vlákno	40 - 90	0,04800 - 0,05624	Manohar a kol. [66]
Cukrová třtina	70 - 120	0,04610 - 0,04977	Manohar a kol. [66]

3. Technologie pojení

Pro použití ve formě izolačních desek či rohoží se musí přírodní vlákna nejprve vhodným způsobem spojit. Jelikož se jedná zpravidla o vlákna textilní, lze teoreticky uplatnit všechny technologie netkaného spojování, používané v textilním průmyslu. V praxi však použití některých z těchto technologií není výhodné kvůli vysoké finanční, technologické, energetické či ekologické náročnosti, případně nedostatečné univerzálnosti či účinnosti. Z těchto důvodů není běžně využívána většina způsobů pojení mechanického (zpevňování paprsky vody, proplétání), takřka všechny metody chemické a také termické metody pojení kalandrem, ultrazvukem či IR zářením. Naopak velmi výhodným se ukazuje termické pojení teplovzdušné (s vodorovným i kolmým kladením) a pro některé speciální aplikace lze využít také mechanické pojení vpichováním. Vhodnou alternativou může být také lisování hydrotermicky upravených vláken.

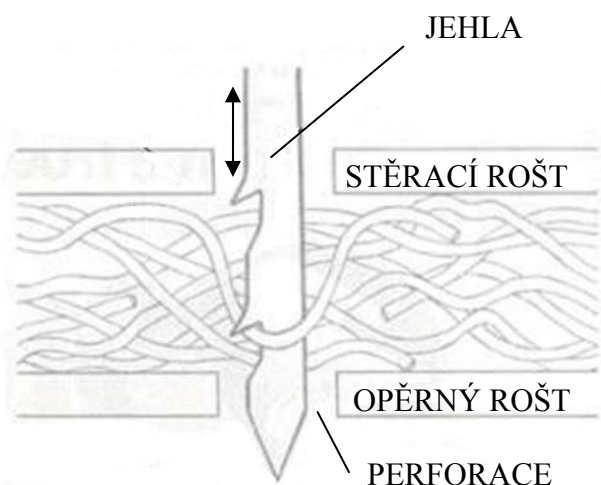
3.1. Vpichování

Vpichování patří k nejstarším a dosud nejpoužívanějším způsobům netkaného spojování vláken. Jedná se o metodu mechanickou, ke spojení tedy dochází působením mechanické energie na vláknennou surovinu. Podstatou vpichování je provazování vláknenné vrstvy svazky vláken, vzniklými přeorientací části vláken účinkem průniku jehel s ostny. V průběhu vpichování dochází také k podstatné redukci tloušťky vláknenné vrstvy, k výrazné přeorientaci všech vláken a ke změnám délky i šířky útvaru. Vláknenná vrstva je přiváděna vstupním zařízením mezi dva perforované rošty. Otvory v rostech pronikají periodicky vpichovací jehly umístěné v jehelné desce. Ostny jehel zachytávají skupiny vláken vrstvy, přeorientovávají je kolmo k vrstvě a protahují vrstvou. Ta je posunována odtahovými válci po spodním roštu, tzv. opěrném. Při zpětném pohybu soustav jehel zabezpečí vrchní, tzv. stěrací rošt vysunutí jehel z vláknenné vrstvy.

Hlavním parametrem, ovlivňujícím míru zpevnění, je počet jehel na jednotku plochy, dalšími parametry jsou hloubka vpichu, typ a způsob rozmístění jehel a samozřejmě vlastnosti zpracovaného vlákna. Obecně lze říci, společně se stupněm zpevnění stoupá objemová hmotnost a pevnost výrobku a zvětšují se jeho objemové změny, naopak se zmenšuje tloušťka a propustnost produktu. Při extrémní míře zpevnění se může naopak pevnost snižovat z důvodu značného mechanického poškození vláken ostny vpichovacích jehel. [67]

Výhodou vpichovaných textilií jsou dobré mechanické vlastnosti. Pro využití jako stavební izolační materiály je však značně limitující malá tloušťka. Využívají se proto zejména jako separační vrstvy, geotextilie, či akusticky měkké podložky pod podlahovou krytinu. Mimo stavebnictví je však jejich využití velmi široké, například jako geotextilie, papírenské odvodňovací plstěnce, podklady pro výrobu syntetických usní, filtry, dekorační

materiály, oděvní a obuvnické vložkové materiály, a podobně. U nás je technologie provozována například jihlavskou firmou Jilana a.s. [68]



Obrázek 6 - Schéma zpevňování vpichováním [69]

Obrázek 5 - Vpichovaná textilie [70]

3.2. Termické pojení teplovzdušné

Termické metody využívají pojivých schopností roztavených pevných nízkotavitelných polymerů či kopolymerů. Ty se buďto na vlákennou vrstvu nanášejí ve formě prášku či pasty, nebo se vlákenné vrstvy ukládají společně plošným pojivým útvarem (mřížka, fólie) případně se mísí se speciálními pojivými bikomponentními vlákny. Následuje tavení pojiva za zvýšené teploty a vytvrzení spojeného výrobku jeho ochlazením. S vhodně zvoleným pojivem lze takto spojovat takřka jakýkoliv vláknitý materiál.

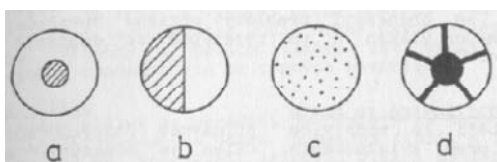
Pro účely výroby stavebních izolačních materiálů se ukazuje jako velmi výhodná technologie termického pojení teplovzdušného, využívající jako pojiva bikomponentních vláken. Jejím principem je průchod vlákenné vrstvy horkovzdušnou pojící komorou s cirkulujícím horkým vzduchem, jehož teplota je udržována vhodným ohřevným a regulačním systémem na hodnotě postačující k roztavení pojiva (obvykle cca 140 °C podle druhu pojiva). Teplo je proudícím vzduchem transportováno k jednotlivým vláknům velice rychle, ohřev je proto po výrobu objemnějších produktů mnohem efektivnější v porovnání s technologiemi, využívajícími například kontaktní ohřev. Tím je dána i značná šíře sortimentu, zahrnující většinu typů vyráběných netkaných materiálů v širokém rozpětí tloušťek a objemových hmotností, i druhů zpracovávaných materiálů. Nutnou podmínkou je pouze propustnost konkrétní vlákenné vrstvy pro vzduch. [67]

Dále rozlišujeme technologie s vodorovným a kolmým kladením vlákna. Obě technologie mají svá specifika a s výhodou se využívají pro odlišné aplikace. Obě však mají již nyní své pevné místo nejen při výrobě stavebních izolačních materiálů.

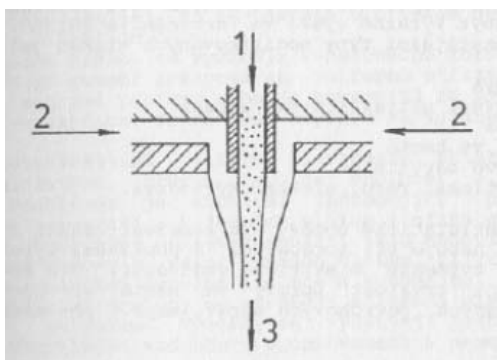
3.2.1. Bikomponentní vlákna

Bikomponentní vlákna jsou nutnou součástí teplovzdušně pojených vláknitých materiálů. Jedná se o speciální syntetická vlákna, vyráběna nejčastěji zvlákňováním dvou různých polymerů pomocí speciální zvlákňovací hubice (obr. 8). Základní průřezy vláken jsou zobrazeny na obr. 7. Nejčastěji se používají vlákna jádro – plášť (obr. 7a) a bok po boku (obr. 7b). Sestávají obvykle z výše a níže tající polymerní složky. Jako výše tající složka se používá zpravidla polyester, jako níže tající složka pak kopolyester nebo levnější polypropylen. V průběhu pojení níže tající složka působí jako pojidlo a výše tající složka zachovává strukturu a objemnost výrobku. Bodové adhezni spoje se vytváří v místech křížení vláken pojících a pojených, větší část vláken pak tvoří poměrně pohyblivé úseky mezi spoji. To znamená, že výrobky mají dobrou ohebnost, malý rozměr pojících míst však zvyšuje nároky na vzájemnou adhezi a tedy i na pojící vlákna obecně. [67]

Množství přidaných pojivých vláken závisí na požadavcích na mechanické vlastnosti a odolnost výrobku, pro účely výroby stavebních izolačních hmot postačí přídavek do 15 %.



Obrázek 7 - Typické tvary příčných řezů bikomponentních vláken [67]



Obrázek 8 - Průřez zvlákňovací hubicí pro výrobu vláken typu jádro – plášť [67]

1, 2 – přívod jednoho a druhého polymeru

3 – vznikající bikomponentní vlákno

3.2.2. Technologie s vodorovným kladením vlákna

Prvním krokem výrobní technologie je otírka balíků vlákenné suroviny, přicházející nejčastěji z tírny v případě rostlinných vláken či česárny u ovčí vlny. Následují dávkování, rozvolňování a mísení. Právě kvalitní ojednocení a homogenizace směsi základních a bikomponentních vláken má pro kvalitu vyráběného produktu klíčový význam. Zejména u bikomponentních vláken je důležité zabránit výskytu jejich shluků, v opačném případě by totiž byl významně snížen stupeň využití pojiva, s čímž souvisí zhoršení mechanických vlastností výrobků. Pokud výrobní technologie vyžaduje ošetření vláken nějakými chemickými prostředky (retardéry hoření, fungicidy, insekticidy, apod.), aplikují se obvykle právě v tomto okamžiku. Následuje kladení vlákenné vrstvy, obvykle pneumatically. Při tom je vlákenná surovina rozvolněna rychle se otáčejícím šhubacím válcem, z něhož jsou jednotlivá vlákna snímána kombinovaným účinkem odstředivé síly a přiváděného proudu vzduchu. Tím jsou dále unášena a ukládána na pohybujícím se síťovém dopravníku. Vlákna ve vznikající vlákenné vrstvě jsou orientována v podstatě nahodile, což značně omezuje anizotropii a rozdíly ve vlastnostech v příčném a podélném směru. Po již popsaném teplovzdušném pojení a ochlazení následuje dále řezání a balení. [67]

Velkou výhodou technologie teplovzdušného pojení s vodorovným kladením vlákna je kromě zmiňované izotropie vlastností zejména široký rozsah tloušťek (cca do 200 mm) a objemových hmotností ($5 - 200 \text{ kg.m}^{-3}$) produkovaných materiálů, celková univerzálnost procesu a relativně vysoká produktivita výroby. Typickým produktem jsou izolační desky či rohože s různou tuhostí (závislou na druhu zpracovávaných vláken a objemové hmotnosti) s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi, dobře vyhovující pro použití do šikmých střech jako tepelný izolant mezi či pod krokve, výplňový izolant do rámců dřevostaveb či kročejový akustický izolant do konstrukcí plovoucích podlah. Široké využití mají výrobky samozřejmě také mimo stavebnictví. U nás tuto technologii provozuje několik společností, z důvodu zaměření praktické části práce jmenujme za všechny břeclavskou firmu Canabest, s.r.o. (toho času v konkurzu).



*Obrázek 9 - Izolační deska z technického konopí, zhotovená
technologií vodorovného kladení [71]*

3.2.3. Technologie s kolmým kladením vlákna (STRUTO)

Zajímavou alternativu k technologiím s vodorovným kladením tvoří technologie STRUTO [72]. Počátek technologického procesu, zahrnující otvírku balíků, dávkování, rozvolňování, úpravu a mísení vláken základních a bikomponentních je totožný s předcházející technologií. Kolmé kladení je zajišťováno vibračním kolmým kladečem či rotačním kolmým kladečem. V obou případech následuje zpevnění v teplovzdušné pojící komoře a vytvrzení ochlazením. Pro zlepšení tuhosti a omezení deformací materiálu je někdy na jednu či obě jeho strany nakaširována ochranná geotextilie. [67]

Největší výhodou takto vyrobené textilie je výrazně vyšší odolnost proti stlačení a vysoký stupeň zotavitelnosti po stlačení. Tato skutečnost je způsobena tím, že vlákna jsou v průběhu stlačování namáhána spíše na vzpěr než na ohyb, na rozdíl od výrobků s vlákny uloženými převážně horizontálně. Další výhodou je menší spotřeba vláken v porovnání s textiliemi s vodorovným kladením. Určitým omezením však je možnost výroby textilií o tloušťce 15 – 40 mm, větších tloušťek je možné dosáhnout pouze slepením více textilií. Kolmá orientace vlákna také způsobuje mírné zhoršení tepelně izolačních schopností. Zde probíhá transport tepla poněkud odlišným způsobem oproti textiliím s vodorovným kladením, proto velmi záleží na součiniteli tepelné vodivosti základních vláken.

Výrobky se nejčastěji vyskytují ve formě rolí. Díky jejich vyšší ohebnosti a tvárnosti se s výhodou používají pro tepelnou izolaci potrubí, zásobníků, či jiných těles s rotačním či jinak nepravidelným tvarem. Mimo stavebnictví je typické použití pro výrobu matrací, spacích pytlů, v čalounictví jako náhrada pěn, v automobilovém průmyslu, ale také pro filtraci či výrobu geotextilií. U nás je technologie provozována opět firmou Jilana a.s. [68]



Obrázek 10 - Polyesterová rohož, zhotovená technologií STRUTO [72]

3.3. Lisování hydrotermicky upravených vláken

Pro zpracování některých druhů rostlinných materiálů s větším obsahem ligninu, hrubších vláken, eventuálně pazdeří či jiných zdřevnatělých částí, lze využít také tuto metodu, určenou původně pro výrobu dřevovláknitých desek. Hrubší zdřevnatělé části se nejprve nadrtí na štěpku s optimální velikostí (20 – 30) x (40 – 50) x (3 – 5) mm. Ta je dále tříděna na

plošných vibračních síťových třídičích, kde je odstraněna hrubá i příliš jemná frakce a pomocí několikastupňových magnetických separátorů jsou odstraněny kovové příměsi. Následuje propírání v pračkách, kde se odstraní drobné nečistoty, zejména písek. Dalším krokem je hydrotermická úprava – rozvlákňování. Štěpka je nejprve v tlakovém předeříváči změkčena horkou párou, odtud je vtlačována do rozvlákňovací mlecí komory, ve které dojde mezi pevným a rotujícím rýhovaným diskem k rozdělení štěpky na vlákna za vzniku mokré vodní suspenze. K rozvlákňování se v Evropě nejčastěji používá zařízení s názvem Defibrator. V něm je při rozvlákňování štěpka zároveň napařována, čímž dojde k částečnému uvolnění ligninu, který při lisování působí jako pojivo. [73]

Vlastní pojení může probíhat dvěma různými způsoby. Při mokrému způsobu se na výrobní linku vrství vlákenná suspenze přímo z Defibratoru. Pojivem je uvolněný lignin a proto není třeba přidávat syntetická lepidla, zpravidla se proto přidávají pouze hydrofobizační přísady (obvykle parafín). Při výrobě suchým způsobem je na suché vlákno naneseno lepidlo a přídavné látky. Nejběžnější typy lepidel byly dříve na bázi UF (močovinoformaldehydu), pro jeho nepříznivé dopady na lidské zdraví se dnes přechází na MDI či jiné šetrnější materiály. V obou případech následuje lisování mírným přtlakem (řádově do 10 MPa), u suchého způsobu za zvýšené teploty (řádově do 140 °C), nutné pro zesíťování polymerního pojiva. Posledním krokem jsou obligátní řezání a balení. Vlastnosti a využití produkovaných desek jsou obdobné jako u technologie teplovzdušné s vodorovným kladením.

Výrobky zhotovené touto technologií mají u nás relativně dlouhou tradici. Již v roce 1930 byl při klášteře v Broumově založen provoz, vyrábějící měkké tepelně izolační desky, které se začaly prodávat pod obchodním jménem HOBRA. V roce 1952 byla výroba přenesena do nově založeného podniku Smrečina v Banské Bystrici, kde ještě donedávna probíhala (obchodní název Hofatex). Firma bohužel byla v létě roku 2013 uzavřena, čímž přišla naše země o nejbližšího dovozce. V zahraničí je tato technologie nicméně velmi oblíbená a proto byla využita také většinou dříve zmiňovaných zahraničních výzkumných projektů.



Obrázek 11 - Měkká dřevovláknitá deska [73]

4. Vlastnosti izolačních materiálů z přírodních vláken

4.1. Tepelně izolační vlastnosti

Jak dokazuje experimentální část předkládané diplomové práce, přírodní vláknité materiály dosahují velmi dobrých tepelně izolačních vlastností. V závislosti na vlhkosti a objemové hmotnosti za obvyklých podmínek vykazují izolace z rostlinných vláken součinitel tepelné vodivosti λ v rozmezí $0,04 - 0,055 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, izolace z ovčí vlny pak $0,035 - 0,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, tedy hodnot plně srovnatelných s průmyslově vyráběnými izolačními materiály. Součinitel tepelné vodivosti je velmi úzce spjat s objemovou hmotností materiálu. Z velkého množství dalších ovlivňujících faktorů mají největší vliv obsah vlhkosti a teplota.

4.1.1. Vliv vlhkosti

Významný vliv na tepelně izolační schopnosti přírodních vláknitých materiálů má vlhkost. Vzduch, který má velmi dobré tepelně izolační vlastnosti ($\lambda \approx 0,025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), je totiž při stoupající vlhkosti v pórovité struktuře materiálu postupně nahrazován vodou, která teplo vede podstatně lépe ($\lambda \approx 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) a snižuje tak schopnost materiálu tepelně izolovat. Závislost obsahu vlhkosti na součiniteli tepelné vodivosti λ není lineární, zhoršování je nejprve mírné, od určité kritické vlhkosti nabývá mnohem výraznějšího gradientu. U vláken rostlinných se jedná o obsah cca $5 - 8 \%$ hmotnostních, [74] ovčí vlna je schopna bez významného zhoršení izolačních vlastností pojmout až 30% hmotnostních vlhkosti (některé zdroje udávají až 65%). [57]

4.1.2. Měrná tepelná kapacita

Jak již bylo řečeno, měrná tepelná kapacita je významnou charakteristikou při hodnocení tepelné jímavosti stavebních konstrukcí, zejména v případě konstrukcí s nízkou objemovou hmotností a nízkou tepelnou vodivostí. Nedostatečná schopnost akumulace tepla může být problémem především u staveb s nedostatkem hmotných konstrukcí, tedy rámových konstrukcí dřevostaveb, ale často také v půdních vestavbách zděných objektů, obzvláště pokud jsou zároveň opatřeny lehkými (například sádrokartonovými) příčkami. Tyto objekty se v zimním období rychle vytopí, ale velmi rychle také vychládají (což působí problém zejména při přerušovaném způsobu vytápění), v letním období mají naopak sklon k přehřívání. Jedním ze způsobů, jak tento nedostatek omezit, je tedy využití materiálů s vysokou měrnou tepelnou kapacitou. Nejvyšších hodnot dosahuje voda ($c = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ze stavebních materiálů vykazují běžně využívané hmoty na bázi silikátů měrnou tepelnou kapacitu pouze v rozsahu cca $800 - 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. [75]

Organické materiály, mezi něž samozřejmě patří i přírodní vláknité materiály, v tomto ohledu dosahují velmi výhodných vlastností. Například měrná tepelná kapacita technického konopí $1600 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ($1270 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ u ovčí vlny) je bezmála dvojnásobná oproti běžně používaným izolačním materiálům na bázi minerálních vláken ($c = 840 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$). V praxi to znamená, že přírodní vláknité materiály jsou schopny dvakrát vyšší tepelné akumulace, proto jsou vhodné jako výplňový tepelný izolant do lehkých rámových konstrukcí.

4.2. Reakce na oheň

Veškerá rostlinná vlákna jsou tvořena převážně celulórou, jejíž rozklad nastává již při působení teplot kolem 350°C . Pokud tedy neošetřená rostlinná vlákna klasifikujeme v duchu ČSN EN 13 501-1, musí se nacházet v třídě F – hořlavé. Proto je u těchto vláken obvyklá úprava tzv. retardéry hoření. Ty účinkují v různých fázích vzniku požáru a jejich úkolem je prodloužit čas vznícení, snížit množství kouře, toxických plynů či omezit tepelný výkon. Obvyklými látkami, které lze využít jako retardéry hoření, jsou sloučeniny bóru, dusíku, fosforu či křemíku. Do nedávné doby bylo běžné využití boraxu (tetraboritan sodný) či kyseliny borité. Tyto látky však nejsou příliš šetrné k životnímu prostředí, proto jsou stále častěji nahrazovány roztoky sody (uhličitan sodný), použít lze také vodní sklo. [76]

Retardéry hoření ve své podstatě snižují hořlavost materiálu, nikdy však nezaručí jeho absolutní nehořlavost. Ošetřená vlákna obvykle vykazují třídu reakce na oheň E, někdy i D. Tato skutečnost sice v některých případech omezuje použití přírodních vláknitých materiálů (například do zateplovacích systémů provětrávaných fasád či na kontaktní zateplení fasád objektů vyšších než 22,5 m – zde je třeba použít minerální vlnu, která jako jediný běžně používaný tepelný izolant může být zařazena do třídy reakce na oheň A1), pokud je však izolant chráněn další (nehořlavou) vrstvou konstrukce či protipožárním obkladem, jeho použití není nijak limitováno (ostatně velmi rozšířený pěnový polystyren bývá zařazován taktéž do třídy E).

Na rozdíl od rostlinných vláken ovčí vlna odolává požáru velmi dobře, a to i bez dodatečné ochrany. Má vysokou zápalnou teplotu (kolem 570°C) a přirozeně samozhášivou schopnost. Při hoření neodkapává, uvolňuje minimum kouře a žádné toxické zplodiny. Zařazena je do třídy reakce na oheň B.

4.3. Citlivost k vlhkosti

Velkou výhodou a zároveň velkou nevýhodou přírodních vláknitých materiálů je jejich citlivost k vlhkosti. Pozitivní vliv tohoto jevu se projevuje ve schopnosti vlhkostní redistribuce. V principu je materiál do určité míry schopen pohlcovat přebytečnou vlhkost z interiérového vzduchu a v okamžiku jejího nedostatku ji opět neškodně a beze ztráty tepelně

izolačních schopností uvolnit zpět. To přispívá k stabilnímu a příjemnému mikroklimatu, pozitivně působícímu na lidské zdraví a psychiku. Tato vlastnost je velmi důležitá i pro difúzně otevřené skladby obvodových plášťů budov bez parotěsné vrstvy. Tyto skladby umožňují volný difuzní tok směrem z interiéru do exteriéru. Nutnou podmínkou je volba takových materiálů, jejichž faktor difuzního odporu μ směrem k exteriéru klesá. Právě přírodní vláknité materiály se díky μ blízkému k jedné pro tyto účely výborně hodí. Navíc jsou díky redistribuci vlhkosti schopny ji odvádět celým objemem bez vzniku lokálního zavodnění.

Citlivost k vlhkosti naopak představuje problém v případě, kdy je tepelný izolant vystaven nadměrné vlhkosti. Jejím účinkem se jednak rapidně zhoršují tepelně izolační schopnosti materiálu, při delším působení navíc u nedostatečně ošetřených vláken vznikají dobré podmínky pro růst plísní a celkovou degradaci materiálu. Základními dvěma materiálovými charakteristikami jsou zde rovnovážná sorpční vlhkost (mající vliv zejména při aplikaci materiálu v prostorech s vysokou relativní vlhkostí vzduchu) a krátkodobá nasákavost (vyjadřující například lokální vniknutí srážkové vody při aplikaci ve fasádních zateplovacích systémech). Zatímco krátkodobou nasákavost materiálu lze omezit hydrofobizačními úpravami (v úvahu připadá acetylace, ošetření peroxidy, silany či moderní sol-gel metoda), rovnovážnou sorpční vlhkost lze ovlivnit jen velmi obtížně. [76]

4.4. Mechanické vlastnosti

Jak již bylo zmíněno, nejvýznamnějšími mechanickými vlastnostmi u izolačních materiálů jsou napětí v tlaku při 10 % deformaci pro aplikaci do podlah a napětí v tahu kolmo k rovině desky pro kontaktní zateplovací systémy. Zatímco ovčí vlna, jejíž vlákna jsou velmi tenká, pružná a tvárná a izolační rohože zpravidla dosahují také nižších objemových hmotností, nedosahuje příliš výhodných mechanických vlastností a je proto vhodná zejména jako výplňový tepelný izolant, desky z rostlinných vláken, zejména technického konopí, obzvláště pak při vyšších objemových hmotnostech a vyšších podílech pazdeří, mají často dokonce lepší mechanické vlastnosti, než konkurenční materiály z vláken minerálních. Použití do konstrukcí plovoucích podlah bývá bezproblémové, pro více zatížené kontaktní zateplovací systémy (například opatřené obkladem) však nemusí být pevnost v tahu kolmo k rovině desky u desek s vodorovným kladením vlákna dostatečná. Zde lze s výhodou použít rohoží, zhotovených technologií kolmého kladení (STRUTO), jejichž parametry jsou v tomto ohledu mnohem lepší. Problémem však může být jejich omezená tloušťka.

4.5. Akustické vlastnosti

Základními akustickými vlastnostmi stavebních materiálů jsou činitel zvukové pohltivosti a dynamická tuhost. Činitel zvukové pohltivosti zásadně ovlivňuje vzduchovou

neprůzvučnost stavebních konstrukcí. Nabývá hodnot 0 – 1, přičemž hodnota 1 značí totální útlum. Proto by materiály, používané do akusticky dělicích stavebních konstrukcí, měly dosahovat hodnot blízkých 1. Naopak dynamická tuhost je klíčová pro hodnocení neprůzvučnosti kročejové. Udává schopnost konstrukce tlumit dynamické kmity, vyvolané chůzí či nárazy na podlahovou konstrukci. Proto bude mít velký význam zejména pro výběr materiálů do skladby plovoucích podlah. Měla by nabývat nízkých hodnot.

Předchozí výzkum na ústavu THD fakulty stavební VUT v Brně prokázal, že přírodní vláknité materiály dosahují velmi dobrých akustických vlastností, mnohdy výhodnějších, než materiály ze syntetických vláken. Například na vzorcích izolací z technického konopí (směs vláken a pazdeří s vodorovným kladením, pojená bikomponentními vlákny) byl stanoven velmi vysoký činitel zvukové pohltivosti v rozmezí 0,9 – 0,95 a naopak velmi nízká dynamická tuhost v rozmezí 3,3 – 12,47 MPa.m⁻¹ v závislosti na tloušťce materiálu, jedná se tedy o materiál dynamicky měkký. [77]

4.6. Odolnost proti škůdcům

Potenciálním rizikem zejména pro rostlinná vlákna mohou být škůdci, především hlodavci. Samotná vlákna jsou pro ně sice těžko stravitelná, přesto se však při výrobě chemicky ošetřují, aby bylo riziko sníženo na minimum. K tomuto účelu dobře poslouží látky, používané zároveň jako retardéry hoření, tedy borax, kyselina boritá či soda. Dalším účinkem těchto látek také obvykle bývá zvýšení odolnosti proti vzniku a růstu plísní.

Na rozdíl od vláken rostlinných, ovčí vlna (podobně jako například lidské vlasy) je pro hlodavce zcela nestravitelná, nevytváří podmínky pro výskyt mravenců a ostatního hmyzu, ani růst plísní a nemusí se proto proti těmto vlivům chránit. Škůdci, proti kterým je třeba dodatečné ochrany, jsou však moli. Dříve používané prostředky na bázi derivátů močoviny však mohou uvolňovat určité množství amoniaku, proto se dnes využívají převážně anorganické soli (na bázi titanu a fluoru).

4.7. Environmentální vlastnosti

Izolační materiály z přírodních vláken pochází z plně obnovitelných surovin, vyznačují se nízkou energetickou náročností, zápornou bilancí CO₂ a dalšími environmentálně příznivými vlastnostmi. Při práci nedráždí kůži ani sliznice a proto není třeba ochranných pomůcek. Neškodí lidskému zdraví a rozdíl od průmyslově vyráběných hmot pomáhají vytvářet vhodné a příjemné mikroklima i pro alergiky a osoby s onemocněním dýchacího ústrojí.

Důležitým a bohužel často opomíjeným aspektem je likvidace materiálu po ukončení jeho životnosti. Zpětná recyklace průmyslově vyráběných vláknitých materiálů je sice

teoreticky možná, v praxi je však komplikovaná a energeticky náročná, proto se tyto materiály po demontáži z konstrukce ve většině případů skládají. Velmi podobná situace panuje u penového polystyrenu. Existují sice technologie jeho depolymerace a následné opětovné polymerace, nelze však použít materiál znečištěný jinými látkami (například zbytky stěrkových hmot na demontovaném kontaktním zateplovacím systému), což opět bývá v praxi problém. V přírodě je materiál navíc prakticky nerozložitelný. Naproti tomu přírodní vláknité materiály lze po ukončení životnosti zcela bez problémů (technických i environmentálních) spalovat, pokud je pro ošetření vláken proti požáru či škůdcům použito k přírodě šetrných látek, lze je i kompostovat.

5. Tepelně vlhkostní transport vláknitými materiály

Teplo se může ve stavebních materiálech šířit obecně třemi způsoby: vedením, prouděním či sáláním. Jeho nutnou podmínkou je existence tepelného gradientu mezi dvěma oddělovanými prostory. Rozhodující vliv má za normálních podmínek **vedení**, které je hlavním způsobem šíření v pevných látkách. Částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie, prostřednictvím vzájemných srážek, částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. **Proudění** je dominantním způsobem šíření tepla v kapalinách a plynech. Vlivem lokálního ohřevu dochází k vzájemnému předávání tepelné energie mezi molekulami látky. Následkem přemísťování hmoty nastává vyrovnávání teploty. Ve stavebnictví nabývá významu zejména v látkách s vyšší pórovitostí (potažmo průvzdušností). **Sálání** je přenos tepelné energie ve formě elektromagnetického záření, které na rozdíl od předcházejících způsobů vykazují veškerá tělesa s teplotou vyšší než 0 K tím více, čím vyšší je jejich teplota, velikost povrchu a čím se jejich barva více blíží absolutně černému tělesu, a to i ve vakuu. U stavebních materiálů může být zejména při vyšších teplotách jeho vliv také významný. [78]

Jednodimenzionální stacionární šíření tepla vedením v obecném stavebním materiálu vyjadřuje **1. Fourierův zákon**:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (3)$$

kde: λ – je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

∇T – je teplotní gradient [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$]

q – je hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Jak patrně, součinitel tepelné vodivosti λ je zde nejdůležitějším materiálovým parametrem, vyjadřujícím jeho schopnost vést teplo. Pro podrobnější studium šíření tepla ve vláknitých materiálech však s tímto vztahem nevystačíme. Díky velmi malému podílu pevné

fáze v celkovém objemu materiálu jeho tepelně izolační schopnosti významně ovlivňuje intersticiální tekutina (za obvyklých podmínek vzduch), přesnější je proto hodnocení pomocí následujícího vyjádření:

$$\lambda = \alpha \times \lambda_f + (1 - \alpha) \times \lambda_g \quad (4)$$

kde: λ – je součinitel tepelné vodivosti vláknitého materiálu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

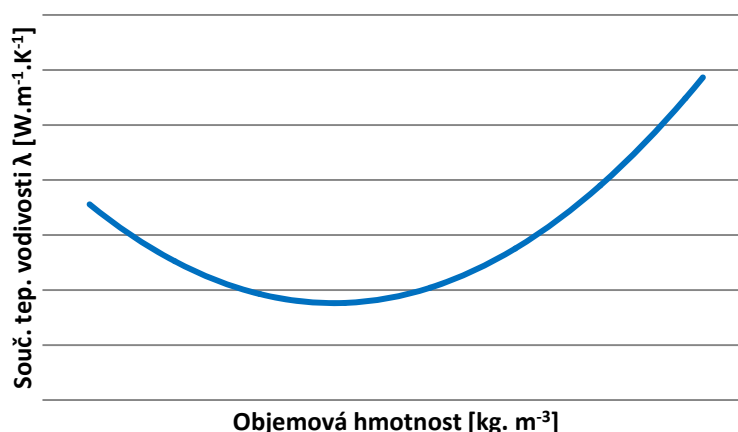
α – objemový podíl pevné fáze

λ_f – součinitel tepelné vodivosti pevné fáze

λ_g – součinitel tepelné vodivosti intersticiální tekutiny

Hodnota součinitele tepelné vodivosti vláknitých materiálů je ovlivňována celou řadou materiálových charakteristik (objemovou hmotností a průvzdušností materiálu, tloušťkou, délkou a orientací vláken, jejich mikrostrukturou, apod.) a také podmínkami okolního prostředí (zejména teplotou a vlhkostí). [79]

Vzhledem k tomu, že λ_f je obvykle řádově větší než λ_g , Výhodnější tepelně izolační schopnosti dosahují materiály s menším podílem pevné fáze, tedy s nižší objemovou hmotností. Při velmi nízkých objemových hmotnostech však jsou mezery mezi vlákny natolik velké, že v nich dochází navíc k přenosu tepla prouděním a také průvzdušnost materiálu stoupá do té míry, že se tepelně izolační vlastnosti naopak zhoršují. Velmi důležitá je zde tloušťka vláken, neboť větší počet tenčích vláken při konstantní objemové hmotnosti zmenšuje vzdálenosti mezi jednotlivými vlákny, čímž se také omezuje vliv proudění a průvzdušnosti. Závislost tedy není lineární a bez znalostí dalších materiálových charakteristik ji lze jen velmi obtížně parametrizovat. Graf 3 ilustrativně zobrazuje průběh závislosti součinitele tepelné vodivosti λ na objemové hmotnosti obecného vláknitého materiálu. Jak je patrné, optimální tepelná vodivost je dána lokálním minimem dané funkční závislosti. V levé, klesající části funkční závislosti zhoršuje tepelně izolační schopnosti přenos tepla prouděním intersticiální tekutinou v příliš velkých mezerách mezi vlákny (λ_g), v pravé, rostoucí části je to naopak silící přenos tepla vedením materiálovou kostrou (λ_f).



Graf 3 - Typický průběh závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti obecného vláknitého materiálu

Vzhledem k orientaci vláken rozlišujeme vláknité materiály do tří skupin na materiály jednosměrné (například technologie kolmého kladení), vrstevné (složené z navzájem rovnoběžných vrstev, ve kterých jsou vlákna orientována náhodně, tedy například technologie vodorovného kladení) a materiály s prostorově náhodnou orientací vláken. Důležitá je vždy orientace vláken ke směru tepelného toku. Optimální je uložení vláken kolmo na směr toku. Tepelná energie zde při průchodu materiálem musí překonávat složitou soustavu jednotlivých vláken, oddělených tenkými vrstvami vzduchu. Naopak při orientaci vláken ve směru tepelného toku se zvyšuje pravděpodobnost relativně snadnějšího průchodu tepelné energie po délce vláken a také úzkými kontaktními zónami mezi nimi, což zvyšuje vliv tepelné vodivosti vlastních vláken. Proto mají vláknité materiály s kolmým kladením vláken obvykle horší tepelně izolační vlastnosti, než jejich protějšky s kladením vodorovným. Tento vliv je však u přírodních vláken méně výrazný, neboť mají nižší součinitel tepelné vodivosti, oproti vláknům minerálním či skleněným.

Z okolních podmínek má na přenos tepelné energie vláknitými materiály vliv zejména vlhkost, která do jisté míry nahrazuje vzduch v prostorech mezi vlákny a zhoršuje tak tepelně izolační schopnosti intersticiálních vrstev a dále teplota. Při vyšších teplotách totiž významně nabývá na intenzitě vliv sálání.

Transport vlhkosti ve stavebních materiálech se řídí zákony difuze a je fyzikálně analogický s transportem tepla. Probíhá vždy, vzniká-li mezi oddělovanými prostředními gradient koncentrací vzdušné vlhkosti. Fyzikálně jej popisuje **1. Fickův zákon**:

$$j = -D\nabla c \quad (5)$$

kde: j – je hustota difuzního toku [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

∇c – gradient koncentrace vlhkosti [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]

D – je difuzní koeficient pro difundující plyn (vodní páru) [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Koncentrace vlhkosti ve vzduchu se obvykle vyjadřuje pomocí snáze měřitelného parciálního tlaku vodní páry. Tato záměna je možná díky stavové rovnici plynů. Fickův zákon difuze hmotných částic i Fourierův zákon vedení tepla jsou založeny na diferenciálních rovnicích stejného typu a tudíž jsou ekvivalentní, proto i jejich řešení jsou zaměnitelná. [80] Pro studium difuzního transportu vlhkosti vláknitými tepelně izolačními materiály byl výzkumným týmem na Technické univerzitě ve Vídni sestaven podrobný výpočetní model. [81]

C. CÍL PRÁCE

Cílem práce je studium mechanismů šíření tepla a vlhkosti ve struktuře tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken. Hlavním cílem je experimentální ověření teoretických zákonitostí, uplatňujících se při transportu tepla a vlhkosti vláknitými materiály, především vlivu tloušťky vláken a objemové hmotnosti. Pro rozšíření výstupů práce byly zvoleny různé druhy přírodních vláknitých materiálů rostlinného i živočišného původu. Výsledky práce by měly sloužit pro optimalizaci výrobních procesů přírodních izolantů s ohledem na jejich optimální tepelně technické vlastnosti. Ze shromážděných dat jsou vyvozeny obecné závěry, sloužící pro lepší pochopení chování těchto materiálů.

D. PRAKTICKÁ ČÁST

6. Metodika práce

Aby bylo možné postihnout širší rozpětí jednotlivých zkoumaných vlastností, byly zvoleny vzorky reprezentující vlákna rostlinná (konkrétně technické konopí), i vlákna živočišná (ovčí vlna). Hlavním těžištěm práce je studium mechanismů šíření tepla a vlhkosti ve struktuře přírodních vláknitých materiálů. Daná problematika byla v rámci této práce řešena ve třech etapách.

V **první etapě – stanovení fyzikálních vlastností** bylo na zkušebních tělesech provedeno základní stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti. Následovalo stanovení součinitele tepelné vodivosti λ , a to nejprve na vzorcích v původním stavu, kondicionovaných za přirozených laboratorních podmínek, vykazujících rovnovážnou sorpční vlhkost, a dále pak při měnící se střední teplotě, vlhkosti a objemové hmotnosti materiálu (konkrétní podmínky zkoušení jsou uvedeny dále v textu). Z uvedených charakteristik byl největší prostor věnován studiu objemové hmotnosti, jakožto velmi významného a technicky nejsnáze ovlivnitelného parametru, majícího přímý vliv na tepelně izolační schopnosti materiálu. Pro lepší pochopení vlivu proudění vzduchu strukturou materiálů bylo při jednotlivých objemových hmotnostech provedeno stanovení rychlosti proudění vzduchu v dutině uvnitř zkoumaných materiálů anemometrem. Závěrem této části je stanovení součinitele tepelné vodivosti, ale také jeho závislosti na teplotě, vlhkosti a objemové hmotnosti u všech zkoumaných materiálů, doplnkem je stanovení rychlosti proudění vzduchu uvnitř materiálů v závislosti na objemové hmotnosti.

Náplní **druhé etapy – stanovení parametrů vláken** je hlubší studium faktorů, ovlivňujících tepelně vlhkostní transport vnitřní strukturou materiálů z přírodních vláken. Provedeno bylo stanovení tloušťky a délky surových vláken a dále orientace vláken v izolačních rohožích, z nichž byla zhotovena zkušební tělesa pro zkoušky, provedené v první etapě. Zjištěné údaje byly srovnány s tepelně izolačními schopnostmi jednotlivých zkoušených materiálů, stanovenými v první etapě, z čehož byly vyvozeny odpovídající závěry.

V poslední **třetí etapě** je provedeno **zhodnocení výsledků**, získaných v prvních dvou etapách, k čemuž je využito normy ČSN EN ISO 10 456. U všech zkoumaných materiálů byly stanoveny převodní faktory pro teplotu a vlhkost, aby bylo v praxi možné provádět přepočet součinitele tepelné vodivosti těchto materiálů pro prostředí s různou teplotou a vlhkostí dle vztahů, uvedených v této normě.

6.1. Zkoušené materiály

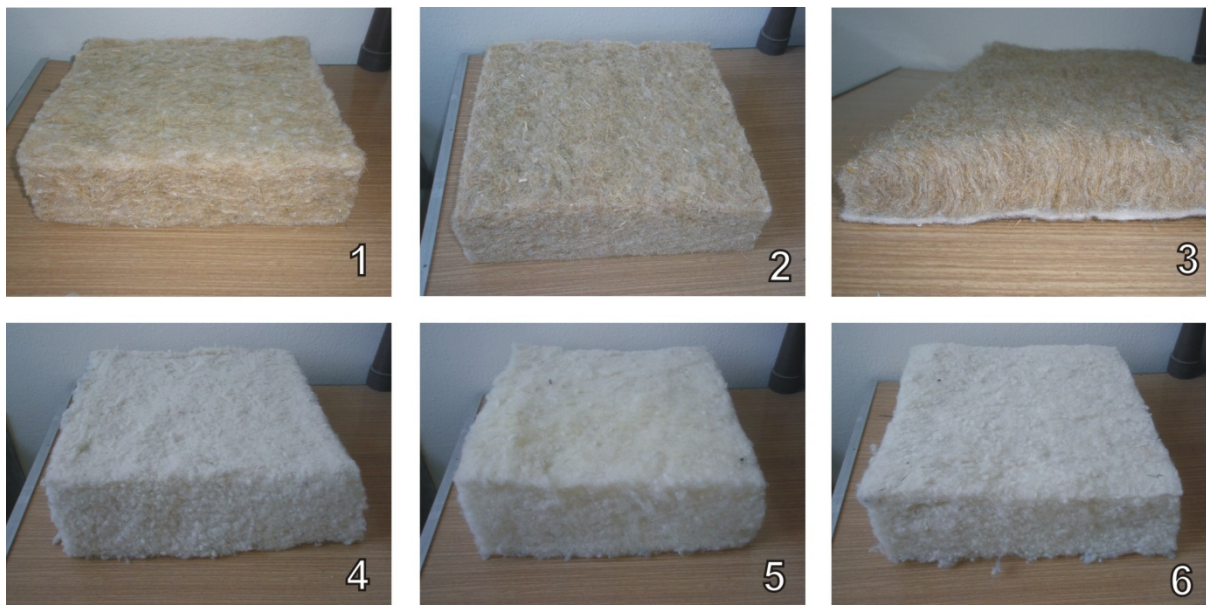
Měření byla prováděna na tepelně izolačních rohožích, zhotovených z přírodních vláken. Z nich byla vytvořena zkušební tělesa o rozměrech 300 x 300 mm. Přesné složení jednotlivých vzorků je uvedeno v tabulce 2.

Konopné rohože byly zhotoveny z konopných vláken a koudele teplovzdušným pojením BiCo (bikomponentními) vlákny technologií vodorovného kladení firmou Canabest, s.r.o. Pro měření byly zvoleny běžně dostupné materiály s obchodním názvem BASIC (vzorek č. 1) a PLUS (vzorek č. 2). Tyto výrobky se již v praxi běžně používají zejména jako vnitřní výplňové izolace dřevostaveb a domů z přírodních materiálů. Při stanovování závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti materiálu byla zkušební tělesa stlačována až na 50 % původního objemu. Takto velké míře stlačení bez poškození odolají pouze měkčí druhy izolačních rohoží, proto bohužel nemohl být do výzkumu zahrnut produkt PANEL, tuhá deska ze směsi konopného vlákna a pazdeří, která doplňuje sortiment výrobků firmy Canabest, a pro níž výrobce udává lepší tepelně izolační vlastnosti, než pro produkty BASIC a PLUS. Pro doplnění výsledků bylo proto použito konopné rouno, zhotovené technologií kolmého kladení (STRUTO) firmou Jilana a. s. (vzorek č. 3). Z tohoto vzorku byla pro snadnější manipulaci odstraněna nakaširovaná geotextilie.

Rohože z prané ovčí vlny, nehodící se pro textilní zpracování, byly technologií vodorovného kladení zhotoveny teplovzdušným pojením BiCo vlákny firmou Nejdecká česárna vlny, a. s. Pro měření byly použity vzorky s různou tloušťkou vláken (vzorek č. 4 – 23 μm , vzorek č. 5 – 33 μm a vzorek č. 6 – směs vláken 23 a 33 μm). Tyto rohože v současné době slouží pouze výzkumným účelům a jejich sériová výroba zatím neprobíhá.

Tabulka 2 - Složení jednotlivých zkoušených materiálů

Vzorek č.	Materiál	Konopná vlákna		BiCo vlákna
1	Canabest BASIC	85 %		15 %
2	Canabest PLUS	85 %		15 %
3	Konopí STRUTO	85 %		15 %
Vzorek č.	Materiál	Vlákna 23 μm	Vlákna 33 μm	BiCo vlákna
4	Ovčí vlna 23 μm	85 %	-	15 %
5	Ovčí vlna 33 μm	-	85 %	15 %
6	Ovčí vlna 23 + 33 μm	42,5 %	42,5 %	15 %



Obrázek 12 - Zkoušené materiály (číslování odpovídá tabulce 2)

6.2. Zkušební metody

Pro studium faktorů, ovlivňujících tepelně vlhkostní transport přírodními vláknitými materiály, byly provedeny následující zkoušky:

- Stanovení délky a šířky dle ČSN EN 822,
- Stanovení tloušťky dle ČSN EN 823,
- Stanovení objemové hmotnosti dle ČSN EN 1602,
- Stanovení součinitele tepelné vodivosti dle ČSN 72 7012-3,
- Stanovení tloušťky vláken mikroskopicky,
- Stanovení délky vláken,
- Stanovení orientace vláken,
- Stanovení rychlosti proudění vzduchu uvnitř materiálu.

6.2.1. Stanovení délky a šířky

Zkušební postup respektuje ČSN EN 822 [82]. Ta označuje délkou l delší lineární rozměr hlavního povrchu zkušebního tělesa a šířkou b kratší lineární rozměr hlavního povrchu zkušebního tělesa. Zkušební těleso musí být před provedením zkoušky kondicionováno v prostředí s teplotou vzduchu $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ po dobu minimálně 6 hodin (v případě sporu je třeba těleso kondicionovat při teplotě vzduchu $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(50 \pm 5)\%$). Vlastní zkouška spočívá v umístění zkušebního tělesa na rovinný povrch a následném přímém lineárním měření kovovým pravítkem nebo kovovým svinovacím měřidlem s milimetrovým

dělením, umožňujícím odečítání s přesností na 0,5 mm, případně jiným zkušebním zařízením, které zajistí výsledky s minimálně stejnou přesností. Na tělese s rozměry do 1,5 m se provede jedno měření délky a šířky uprostřed, přičemž hodnoty se odečítají s přesností na nejbližší milimetr.

6.2.2. Stanovení tloušťky

Měření bylo provedeno dle ČSN EN 823 [83]. Tloušťkou t rozumíme lineární rozměr, měřený kolmo k délce a šířce plochy. Měřicí přístroj je vybaven číselníkovým úchylkoměrem a pravoúhlou přitlačnou deskou. Úchylkoměr s přesností měření nejméně 0,5 mm je uchycen na tuhém rámu, spojeném s tuhou základní deskou pro umístění vzorku. Podstatou zkoušky je stanovení vzdálenosti mezi tvrdým, rovinným, referenčním povrchem, na kterém spočívá zkušební těleso, a přitlačnou deskou, volně spočívající na horním povrchu zkušebního tělesa. Těleso je třeba kondicionovat za stejných podmínek, jako při stanovování délky a šířky. Poté se uloží na rovnou tuhou základní desku tak, aby měřená plocha byla v kontaktu se základní plochou. Čtvercová přitlačná deska se umístí na zkušební těleso při vyvinutí celkového tlaku (50 ± 1) Pa na určenou plochu s centrálně umístěným číselníkovým úchylkoměrem. Tloušťka izolačního materiálu je poté vyjádřena v milimetrech jako střední hodnota měření, provedených na všech bodech zkušebního tělesa, zaokrouhlená na nejbližší milimetr.



Obrázek 13 - Zařízení pro stanovení tloušťky dle ČSN EN 823

6.2.3. Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost je dle ČSN EN 1602 [84] definována jako podíl hmotnosti zkušebního vzorku a jeho objemu. Zkušební vzorek musí být kondicionován při teplotě

vzduchu (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti vzduchu (50 ± 5) % pro dosažení konstantní hmotnosti. Následně jsou stanoveny lineární rozměry dle ČSN EN 12085 (konkrétně délka a šířka dle ČSN EN 822 a tloušťka dle ČSN EN 823) s přesností na nejbližší milimetry a dále hmotnost, stanovena přímým vážením zkušebních těles na laboratorních vahách, umožňujících měření hmotnosti s přesností na 0,5 %. Objemová hmotnost se vypočte dle vztahu:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (6)$$

kde: ρ_v – objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

m – hmotnost zkušebního tělesa [kg]

V – objem zkušebního tělesa, stanovený z lineárních rozměrů [m^3]

Výsledná objemová hmotnost se zaokrouhlí na 3 platné číslice.

6.2.4. Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti je stanoven v souladu s ČSN 727010 a souvisejícími normami. Použit je přístroj **Lambda 2300** od americké firmy Holometrix Micromet, pracující na principu stacionární metody měřidla tepelného toku (ČSN 72 7012-3, ISO 8301 [85]). Vzorek zkoušeného materiálu o rozměrech 300 x 300 mm se umístí do přístroje mezi dvě desky, které jsou během zkoušky otápěny na rozdílnou teplotu (teplotní spád je obvykle 10 K, lze měnit). Po dosažení ustáleného tepelného toku se zaznamená výstupní napětí na měřidlech tepelného toku a následně se ze znalosti teplot vztažné plochy ohřívajícího a ochlazovaného povrchu vzorku, tloušťky vzorku, již zmiňovaného výstupního napětí měřidel tepelného toku a kalibrační konstanty měřidla stanoví hledaný součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].



Obrázek 14 - Přístroj Lambda 2300

6.2.5. Stanovení tloušťky vláken mikroskopicky

Tloušťka vláken byla stanovena komparační metodou optickým mikroskopem, vybaveným okulárovým mikrometrem (dělená stupnice s konstantní vzdáleností dílků, vyrytá v optické soustavě okuláru). Vzhledem k tomu, že vzdálenost dílků je závislá na nastaveném zvětšení objektu mikroskopu, je nezbytné nejprve provést kalibrační srovnání s objektem, jehož přesné rozměry jsou známy. K tomuto účelu slouží cejchovní podložní sklíčko, které má ve svém středu vyrytu úsečku o délce 1 mm, dělenou na 100 dílků (tedy 1 dílek = 10 μm). Kalibrace spočívá v hledání průsečíku dílků obou stupnic a stanovení počtu odpovídajících si dílků. Výsledná reálná délka jednoho dílku okulárového mikrometru je průměrem ze tří odečtení. Teprve poté lze odečítat skutečné rozměry pozorovaného objektu.

Příprava preparátu pro zkoušku spočívá v uložení několika krátce ulomených vláken zkoumaného materiálu na podložní sklíčko mikroskopu, ovlhčení kapkou vody a přikrytí krycím sklíčkem. Po uložení takto připraveného preparátu na pracovní stolek mikroskopu již lze díky okulárovému mikrometru po zaostření odečítat počet dílků, odpovídajících tloušťce stanovovaných vláken. Ty poté mohou být s využitím kalibračního měření snadno přepočítány přímo na tloušťku vláken v μm . Aby se dalo stanovení tloušťky vláken považovat za objektivní, je třeba jej provést alespoň na 30 vláknech.



Obrázek 15 - Optický mikroskop s okulárovým mikrometrem

6.2.6. Stanovení délky vláken

Určení délky vlákna bývá obvykle prováděno souběžně se stanovením tloušťky vlákna. Jednotlivá vlákna, oddělena z izolační rohože, jsou před uložení na podložní sklíčko mikroskopu zvlhčena kapkou vody pro snazší manipulaci a přikládána na měřidlo délky se stupnicí, dělenou v milimetrech (desetiny jsou odhadovány). Pro dosažení objektivnosti je opět třeba provést alespoň 30 měření.

6.2.7. Stanovení orientace vláken

Průměrná orientace vláken v izolačních rohožích byla určena makroskopickým hodnocením úhlu vláken ve směru kolmém k předpokládanému směru tepelného toku na řezu materiálem. Hodnocení spočívalo v procentuálním vyjádření počtu vláken, orientovaných pod příslušným úhlem v kroku po 10° . Výsledný průměrný úhel vláken ve směru kolmém k předpokládanému směru tepelného toku byl stanoven jako vážený průměr jednotlivých úhlů, kde vahou je procentuální zastoupení vláken, orientovaných v jednotlivých úhlech.

6.2.8. Stanovení rychlosti proudění vzduchu izolačním materiálem

Pro stanovení rychlosti proudění vzduchu dutinou uvnitř izolační rohože byl použit přístroj **Testo 435**. Jedná se o multifunkční měřicí přístroj pro klimatizaci, větrání a kvalitu okolního vzduchu. Podle druhu sondy, jíž je vybaven, může být použit pro stanovení různých veličin za rozličných podmínek. Pro uvedené měření byla použita sonda typu „Hot-wire“ (neboli Žhavený drátek), jejímž fyzikálním principem je ochlazování žhaveného senzoru (v tomto případě drátku) proudícím médiem. Sonda vyniká malými rozměry měřicího bodu, dále vysokou přesností a citlivostí měření (je schopna zachytit proudění vzduchu v rozsahu $0 - 20 \text{ m.s}^{-1}$ s citlivostí $0,01 \text{ m.s}^{-1}$), díky níž je vhodná pro přesné bodové měření i při velmi malých rychlostech proudění. K nevýhodám naopak patří značná křehkost a citlivost na znečištění. Součástí sondy je i čidlo teploty.



Obrázek 17 - Přístroj Testo 435



Obrázek 16 - Detail měřicí sondy

7. Provádění a výsledky zkoušek

7.1. Etapa první – stanovení fyzikálních vlastností

7.1.1. Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti

Všechna měření byla prováděna postupem uvedeným v příslušných zkušebních normách (konkrétně se jedná o ČSN EN 822 pro stanovení délky a šířky, ČSN EN 823 pro stanovení tloušťky a ČSN EN 1602 pro stanovení objemové hmotnosti) na vzorcích, kondicionovaných v laboratorním prostředí při teplotě $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vzdušné vlhkosti $(50 \pm 5)\%$. Délka a šířka byla stanovena přímým měřením kovovým pravítkem vždy jedním odečtením uprostřed tělesa. Tloušťka byla stanovena s přtlakem (50 ± 1) Pa přístrojem s číselníkovým úchylkoměrem, zobrazeným na obrázku 13. Uvedená hodnota je průměrem ze tří měření. Objemová hmotnost je vypočtena pomocí vztahu (6) z naměřených hodnot lineárních rozměrů, tloušťky tělesa a hmotnosti, zjištěné vážením na laboratorních vahách.

Tabulka 3 - Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti

Materiál	Délka [mm]	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
Canabest BASIC	289	275	88,1	204,41	29,2
Canabest PLUS	306	296	103,6	322,29	34,4
Konopí STRUTO	300	300	34,5	59,29	19,1
Ovčí vlna 23	312	303	85,6	183,43	23,5
Ovčí vlna 33	298	297	96,8	173,86	20,5
Ovčí vlna 23 + 33	303	298	85,8	158,84	20,5

Jak je patrné z uvedené tabulky, rohože z ovčí vlny vykazují za normálních podmínek zhruba o třetinu nižší objemovou hmotnost a přes to, jak bude dále prokázáno, dosahují lepších tepelně izolačních vlastností. Tato skutečnost úzce souvisí s tloušťkou vlákna, která je u ovčí vlny výrazně nižší. Proto vykazují izolační rohože z ovčí vlny menší obsah pevné fáze a tím i nižší objemovou hmotnost.

Za zmínku stojí také výsledky technického konopí s kolmým kladením. Jednak má velmi malou tloušťku (pouze 34,5 mm, zatímco u ostatních vzorků s vodorovným kladením se pohybuje okolo 90 mm) což je významný limitující faktor výrobní technologie, a také vykazuje ve srovnání s vodorovně kladeným technickým konopím Canabest znatelně nižší objemovou hmotnost. Tím je prokázáno, že technologie STRUTO vyniká nižší spotřebou vlákna oproti technologii s vodorovným kladením.

7.1.2. Stanovení závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti

Součinitel tepelné vodivosti λ byl stanoven na vzorcích izolačních materiálů orientačních rozměrů 300 x 300 mm, kondicionovaných v laboratorním prostředí při teplotě $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vzdušné vlhkosti $(50 \pm 5)\%$ metodou měřidla tepelného toku dle ČSN 72 7012-3 (ISO 8301) v přístroji Lambda 2300 při střední teplotě 10°C (provedena 2 měření, uvedená hodnota je jejich aritmetickým průměrem) a dále 0°C a 20°C , při teplotním spádu 10 K. Změna objemové hmotnosti byla u rohoží s vodorovným kladením docílena stlačováním zkušební tělesa pohyblivou horní deskou měřicího přístroje Lambda 2300 v kroku po 10 % původní tloušťky, stanovené dle ČSN EN 823, až na maximum 50 %, což odpovídá nárůstu objemové hmotnosti po 20 % až na dvojnásobek původní hodnoty, stanovené dle ČSN EN 1607.

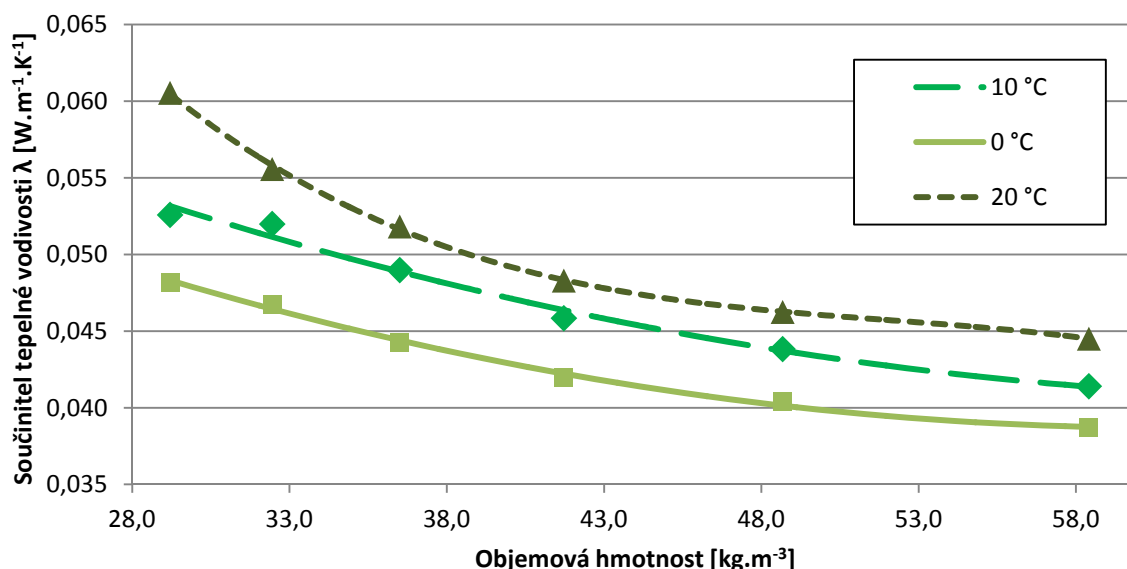
U technického konopí STRUTO musel být vzhledem ke kolmé orientaci vláken zvolen odlišný postup. Z role izolačního materiálu byla po odstranění nakaširované geotextilie vyřezána sada zkušebních těles s plynule se zvětšujícími lineárními rozměry tak, aby po jejich stlačení na rozměr měřicí komory přístroje Lambda 2300 (300 x 300 mm) bylo dosaženo stejného poměrného nárůstu objemové hmotnosti, jako v případě vzorků s vodorovným kladením. Pro fixaci požadovaného rozměru i při značném stlačení byly vzorky před umístěním do měřicí komory osazeny do pomocného rámečku, jehož vnější rozměry byly 300 x 300 mm a tloušťka stěny 20 mm. Jako materiál byl pro zhotovení rámečku použit extrudovaný polystyren, protože vykazuje obdobný součinitel tepelné vodivosti λ , jako testovaný materiál a tudíž nehrozí riziko zkreslení výsledků měření.

Následují výsledky stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti u jednotlivých zkoušených materiálů. U vzorků, u nichž se nepodařilo stanoveným rozsahem objemových hmotností nalézt hledané optimum, při kterém dosahují minimálních hodnot součinitele tepelné vodivosti (viz. kapitola 6, graf 3), byl proveden odhad polohy tohoto bodu proložením experimentálně zjištěných dat polynomem 2. stupně a následným dopočtem kvadratickou regresí. Odhad byl proveden pro křivku, stanovenou při střední teplotě měření 10°C , neboť se jedná o srovnávací teplotu pro stanovení deklarovaných vlastností dle ČSN EN ISO 10 456 a navíc je hodnota součinitele tepelné vodivosti, stanovená při této teplotě, průměrem ze dvou měření, proto lze očekávat i větší přesnost výsledků.

Vzorek 1 – Technické konopí Canabest BASIC

Tabulka 4 - Přehled tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - Canabest BASIC

Stlačení	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		
		10 °C	0 °C	20 °C
0 %	29,2	0,0526	0,0482	0,0605
10 %	32,5	0,0520	0,0468	0,0556
20 %	36,5	0,0490	0,0443	0,0518
30 %	41,7	0,0458	0,0419	0,0483
40 %	48,7	0,0438	0,0404	0,0463
50 %	58,4	0,0414	0,0387	0,0445



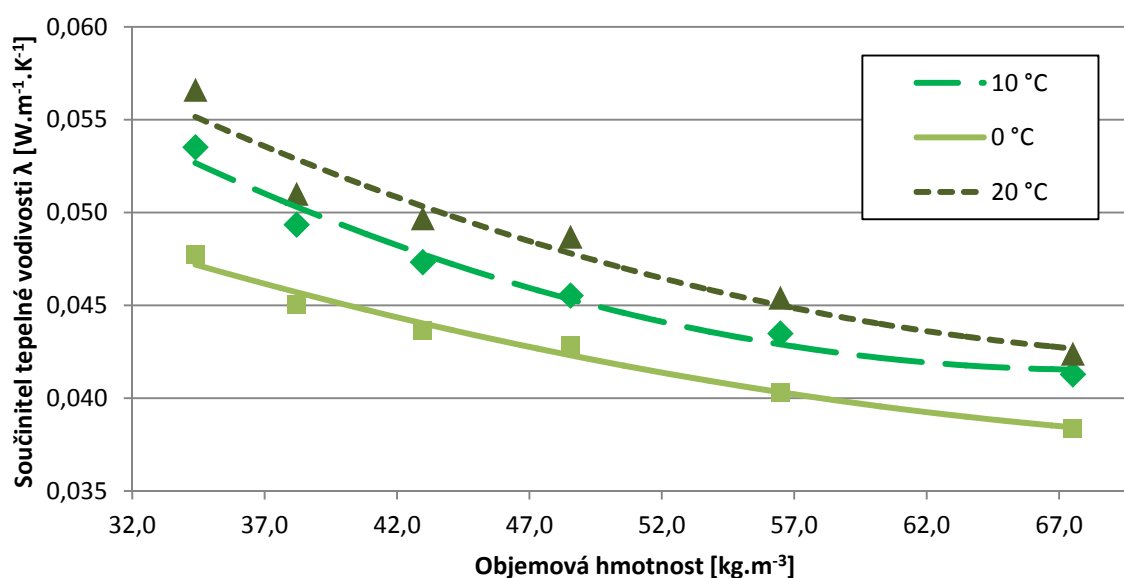
Graf 4 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - Canabest BASIC

Canabest BASIC je měkká izolační rohož z technického konopí. Jedná se o základní produkt firmy Canabest. Výrobce uvádí součinitel tepelné vodivosti 0,042 W.m⁻¹.K⁻¹ při objemové hmotnosti 24 kg.m⁻³. Laboratorně stanovená objemová hmotnost je 29,2 kg.m⁻³, při níž materiál vykazuje ve stavu rovnovážné sorpční vlhkosti při střední teplotě 10 °C součinitel tepelné vodivosti 0,0526 W.m⁻¹.K⁻¹, tedy horší, než konkurenční izolační materiály na bázi minerálních vláken. Z funkční závislosti je patrné, že se nachází na levé, klesající větvi teoretické funkční závislosti (viz. kapitola 6, graf 3). Ani při stlačení na dvojnásobnou objemovou hmotnost (58,4 kg.m⁻³) nebylo dosaženo hledaného lokálního extrému. Prodloužením křivky kvadratické regrese byla odhadnuta poloha optima v rozmezí objemové hmotnosti 65 až 75 kg.m⁻³, při které by materiál dosahoval součinitele tepelné vodivosti 0,0410 až 0,0414 W.m⁻¹.K⁻¹, tedy hodnotu o více než 20 % příznivější a již plně srovnatelnou s minerálními vláknitými materiály.

Vzorek 2 – Technické konopí Canabest PLUS

Tabulka 5 - Přehled tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - Canabest PLUS

Stlačení	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		
		10 °C	0 °C	20 °C
0 %	34,4	0,0535	0,0477	0,0566
10 %	38,2	0,0493	0,0450	0,0510
20 %	43,0	0,0473	0,0437	0,0497
30 %	48,5	0,0455	0,0429	0,0487
40 %	56,5	0,0435	0,0403	0,0454
50 %	67,5	0,0413	0,0384	0,0424



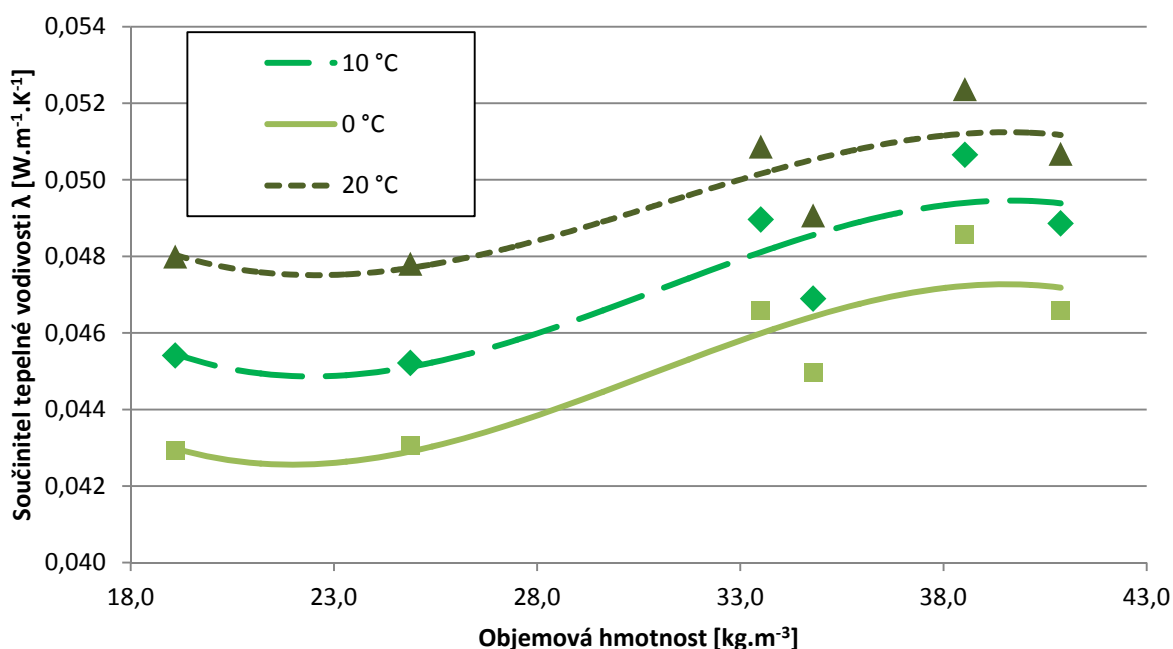
Graf 5 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - Canabest PLUS

Produkt PLUS je další z kategorie měkkých izolačních rohoží od firmy Canabest, oproti základnímu produktu BASIC však výrobce uvádí výhodnější tepelně izolační vlastnosti (0,040 W.m⁻¹.K⁻¹ při objemové hmotnosti 36 kg.m⁻³). Experimentálně stanovena byla objemová hmotnost 34,4 kg.m⁻³ a jí ve stavu rovnovážné sorpční vlhkosti a střední teplotě 10 °C odpovídající součinitel tepelné vodivosti 0,0535 W.m⁻¹.K⁻¹. Lze si povšimnout, že obě tyto hodnoty, stejně jako celkový průběh funkční závislosti, se velmi blíží hodnotám, stanoveným u materiálu BASIC, a tvrzení výrobce o lepších parametrech tedy nelze potvrdit. Jako optimální zde byla pomocí kvadratické regrese určena přímo hodnota, odpovídající 50% kompresi zkušebního tělesa, tedy 0,0413 W.m⁻¹.K⁻¹ při objemové hmotnosti 67,5 kg.m⁻³. Tyto hodnoty opět velmi úzce korespondují s výsledky materiálu BASIC.

Vzorek 3 – Technické konopí STRUTO s kolmým vláknem

Tabulka 6 - Přehled tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - konopí STRUTO

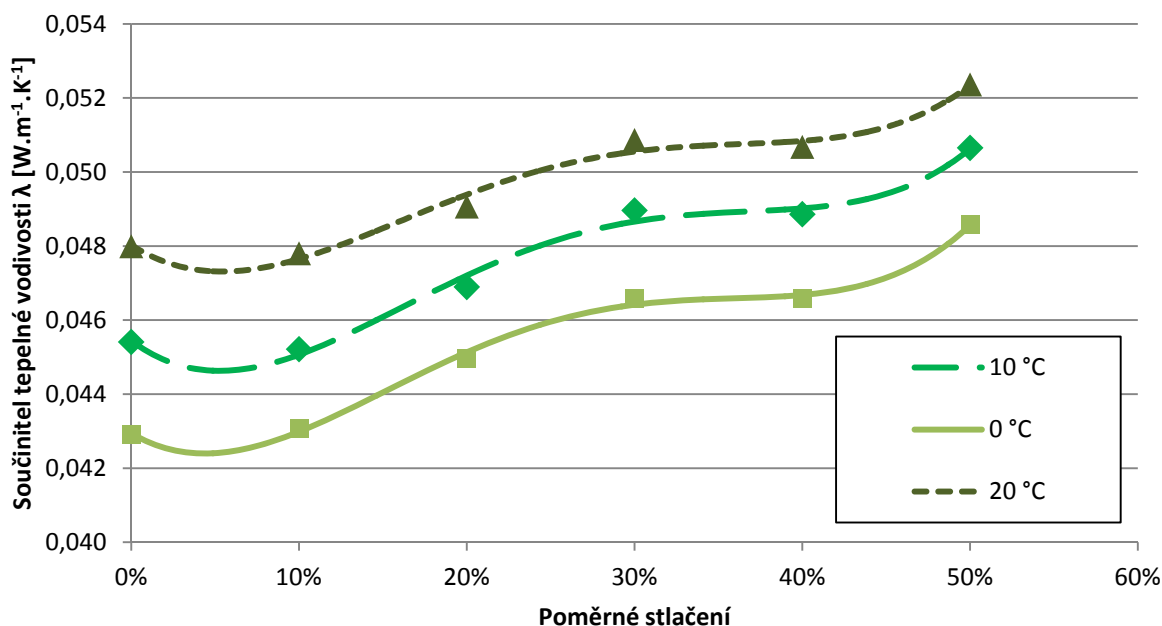
Stlačení	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		
		10 °C	0 °C	20 °C
0 %	19,1	0,0454	0,0429	0,0480
10 %	24,9	0,0452	0,0431	0,0478
20 %	34,8	0,0469	0,0450	0,0491
30 %	33,5	0,0490	0,0466	0,0507
40 %	40,9	0,0489	0,0466	0,0507
50 %	38,5	0,0507	0,0486	0,0524



Graf 6 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - konopí STRUTO

Při testování vzorku technického konopí s vodorovným kladením, zhotoveného prototypově jihlavskou společností Jilana a. s. technologií STRUTO, vyšlo najevo několik velmi zajímavých skutečností. Negativem je, že prototypové rouno vykazovalo značnou nehomogenitu objemové hmotnosti po délce výrobku. Ačkoliv byly vzorky vyrobeny pečlivě v předem vypočtených teoretických rozměrech tak, aby po osazení do pomocného měřicího rámečku dosahovaly přesně stanovené, rovnoměrně po 10 % se zvětšující míry stlačení, skutečnost se od tohoto předpokladu značně liší. Jak je patrné z tabulky 6, rozdíl v objemové hmotnosti mezi 20% a 30% stlačením a dále mezi 40% a 50% stlačením bezpochyby nevykazuje plynulý nárůst. Navíc i hodnoty součinitele tepelné vodivosti, odpovídající

zmiňovaným hodnotám, jsou velmi rozptýlené a neodpovídají předpokládanému průběhu, s čímž také koresponduje nepřesný průběh regresního polynomu v dané oblasti. Proto v tomto případě ani nebylo možné použít kvadratickou regresi pro zjištění polohy extrému dané funkční závislosti. Pro omezení uvedeného vlivu byla navíc sestavena závislost na poměrném stlačení (viz graf 7).

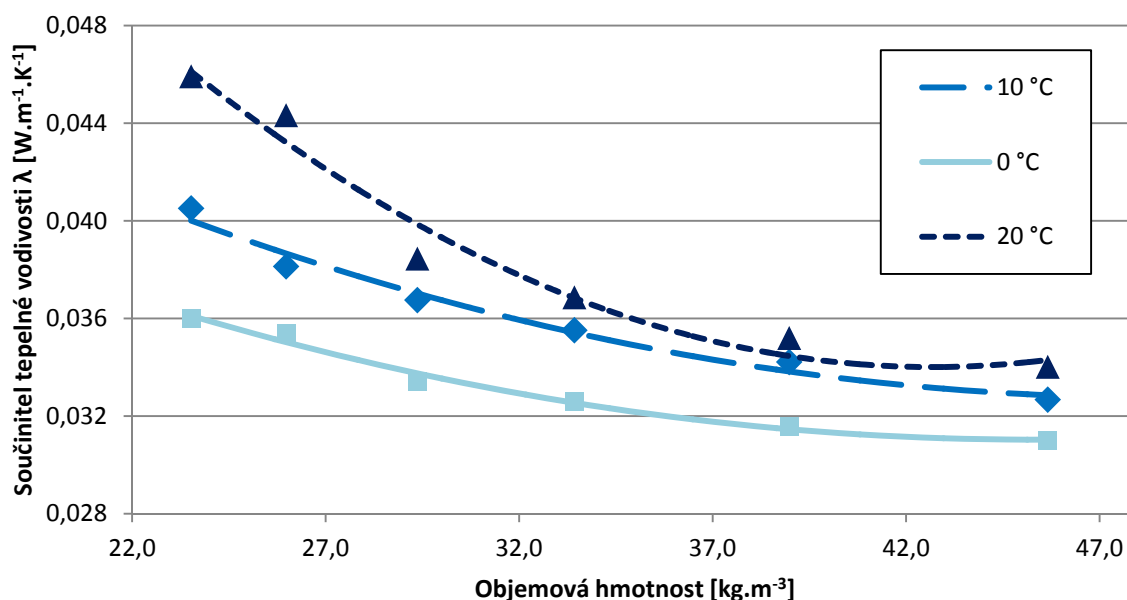


Graf 7 - Závislost tepelné vodivosti na poměrném stlačení - konopí STRUTO

Na druhé straně je třeba upozornit na skutečnost, že přirozená objemová hmotnost materiálu (laboratorně stanovena na $19,1 \text{ kg.m}^{-3}$) a jí odpovídající součinitel tepelné vodivosti $0,0454 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ se již velmi blíží poloze optima, které lze orientačně předpokládat v rozmezí 20 až 25 kg.m^{-3} (předpokládaný minimální součinitel tepelné vodivosti leží v rozmezí $0,0450$ až $0,0452 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Při objemové hmotnosti $24,9 \text{ kg.m}^{-3}$ totiž byla stanovena hodnota tepelné vodivosti $0,0452 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ jako nejnižší hodnota z daného souboru. Další zvyšování objemové hmotnosti již vede k posuvu po rostoucí větvi křivky teoretické funkční závislosti. Je patrné, že optimální objemová hmotnost 20 až 25 kg.m^{-3} je několikanásobně nižší, než hodnota, stanovená pro konopné rohože s vodorovným kladením (cca. 70 kg.m^{-3}).

Vzorek 4 – Ovčí vlna 23 μm Tabulka 7 - Přehled tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - ovčí vlna 23 μm

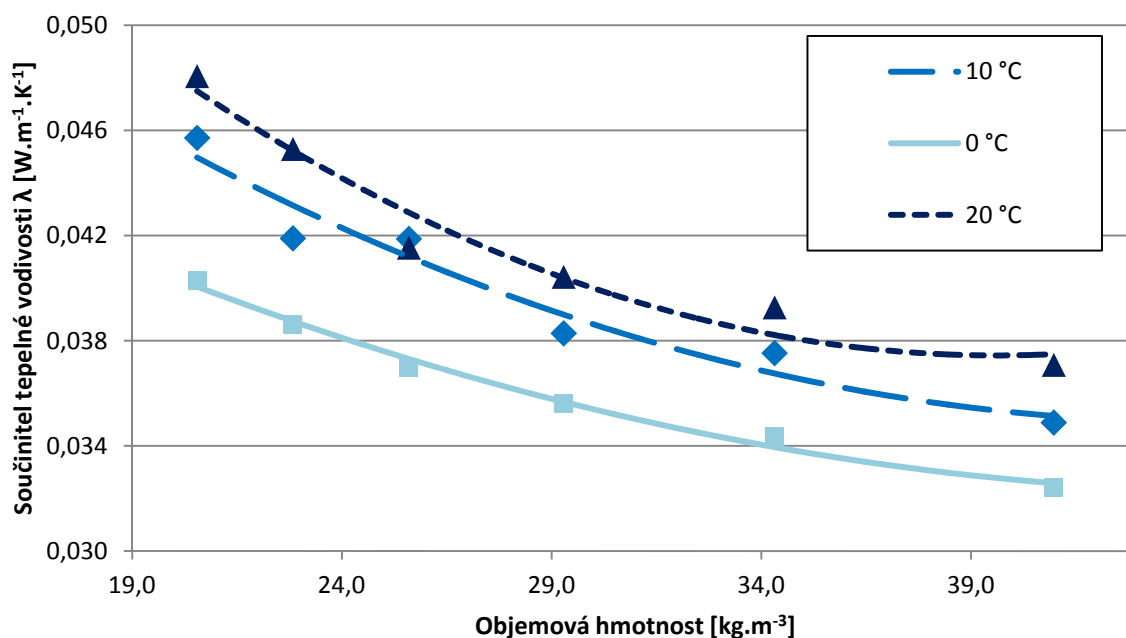
Stlačení	ρ [kg.m^{-3}]	λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]		
		10 °C	0 °C	20 °C
0 %	23,5	0,0405	0,0360	0,0459
10 %	26,0	0,0381	0,0354	0,0443
20 %	29,4	0,0368	0,0334	0,0385
30 %	33,4	0,0355	0,0326	0,0369
40 %	39,0	0,0342	0,0316	0,0352
50 %	45,7	0,0327	0,0310	0,0340

Graf 8 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - ovčí vlna 23 μm

Veškeré testované vzorky ovčí vlny byly zhotoveny prototypově z prané ovčí vlny s různou tloušťkou použitých vláken. Testovaný vzorek s tloušťkou 23 μm vykazoval při přirozené objemové hmotnosti 23,5 kg.m^{-3} ve stavu rovnovážné sorpční vlhkosti při střední teplotě měření 10 °C součinitel tepelné vodivosti 0,0405 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Obdobně jako v případě technického konopí s vodorovným kladením vláken, i zde se společně se zvyšující se objemovou hmotností zlepšovaly tepelně izolační vlastnosti, a to v celém rozsahu stanovovaných objemových hmotností. Poslední z řady stanovovaných bodů (45,7 kg.m^{-3} ; 0,327 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) je však již pravděpodobně velmi blízko teoretickému optimu. To bylo pomocí kvadratické regrese orientačně lokalizováno v intervalu 45 až 52 kg.m^{-3} (součinitel tepelné vodivosti zde má pravděpodobně hodnotu 0,0322 až 0,0326 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Vzorek 5 – Ovčí vlna 33 μm Tabulka 8 - Přehled tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - ovčí vlna 33 μm

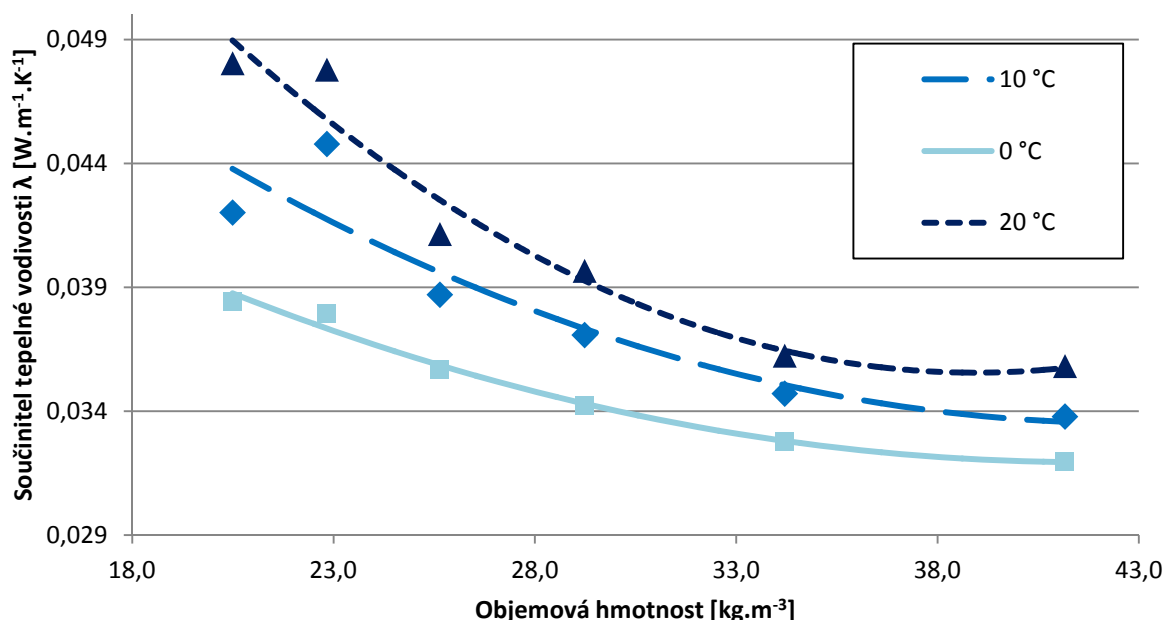
Stlačení	ρ [kg.m^{-3}]	λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]		
		10 °C	0 °C	20 °C
0 %	20,5	0,0457	0,0403	0,0481
10 %	22,8	0,0419	0,0386	0,0453
20 %	25,6	0,0419	0,0370	0,0415
30 %	29,3	0,0383	0,0356	0,0404
40 %	34,3	0,0375	0,0343	0,0393
50 %	41,0	0,0349	0,0324	0,0371

Graf 9 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - ovčí vlna 33 μm

Vzorek ovčí vlny s tloušťkou vlákna 33 μm vykazoval v přirozeném stavu objemovou hmotnost 20,5 kg.m^{-3} a součinitel tepelné vodivosti 0,0457 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Funkční závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti se svým tvarem velmi podobá předcházejícímu vzorku s tloušťkou vlákna 23 μm , včetně toho, že teoretická poloha optima je také nedaleko za posledním určeným bodem funkční závislosti. V tomto případě předpokládám polohu 42 až 47 kg.m^{-3} , čemuž odpovídá součinitel tepelné vodivosti 0,0346 až 0,0350 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ačkoliv je tepelná vodivost tohoto vzorku ve všech bodech horší, než v případě vzorku předcházejícího, stále však dosahuje významně lepších hodnot, než všechny vzorky, zhotovené z technického konopí. Lze proto tvrdit, že ovčí vlna je obecně lepším tepelným izolantem, než technické konopí. Výzkumy jiných autorů to potvrzují.

Vzorek 6 – Ovčí vlna směsná 23 + 33 μm Tabulka 9 - Přehled tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - vlna 23 + 33 μm

Stlačení	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		
		10 °C	0 °C	20 °C
0 %	20,5	0,0420	0,0384	0,0481
10 %	22,8	0,0448	0,0379	0,0478
20 %	25,6	0,0387	0,0357	0,0412
30 %	29,2	0,0371	0,0342	0,0397
40 %	34,2	0,0347	0,0328	0,0362
50 %	41,2	0,0338	0,0320	0,0358

Graf 10 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - vlna 23 + 33 μm

Vzorek, zhotovený ze směsi vláken s tloušťkou 23 a 33 μm , potvrdil předpoklady a vykázal tepelně izolační schopnosti takřka uprostřed mezi výsledky vzorků z čistých vláken. Konkrétně je to v přirozeném stavu 0,0420 W.m⁻¹.K⁻¹ při objemové hmotnosti 20,5 kg.m⁻³ s orientační polohou optima mezi 40 a 45 kg.m⁻³ a předpokládaným součinitelem tepelné vodivosti 0,0332 až 0,0338 W.m⁻¹.K⁻¹. Průběh funkční závislosti je opět obdobný. Lze si povšimnout, že optimální objemová hmotnost je o 5 až 10 kg.m⁻³ nižší, než v případě vzorků z čistých vláken, což při větších objemech výroby může přinést významnou úsporu suroviny.

7.1.3. Stanovení závislosti rychlosti proudění na objemové hmotnosti

S předcházející problematikou velmi úzce souvisí otázka proudění vzduchu uvnitř vláknitého materiálu při existenci tepelného toku. Tyto materiály vykazují vysokou míru průvzdušnosti, zejména při nízkých objemových hmotnostech, s nimiž je spojen dominantní vliv šíření tepla prouděním intersticiální tekutinou. Naopak při zvyšující se objemové hmotnosti by měla rychlost proudění vzduchu klesat.

Pro ověření této hypotézy bylo provedeno měření pomocí anemometru. Použit byl přístroj Testo 435 se sondou typu „Hot-wire“, neboli Žhavený drátek. Pro dosažení korektních výsledků je nutné měření provádět po dosažení ustáleného tepelného toku materiálem, při definované střední teplotě a teplotním spádu. Proto byl opět použit přístroj Lambda 2300, kam byl umístěn testovaný vzorek, poté byla do dutiny ve zkušebním tělese zavedena sonda a následně proběhl start měřicího režimu. Měřicí komora přístroje nemohla být díky přítomnosti sondy řádně uzavřena, proto byl vstupní otvor neprodyšně utěsněn a opatřen zvnějšku dodatečnou tepelně izolační vrstvou z minerální vlny. Po dosažení ustáleného tepelného toku byla odečtena odpovídající hodnota rychlosti proudění vzduchu.

Měření bylo provedeno na všech vzorcích z předchozího experimentu s výjimkou technického konopí STRUTO. Překážkou byla nedostatečná tloušťka vzorku, která by jednak pravděpodobně zkreslovala výsledky a také by mohla vést k poškození sondy. Aby byly výsledky přímo porovnatelné, probíhalo měření v podmínkách shodných s předcházejícím stanovováním závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti, tedy na vzorcích, kondicionovaných v laboratorních podmínkách, ve stavu rovnovážné sorpční vlhkosti při střední teplotě měření 10 °C a teplotním spádu 10 K. Dodrženy byly také veškeré hodnoty objemové hmotnosti.

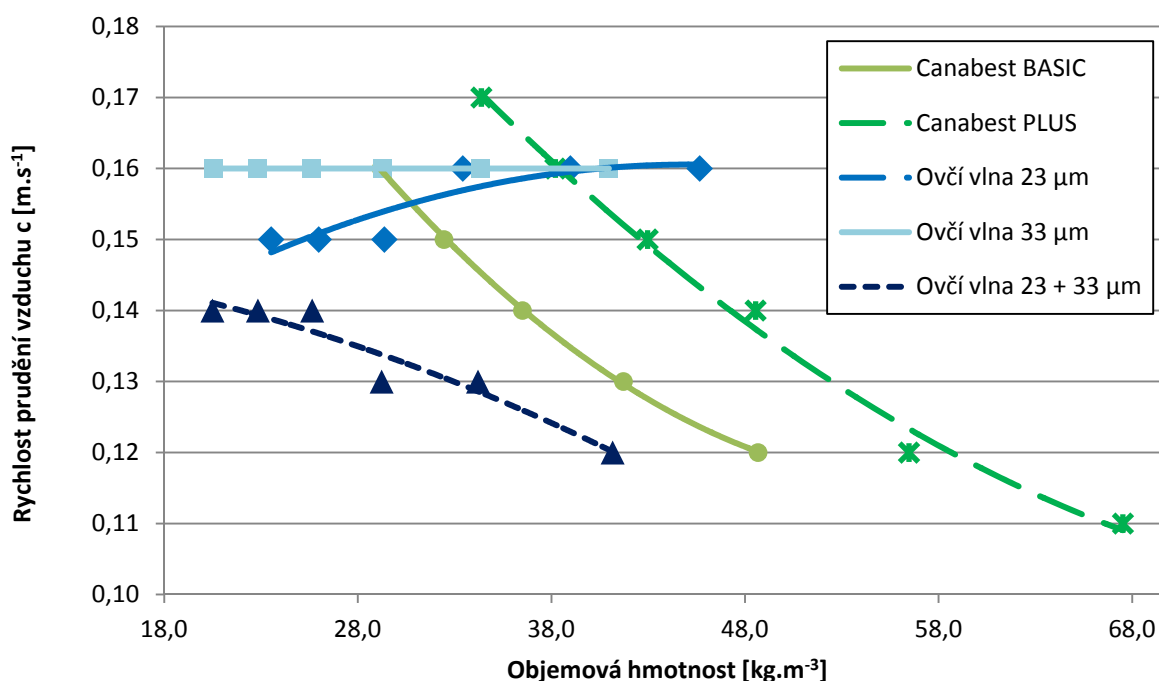


Obrázek 18 - Proces měření rychlosti proudění vzduchu uvnitř vláknitého materiálu

Tabulka 10 - Přehled rychlosti proudění v závislosti na objemové hmotnosti

Stlačení	Canabest BASIC		Canabest PLUS		Ovčí vlna 23 μm		Ovčí vlna 33 μm		Vlna 23 + 33 μm	
	ρ [kg.m ⁻³]	v [m.s ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]	v [m.s ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]	v [m.s ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]	v [m.s ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]	v [m.s ⁻¹]
0 %	29,2	0,16	34,4	0,17	23,5	0,15	20,5	0,16	20,5	0,15
10 %	32,5	0,15	38,2	0,16	26,0	0,15	22,8	0,16	22,8	0,14
20 %	36,5	0,14	43,0	0,15	29,4	0,15	25,6	0,16	25,6	0,14
30 %	41,7	0,13	48,5	0,14	33,4	0,16	29,3	0,16	29,2	0,13
40 %	48,7	0,12	56,5	0,12	39,0	0,16	34,3	0,16	34,2	0,13
50 %	58,4	*	67,5	0,11	45,7	0,16	41,0	0,16	41,2	0,12

* Pozn. Hodnota není stanovena, vzorek nebylo možné stlačit do požadované míry



Graf 11 - Závislost rychlosti proudění na objemové hmotnosti

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. Tento závěr potvrzují oba testované vzorky technického konopí.

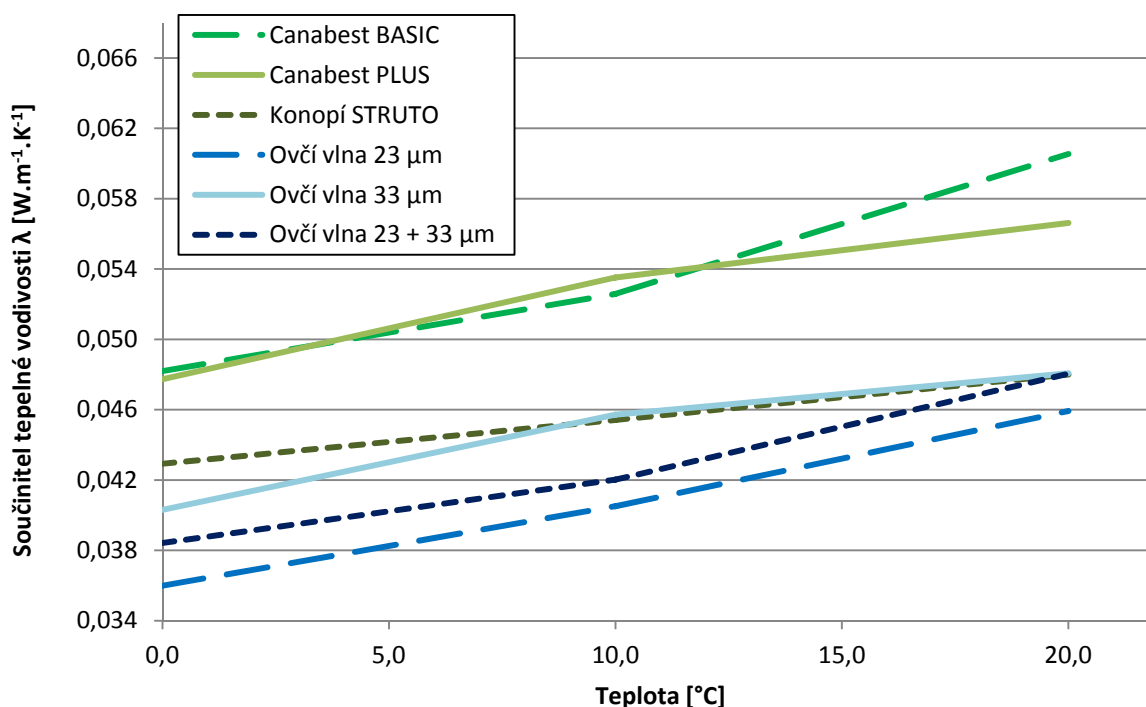
Poněkud složitější situace nastává v případě ovčí vlny. Jak je patrné z grafu, vzorky z čistých vláken 23 μm a 33 μm zmiňovanou závislost nevykazují. Průvzdušnost těchto

materiálů je pravděpodobně i při větších objemových hmotnostech stále natolik velká, že ke zpomalování rychlosti proudění vzduchu uvnitř struktury nedochází. Svou roli může hrát i skutečnost, že na rozdíl od hrubých, nepoddajných a velmi pevných konopných vláken jsou vlákna ovčí vlny velmi tenká a snadno deformovatelná a rohože zůstávají měkké a poddajné i při větším stlačení. Lze proto usuzovat, že i pro vzduch mohou být snáze prostupné. Jediným ze vzorků ovčí vlny, který vykázal předpokládanou závislost, byl vzorek ze směsi vláken, i když závislost byla výrazně pozvolnější, než u technického konopí. Směs vláken s různou tloušťkou, ale i délkou, pravděpodobně vytváří složitou strukturu, která má při větších objemových hmotnostech schopnost částečně tlumit proudění vzduchu materiálem.

Závěrem je třeba konstatovat, že ačkoliv bylo prokázáno, že uvedenou anemometrickou metodu lze pro stanovení rychlosti proudění vzduchu vláknitými materiály úspěšně použít, sonda typu „Hot-Wire“ se ukázala jako velice křehká a snadno poškoditelná. Použití běžně dostupných ochranných prostředků však obvykle způsobí určité zkreslení výsledků. Proto doporučuji pro případné další obdobné měření vyzkoušet jinou metodu či alespoň jiný druh zkušební sondy.

7.1.4. Stanovení závislosti tepelné vodivosti na teplotě

Pro stanovení závislosti tepelné vodivosti na teplotě byly použity hodnoty z kapitoly 8.1.2. Měření probíhalo při střední teplotě 0, 10 a 20 °C a teplotním gradientu 10 K. Závislost byla sestavena pro všechny vzorky pouze při jejich přirozené objemové hmotnosti, ve všech ostatních případech by funkční závislosti byly obdobné.



Graf 12 - Závislost tepelné vodivosti na teplotě

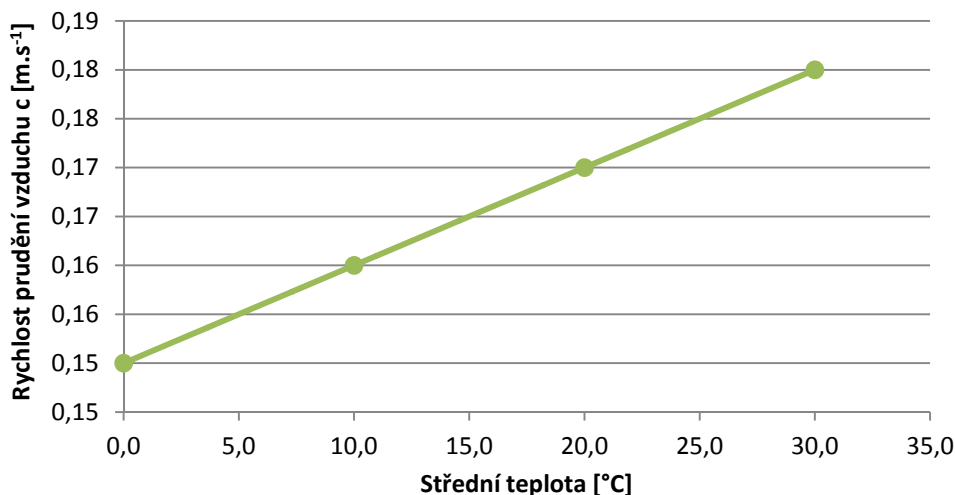
Jak je patrné, že součinitel tepelné vodivosti se s rostoucí teplotou u všech testovaných vzorků zvyšuje lineárně. Případné drobné odchylky jsou způsobeny spíše chybou měření, než nějakým významnějším trendem. Tento fakt je způsoben vlivem transportu tepla sáláním, které se projevuje u všech těles teplejších než 0 K a s teplotou lineárně stoupá. Také proudění tepla s ohledem na vyšší kinetickou energii částic vzduchu společně se zvyšující se teplotou nabývá na významu. Proto mají lineární závislosti u jednotlivých materiálů také obdobnou směrnici. Mírnou odlišnost opět vykazuje vzorek technického konopí s kolmým kladením, jehož závislost na teplotě je pozvolnější. Ačkoliv je problematické činit závěry na základě jednoho měření, je možné, že u materiálů s kolmým kladením by díky odlišným principům šíření tepla jejich strukturou mohlo mít sálání menší vliv, než u materiálů kladených vodorovně. Toto tvrzení je však třeba potvrdit či vyvrátit dalším výzkumem.

7.1.5. Stanovení závislosti rychlosti proudění na teplotě

Závislost rychlosti proudění vzduchu uvnitř materiálu na teplotě byla stanovena stejným postupem, jako závislost na objemové hmotnosti. Vzhledem k závěrům, učiněným při stanovení závislosti tepelné vodivosti na teplotě (tedy že tato závislost probíhá takřka lineárně u všech testovaných materiálů) byl pro stanovení reprezentativních výsledků použit pouze jeden materiál, konkrétně rohož z technického konopí Canabest BASIC. Materiál byl testován ve stavu přirozené objemové hmotnosti při střední teplotě 0, 10, 20 a 30 °C a teplotním spádu 10 K

Tabulka 11 - Přehled rychlosti proudění v závislosti na teplotě – Canabest BASIC

T [°C]	c [m.s ⁻¹]
0	0,15
10	0,16
20	0,17
30	0,18



Graf 13 - Závislost rychlosti proudění na teplotě – Canabest BASIC

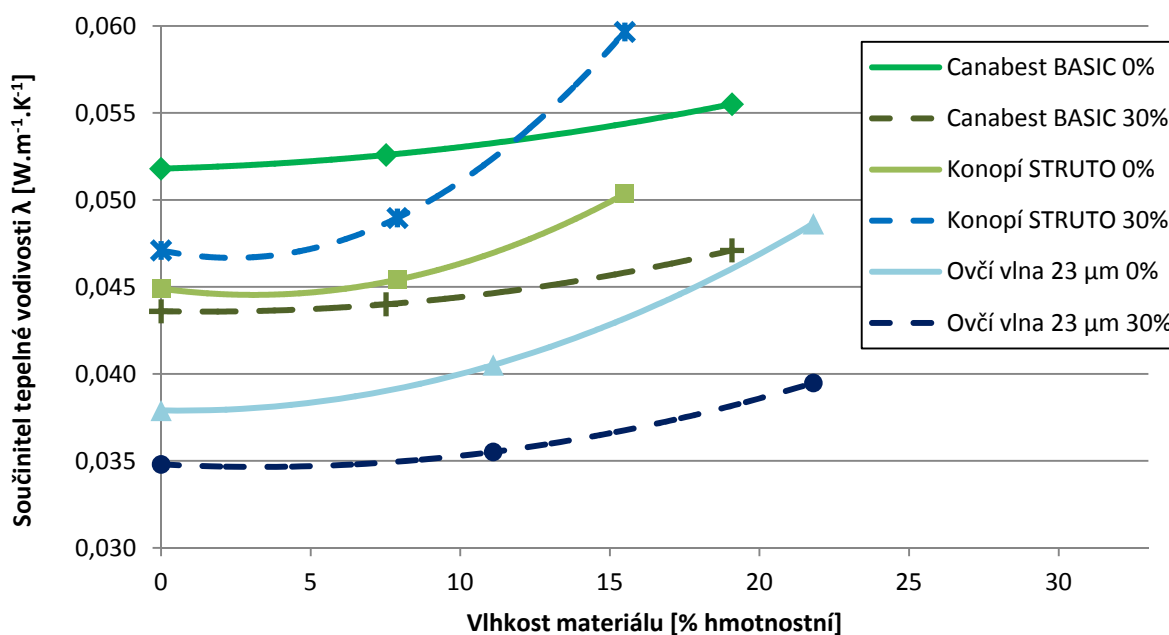
Z grafu je patrné, že rychlost proudění vzduchu uvnitř vzorku je striktně lineárně závislá na teplotě. Vzhledem k tomu, že obdobný průběh vykazuje závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě, jako správnější se jeví tvrzení, že rychlost proudění vzduchu strukturou materiálů z technického konopí je přímo úměrná procházející hustotě tepelného toku a nezáleží primárně na faktorech, které tuto veličinu ovlivňují. To ostatně potvrzují i dříve prezentované výsledky závislosti na objemové hmotnosti.

7.1.6. Stanovení závislosti tepelné vodivosti na vlhkosti

Příslušné hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro sestavení závislosti na vlhkosti byly opět stanoveny metodou měřidla tepelného toku v přístroji Lambda 2300. Testování probíhalo při střední teplotě 10 °C a teplotním spádu 10 K. Pro měření byl zvolen jeden zástupce technického konopí s vodorovným kladením (konkrétně se jednalo o Canabest BASIC), dále konopí STRUTO a ovčí vlna (použit byl vzorek s tloušťkou vlákna 23 μm). Vzorky byly měřeny ve stavu rovnovážné sorpční vlhkosti a poté do nich bylo vneseno 0,1 kg.kg⁻¹ (10 % hmotnostních) dodatečné vlhkosti. Vzorky byly zabaleny do PE fólie a ponechány 1 týden pro ustálení obsahu vlhkosti v jejich struktuře před samotným měřením. Poté bylo doplněno měření ve vysušeném stavu. Vzorky byly testovány ve stavu přirozené objemové hmotnosti a pro srovnání i při 30% stlačení. Zamýšleno bylo také měření při 50% stlačení, od něho však bylo posléze upuštěno. Vysoká vlhkost totiž vedla k významným změnám ve struktuře materiálů a při extrémním 50% stlačení hrozilo poškození vzorků.

Tabulka 12 - Přehled tepelné vodivosti v závislosti vlhkosti pro stlačení 0 a 30 %

Canabest BASIC	u [%]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	
		0 %	30 %
	0	0,0518	0,0436
Konopí STRUTO	u [%]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	
		0 %	30 %
	0	0,0449	0,0471
Ovčí vlna 23 μ m	u [%]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	
		0 %	30 %
	0	0,0379	0,0348
	u [%]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	
		0 %	30 %
	11,1	0,0405	0,0355
	u [%]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	
		0 %	30 %
	21,8	0,0486	0,0395



Graf 14 - Závislost tepelné vodivosti na teplotě pro stlačení 0 a 30%

Testováním byl prokázán předpoklad, že se zvyšující se vlhkostí vláknitých materiálů se zhoršují jejich tepelné izolační vlastnosti. Na vině je skutečnost, že voda se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda \approx 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ve struktuře materiálu postupně nahrazuje suchý vzduch ($\lambda \approx 0,025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Zároveň bylo prokázáno, že zmíněné zhoršování neprobíhá lineárně. Při nízkém obsahu vlhkosti je zhoršení nepatrné, při určitém, tzv. kritickém obsahu vlhkosti nabývá významných hodnot. Kritický obsah vlhkosti je u každého materiálu odlišný,

například u technického konopí byl předchozím výzkumem [74] nalezen v závislosti na objemové hmotnosti a dalších parametrech vzorků v rozmezí 0,05 až 0,08 kg.kg⁻¹ (5 až 8 % hmotnostních). Zde ho však vzhledem k nedostatečnému počtu měření v této oblasti nelze přesně určit.

Překvapivé jsou naopak výsledky v případě ovčí vlny, u které výzkumy udávají, že je schopna bez významného zhoršení vlastností pojmout ze vzduchu 30 až 35 % vlhkosti (některé zdroje uvádí dokonce až 65 % [57]) a v tomto případě již při obsahu vlhkosti 20 % bylo zhoršení značné. Zde by pravděpodobně bylo účelné sledovat časový průběh pronikání vlhkosti do struktury vláken, jelikož je pravděpodobné, že při kratší době působení vlhkosti by zhoršení tepelně izolačních vlastností bylo podstatně mírnější.

Vliv stlačení vzorku (tedy zvýšení objemové hmotnosti) na zhoršení tepelně izolačních schopností materiálu vlivem vlhkosti se projevoval u obou vzorků s vodorovným kladením pozitivně (tedy zhoršení bylo mírnější), u technického konopí s kolmým kladením tomu bylo naopak. Ze získaných výsledků nelze jednoznačně rozhodnout, zda je tato skutečnost způsobena přímo odlišnou výrobní technologií, či zda je příčinou například jiná poloha optimální objemové hmotnosti vůči objemové hmotnosti přirozené.

7.2. Etapa druhá – stanovení parametrů vláken

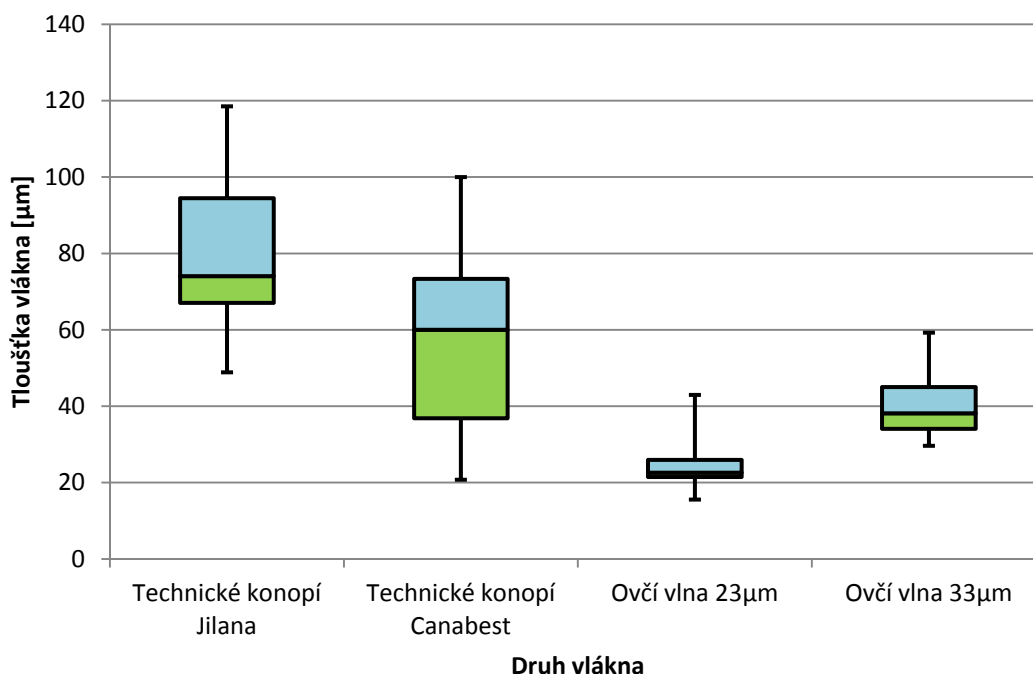
7.2.1. Stanovení tloušťky vláken

Tloušťka vláken byla stanovena komparační metodou pomocí optického mikroskopu, vybaveného okulárovým mikrometrem. Nejprve bylo provedeno srovnání s cejchovným podložním sklíčkem, pro kalibraci stupnice okulárového mikrometru. Jím bylo zjištěno, že jednomu dílku na stupnici okulárového mikrometru odpovídá skutečný rozměr 7,408 μm. Vlastní měření probíhalo na volných vláknech, získaných ze zbytků po výrobě zkušebních těles z izolačních rohoží. Pokud to okolnosti dovozovaly, byla odebírána neporušená vlákna z vnitřku struktury, nikoliv z řezné plochy, kde by mohly být jejich parametry narušeny při výrobě zkušebních těles. Pro experiment byla použita vlákna z technického konopí, používaného společností Canabest (vlákna, použitá pro výrobu produktů BASIC i PLUS, jsou dle údajů výrobce shodná, vlákna pro výzkum byla získána z produktu BASIC), dále technické konopí společnosti Jilana, odebrané ze vzorku s kolmým kladením a vlákna ovčí vlny obou tloušťek (23 a 33 μm). Aby bylo dosaženo dostatečné míry statistické objektivity, bylo u každého vzorku měřeno 30 vláken.

Následuje výčet základních statistických charakteristik, popisujících výsledky experimentu. Kompletní záznam z měření, obsahující veškeré výsledné tloušťky vláken, stejně jako jim odpovídající počty dílků, odečtené v okulárovém mikrometru, jsou uvedeny v příloze B této práce.

Tabulka 13 - Stanovení tloušťky vlákna - přehled hodnot

Statistická charakteristika	Technické konopí Jilana	Technické konopí Canabest	Ovčí vlna 23 μ m	Ovčí vlna 33 μ m
Průměr	79,71	56,89	24,42	40,47
Směrodatná odchylka	18,25	23,53	5,42	8,32
Minimum	48,89	20,74	15,56	29,63
25% kvantil	67,04	36,85	21,48	34,08
Medián	74,08	60,00	22,59	38,15
75% kvantil	94,45	73,34	25,93	45,00
Maximum	118,52	100,00	42,96	59,26

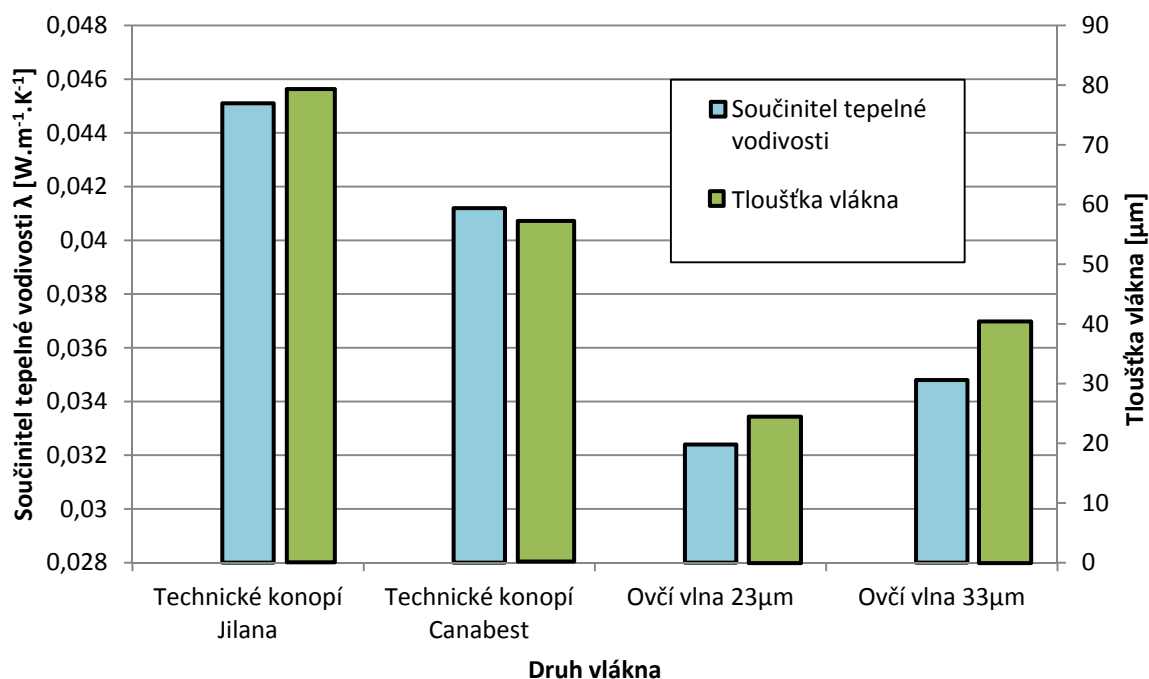


Graf 15 - Srovnání stanovených tloušťek vláken

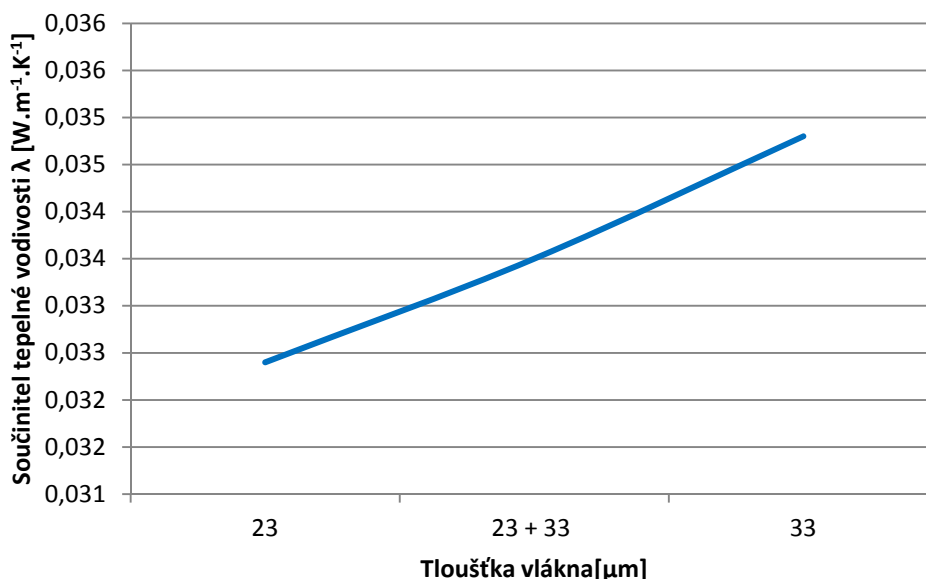
Při hodnocení výsledků stanovení tloušťky vláken testovaných přírodních materiálů bude oproti zvyklostem jako první diskutována ovčí vlna. Vzorek, u něhož výrobce udává složení z vláken tloušťky 23 μ m, s průměrnou hodnotou tloušťky vlákna 24,42 μ m a mediánem 22,59 μ m tuto skutečnost prokázal. Navíc, jak je patrné z velmi blízkých kvartilů, nadpoloviční většina vláken vykazuje malý rozptyl od střední hodnoty. Proto lze konstatovat, že se jedná o kvalitní vláknennou surovinu a z ní vyráběné rohože by měly vykazovat dobrou opakovatelnost a relativně snadnou predikovatelnost výsledných vlastností. Totéž do jisté míry platí i o ovčí vlně tloušťky 33 μ m, ačkoliv v jejím případě již je rozptyl mírně větší.

Hlavním poznatkem však je, že stanovená průměrná tloušťka vlákna má hodnotu 40,47 μm (medián 38,15 μm), což je o 22 % (15 % v případě mediánu) více, než tloušťka 33 μm , udávaná výrobcem. Ve své podstatě to není na závadu, jen je třeba s touto skutečností uvažovat při možné optimalizaci skladby daného výrobního procesu.

Na rozdíl od ovčí vlny technické konopí v obou případech vykazovalo výrazně větší tloušťku vlákna a také značný rozptyl hodnot. Ačkoliv předpokladem bylo, že tloušťka vlákna bude u obou vlákenných surovin srovnatelná, z výsledků zkoušky vyplývá, že technické konopí Canabest má znatelně nižší tloušťku (průměrná 56,89 μm , medián 60,00 μm), než konopí Jilana (průměrná 79,71 μm , medián 74,08 μm), avšak vzhledem k již zmiňovanému značnému rozptylu a překrývání hodnot (například 3. kvartil konopí Canabest odpovídá mediánu konopí Jilana) nelze tento závěr brát jako dogma a pokud by bylo měření opakováno například v jiné dodávce vstupní suroviny, nelze vyloučit zjištění poněkud odlišných výsledků.



Graf 16 - Srovnání tepelných vodivostí s tloušťkou vlákna



Graf 17 - Závislost tepelné vodivosti na tloušťce vlákna, sestavená pro ovčí vlnu

Pro zhodnocení vlivu tloušťky vlákna na tepelně izolační schopnosti jednotlivých materiálů jsou prezentovány výsledky z první etapy předkládaného výzkumu. Aby byl vyloučen jinak velmi významný vliv objemové hmotnosti, byly použity nejnižší dosažitelné hodnoty součinitele tepelné vodivosti při předpokládané optimální objemové hmotnosti materiálu. Jak je patrné z grafu 16, u všech vzorků se projevuje velmi silná závislost mezi tloušťkou vlákna a tepelnou vodivostí z něho vyrobeného materiálu. Přestože se jedná o výsledky dvou po chemické stránce odlišných materiálů (tedy ovčí vlny a konopí) a proto nelze tyto výsledky přímo srovnávat, trend závislosti tloušťky vlákna a tepelné vodivosti je dobře patrný. Ostatně závislost těchto veličin, sestavená pro ovčí vlnu, kde je přímé srovnání srovnání zcela korektní, je striktně lineární, jak je patrné z grafu 17. Vliv tloušťky vlákna na tepelnou vodivost vláknitých materiálů byl tedy jednoznačně prokázán.

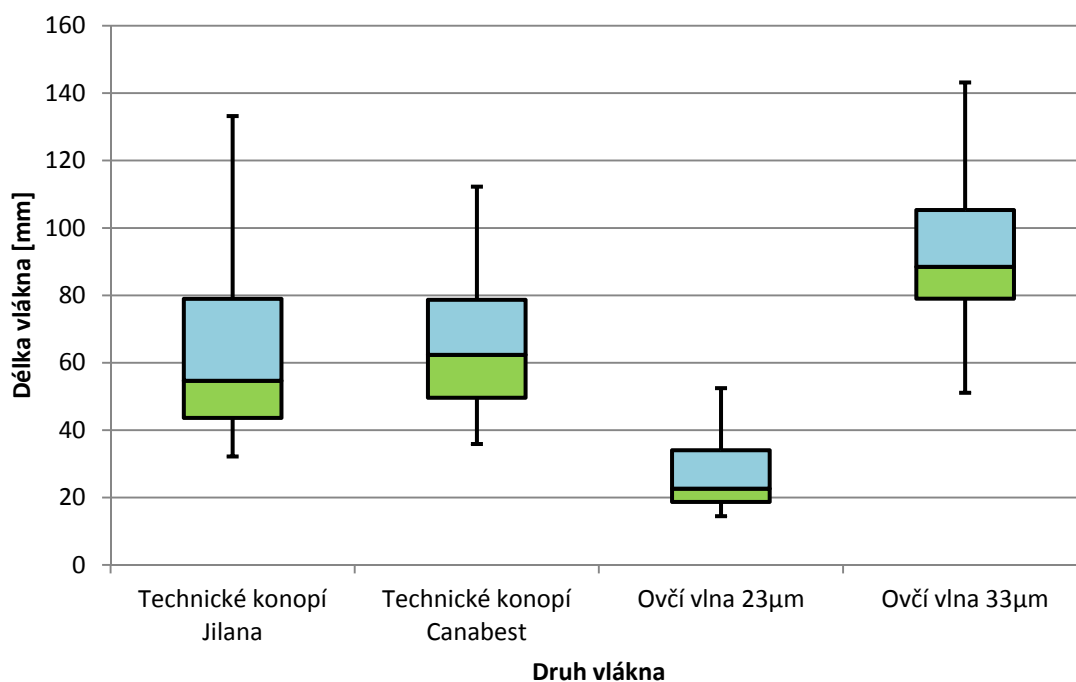
Překvapivé jsou opět výsledky u vzorku z technického konopí s kolmým kladením. Podle předpokladu, prokázaného předchozími výzkumy na jiných materiálech, by měla kolmá orientace vláken způsobovat zhoršení tepelně izolačních vlastností oproti materiálům, kladeným vodorovně. Zde se však tuto skutečnost nepodařilo prokázat. Dokonce zcela v protikladu k ní vykázal vzorek s kolmým kladením lepší tepelně izolační schopnost ve vztahu k tloušťce vlákna, než vzorek s orientací vodorovnou. Zde nelze zcela vyloučit možnost, že vzorek vláken, na nichž byla stanovována tloušťka, nebyl dostatečně reprezentativní, čímž mohlo dojít ke zkreslení výsledků.

7.2.2. Stanovení délky vláken

Délka vláken byla stanovena přímým měřením kovovým pravítkem na volných vláknech, použitých zároveň pro mikroskopické stanovení tloušťky. Obdobně jako při stanovení tloušťky, i zde bylo provedeno 30 měření pro každý druh vláken. V následující tabulce jsou opět uvedeny pouze základní statistické charakteristiky a kompletní záznam z měření je obsahem přílohy B.

Tabulka 14 - Stanovení délky vlákna - přehled hodnot

Statistická charakteristika	Technické konopí Jilana	Technické konopí Canabest	Ovčí vlna 23 μ m	Ovčí vlna 33 μ m
Průměr	64,03	66,24	28,11	92,01
Směrodatná odchylka	24,46	19,22	12,04	20,22
Minimum	32,20	35,90	14,50	51,10
25% kvantil	43,63	49,63	18,73	79,00
Medián	54,65	62,35	22,65	88,45
75% kvantil	78,98	78,68	34,03	105,33
Maximum	133,20	112,30	52,50	143,20

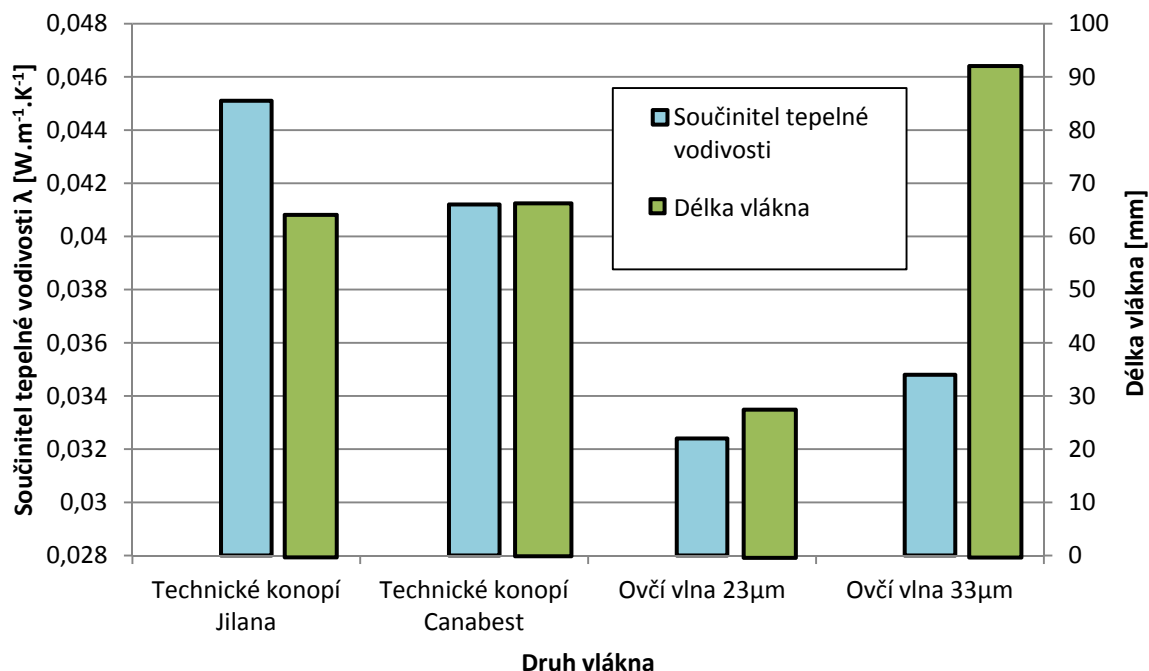


Graf 18 - Srovnání stanovených délek vláken

Délky vlákna u všech testovaných vzorků vykázaly značný rozptyl hodnot. Tento závěr je logický, neboť délka rostlinných vláken je dána především podmínkami jejich růstu, případně také způsobem zpracování. U ovčí vlny je rozhodujícím faktorem plemeno ovce, ale také interval stříhání a část těla ovce, ze které vlákno pochází. Délku vlákna tedy, na rozdíl od jeho tloušťky, také zpravidla nelze dostatečně přesně předvídat.

Co se týče konkrétních hodnot, Obě technická konopí zde prokázala srovnatelné hodnoty (Canabest průměr 66,24 mm a medián 62,35 mm, Jilana průměr 64,03 mm a medián 54,65 mm). Ovčí vlna tloušťky 23 μm prokázala průměrnou délku pouze 28,11 mm (s mediánem 22,65 mm), tato vlákna však vzhledem k malé tloušťce vykazovala velmi silný sklon k přetržení i při šetrném zacházení, proto skutečná hodnota může být vyšší (což by vysvětlovalo značně vysoké hodnoty 3. kvartilu a maxima). U Ovčí vlny tloušťky 33 μm byla stanovena největší délka z daného souboru (průměr 92,01 mm, medián 88,45 mm), ale také nejvyšší rozptyl hodnot.

Na grafu 19 je provedeno srovnání zjištěných délek vláken s optimálním součinitelem tepelné vodivosti, stanoveným v rámci první etapy. Z grafu je však patrné, že tyto parametry na sobě přímo závislé nejsou. Tím je potvrzen úvodní předpoklad i předchozí zahraniční výzkumy. Lze proto konstatovat, že délka použitého vlákna nemá významný vliv na tepelně izolační vlastnosti vyráběného produktu.



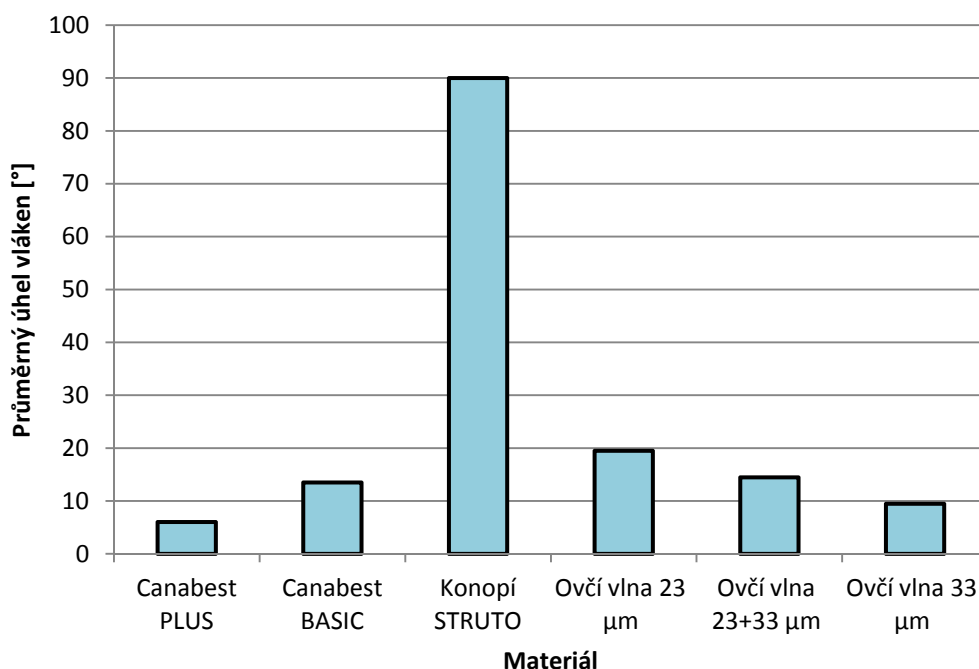
Graf 19 - Srovnání tepelných vodivostí s délkou vlákna

7.2.3. Stanovení orientace vláken

Průměrná orientace vláken v izolačních rohožích byla určena na všech vzorcích makroskopickým hodnocením úhlu vláken ve směru kolmém k předpokládanému směru tepelného toku na řezu materiálem. Výsledný průměrný úhel byl stanoven jako vážený průměr jednotlivých úhlů, stanovených v kroku po 10°, kde vahou je procentuální zastoupení vláken, orientovaných v těchto úhlech.

Tabulka 15 - Stanovení průměrné orientace vláken

Úhel [°]	Canabest BASIC	Canabest PLUS	Konopí STRUTO	Ovčí vlna 23μm	Ovčí vlna 23+33μm	Ovčí vlna 33μm
0	30	60	0	50	55	65
10	45	25	0	15	15	15
20	0	10	0	0	5	0
30	15	5	0	10	10	10
40	10	0	0	10	8	7
60	0	0	0	10	5	3
90	0	0	100	5	2	0
Průměr	13	6	90	19	13,5	9,1



Graf 20 - Srovnání průměrné orientace vláken

Z výsledků je patrné, že zatímco kolmé kladení u vzorku konopí STRUTO bylo opravdu kolmé, žádný ze vzorků s vodorovným kladením nebyl dokonale vodorovný, ačkoliv odchylky od vodorovné roviny zpravidla nejsou významné. Zajímavá věc byla zjištěna v případě ovčí vlny. Zatímco silnější 33 μm vlákna dobře drží tvar a vodorovnou orientaci, slabší 23 μm vlákna mají velmi silný sklon k plstnatění a kroucení. Na vině je kromě zmíněné malé tloušťky pravděpodobně také malá délka, která vlákna nedostatečně fixuje do struktury izolační rohože. Tento vliv je velmi obtížně kvantifikovatelný, protože směr a míra kroucení vláken mohou být značně odlišné, do výzkumu byl orientačně zahrnut zvětšením úhlu orientace vláken.

Z hlediska tepelně izolačních schopností je výchozím předpokladem, že optimální orientace vláken je kolmo na směr tepelného toku, tedy ideálně vodorovně, naproti tomu kolmé kladení (tedy orientace vláken ve směru tepelného toku) vede k horším vlastnostem. Tento předpoklad je již dobře ověřen v případě materiálů z minerálních vláken. V rámci tohoto výzkumu a s ohledem na materiály, dostupné pro testování, není možné zmíněný závěr spolehlivě potvrdit ani vyvrátit, zejména proto, že v případě zkušebních vzorků nelze eliminovat vliv tloušťky vlákna, který, jak bylo prokázáno, má na tepelně izolační schopnosti vláknitých materiálů dominantní vliv.

Je však třeba zmínit některé dílčí závěry, například že ovčí vlna s tloušťkou 23 μm , právě díky velmi malé tloušťce vlákna, vykazuje ze všech testovaných vzorků nejlepší tepelně izolační schopnosti, navzdory zmiňovanému sklonu k plstnatění a ze všech materiálů s vodorovným kladením nejnepríznivější orientací vláken a také konopí s kolmým kladením zcela v rozporu s očekáváním vykazalo velmi dobré tepelně izolační schopnosti. Závěrem proto může být, že vzhledem k nižšímu součiniteli tepelné vodivosti vlastních vláken není u izolačních materiálů na bázi přírodních vláken orientace vláken natolik významným vlivem, jako v případě materiálů z vláken minerálních a tyto vlastnosti jsou mnohem významněji ovlivňovány například tloušťkou vlákna.

7.3. Etapa třetí – zhodnocení výsledků zkoušek

Zhodnocení výsledků z předcházejících etap bylo provedeno podle ČSN EN ISO 10 456. [86] Obsahem této normy jsou kromě jiného postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových hodnot součinitele tepelné vodivosti pro tepelně homogenní stavební materiály a výrobky, a také metody pro přepočítání těchto hodnot, stanovených při referenčních podmínkách teploty a vlhkosti na jiný soubor podmínek (v rozmezí -30 až +60 °C), s ohledem například na konkrétní podmínky v místě zabudování do stavební konstrukce. Referenčními podmínkami pro měření jsou ve smyslu této normy referenční teplota (10±0,3) °C nebo (20±0,3) °C a vlhkost buďto nulová, nebo rovnovážná sorpční při

uložení vzorků v laboratorních podmínkách při teplotě $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu $(50 \pm 5)\%$ po dobu nejméně 6 hodin.

Základním postupem pro přepočet tepelných hodnot ve smyslu této normy je řešení vztahu:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \times F_T \times F_M \times F_a \quad (7)$$

kde: λ_2 – je součinitel tepelné vodivosti při přepočtených podmínkách $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

λ_1 – je součinitel tepelné vodivosti při referenčních podmínkách $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

F_T – je převodní teplotní faktor [-]

F_M – je převodní vlhkostní faktor [-]

F_a – je vliv stárnutí [-]

Vliv stárnutí F_a se u stavebních izolačních materiálů vzhledem k jejich nenosnému charakteru a také skutečnosti, že obvykle nepřichází do přímého styku s povětrnostními vlivy, za normálních podmínek zanedbává. Naproti tomu převodní faktory pro teplotu a vlhkost mají velmi významný vliv.

Převodní teplotní faktor stanovíme ze vztahu:

$$F_T = e^{f_T \times (T_2 - T_1)} \quad (8)$$

kde: F_T – je převodní teplotní faktor [-]

f_T – je převodní teplotní součinitel $[\text{K}^{-1}]$

T_2 – je přepočtená teplota $[\text{K}]$

T_1 – je referenční teplota $[\text{K}]$

Obdobně jako převodní teplotní faktor je definován také převodní vlhkostní faktor. Zde je možné s ohledem na způsob zadání okrajových podmínek zvolit převodní faktor pro vlhkost hmotnostní či objemovou, dle vztahů:

a)

$$F_M = e^{f_u \times (u_2 - u_1)} \quad (9)$$

kde: F_M – je převodní vlhkostní faktor [-]

f_u – je převodní součinitel pro hmotnostní vlhkost $[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$

u_2 – je přepočtená hmotnostní vlhkost $[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$

u_1 – je referenční hmotnostní vlhkost $[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$

b)

$$F_M = e^{f_\psi \times (\psi_2 - \psi_1)} \quad (10)$$

kde: F_M – je převodní vlhkostní faktor [-]
 f_ψ – je převodní součinitel pro objemovou vlhkost [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]
 ψ_2 – je přepočtená objemová vlhkost [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]
 ψ_1 – je referenční objemová vlhkost [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]

Převodní součinitele pro teplotu a vlhkost jsou pro základní stavební materiály pro rozmezí teplot 0 – 30 °C uvedeny v příloze A této normy. Z oblasti vláknitých tepelně izolačních materiálů jsou tabelovány pouze hodnoty pro minerální vlnu (a také výrobky z dřevní vlny), pro materiály z přírodních vláken však převodní součinitele dosud nebyly definovány, proto v jejich případě uvedené přepočtení vztahy nejsou použitelné. S cílem doplnit tento nedostatek proto byly stanoveny převodní součinitele pro teplotu a vlhkost pro materiály, testované v předcházejících etapách práce, tedy technické konopí s vodorovným kladením, dále technické konopí STRUTO s kolmým kladením a ovčí vlnu, a to v rozsahu podmínek, stanovených prezentovaným výzkumem.

Výpočetní vztah pro stanovení převodního teplotního součinitele f_T byl získán dosazením vztahu (8) do vztahu (7) a následným vyjádřením:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \times e^{f_T \times (T_2 - T_1)}$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = e^{f_T \times (T_2 - T_1)}$$

$$f_T = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}{T_2 - T_1} \quad (11)$$

Analogicky lze provést odvození vztahů pro výpočet převodního součinitele pro hmotnostní vlhkost (dosazením vztahu (9) do (7)) a objemovou hmotnost (dosazením vztahu (10) do (7)).

$$f_u = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}{u_2 - u_1} \quad (12)$$

$$f_\psi = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}{\psi_2 - \psi_1} \quad (13)$$

Tabulka 16 - Převodní teplotní součinitele pro technické konopí

Typ výrobku	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Převodní teplotní součinitel f_T [K ⁻¹]
Canabest BASIC	0,052	0,0087
	0,048	0,0077
	0,044	0,0068
	0,040	0,0072
Canabest PLUS	0,053	0,0083
	0,049	0,0063
	0,045	0,0063
	0,041	0,0049
Konopí s kolmým vláknem STRUTO	0,045	0,0052
	0,048	0,0044
	0,051	0,0037

Tabulka 17 - Převodní teplotní součinitele pro ovčí vlnu

Typ výrobku	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Převodní teplotní součinitel f_T [K ⁻¹]
Ovčí vlna 23 μm	0,040	0,0120
	0,037	0,0078
	0,034	0,0053
	0,031	0,0038
Ovčí vlna 33 μm	0,046	0,0089
	0,042	0,0080
	0,038	0,0065
	0,034	0,0067
Ovčí vlna 23 + 33 μm	0,042	0,0112
	0,039	0,0074
	0,036	0,0063
	0,033	0,0057

V předcházejících tabulkách jsou uvedeny převodní teplotní součinitele pro jednotlivé přírodní vláknité materiály, určené dle vztahu (11). Ty jsou stanoveny pro hodnoty součinitele tepelné vodivosti, zjištěné při referenčních podmínkách střední teploty (10±0,3) °C a rovnovážné sorpční vlhkosti při kondicionování vzorků při (23±2) °C a (50±5) % relativní vzdušné vlhkosti. Převodní součinitele byly stanoveny soubor hodnot součinitele tepelné vodivosti, pokrývající očekávaný obvyklý rozsah pro jednotlivé materiály. Pro stanovení

mezilehlých hodnot se použije lineární interpolace. Součinitele jsou stanoveny pro rozmezí teplot 0 až 20 °C.

Tabulka 18 - Převodní součinitele pro hmotnostní vlhkost u zkoumaných materiálů

Typ výrobku	Hmotnostní vlhkost u [kg.kg ⁻¹]	Převodní součinitel pro hmotnostní vlhkost f_u [kg.kg ⁻¹]
Konopí s vodorovným vláknem	< 0,19	0,47
Konopí s kolmým vláknem	< 0,15	1,36
Ovčí vlna	< 0,21	1,71

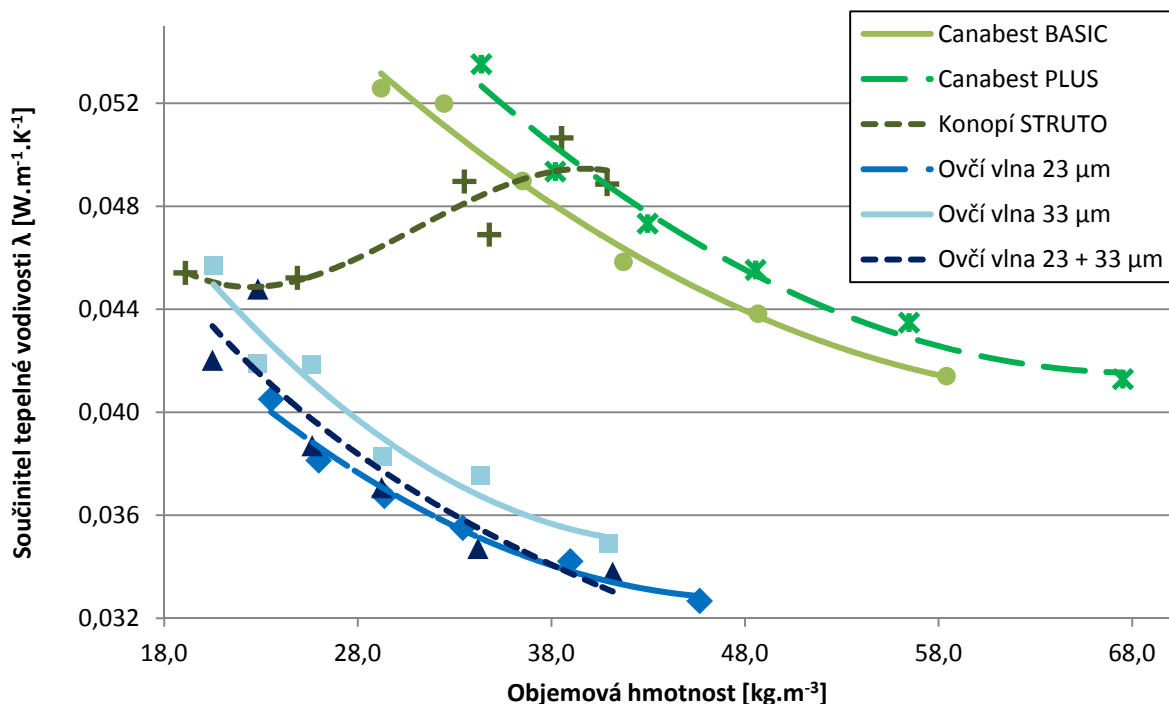
Převodní součinitele pro hmotnostní vlhkost byly určeny dle vztahu (12). Údaje o obsahu vlhkosti jsou uvedeny v rovnovážném stavu při teplotě vzduchu (23±2) °C a relativní vlhkosti vzduchu (50±5) %. Vliv přenosu hmoty vodou v kapalně fázi a fázi vodní páry a vliv změn fáze vody nejsou zahrnuty v těchto údajích. Součinitele platí pro oblast obsahu vlhkosti, uvedené v tabulce 18.

8. Diskuze výsledků

8.1. Etapa první – stanovení fyzikálních vlastností

Cílem první etapy výzkumu bylo především stanovení tepelně izolačních schopností vybraných rohoží z přírodních vláken a studium vlivu objemové hmotnosti, teploty a vlhkosti materiálu a rychlosti proudění vzduchu uvnitř materiálu na tyto vlastnosti.

Souhrnné závěry studia vlivu objemové hmotnosti jsou zobrazeny na grafu 21, který je sestaven pro hodnoty, získané při střední teplotě 10 °C ve stavu rovnovážné sorpční vlhkosti. Výstupem je nejen průběh závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti u jednotlivých materiálů, ale také optimální hodnoty objemové hmotnosti pro dosažení minimální tepelné vodivosti.



Graf 21 - Souhrn závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti

Je patrné, že vzorky technického konopí s vodorovným kladením (tedy Canabest BASIC a PLUS) jsou vyráběny s objemovou hmotností kolem 30 kg.m⁻³ (konkrétně u produktu BASIC bylo zjištěno 29,2 kg.m⁻³, u produktu PLUS pak 34,4 kg.m⁻³), díky níž dosahují hodnot součinitele tepelné vodivosti 0,0526 W.m⁻¹.K⁻¹ v případě produktu BASIC a 0,0535 W.m⁻¹.K⁻¹ u PLUS, ačkoliv jejich teoretické optimum objemové hmotnosti se nachází až v okolí 70 kg.m⁻³ (u produktu PLUS byla jako optimální vyhodnocena poslední

dosažená hodnota $67,5 \text{ kg.m}^{-3}$, u BASIC bylo kvadratickou regresí vytipováno rozmezí $65 \text{ až } 75 \text{ kg.m}^{-3}$), kde dosahují o poznání příznivějších hodnot $0,0410 \text{ až } 0,0414 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ BASIC a $0,0413 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ PLUS. Další zjištěnou skutečností je, že tepelně izolačními schopnostmi se od sebe produkty BASIC a PLUS významně neliší, rozdíl mezi materiály je dán rozdílnou objemovou hmotností. Nicméně při stlačení materiálů na stejnou objemovou hmotnost bylo zjištěno, že materiál BASIC vykazuje ve srovnání s materiálem PLUS mírně lepší vlastnosti. Pokud tyto hodnoty srovnáme s výsledky zahraničních výzkumných projektů (viz tabulka 1), zjistíme, že technické konopí má velmi dobré tepelně izolační schopnosti, konkurovat mu z ostatních rostlinných vláken mohou snad pouze stonky cukrové třtiny a kokosové vlákno.

Velmi zajímavých a dosti nečekaných výsledků dosáhl vzorek technického konopí s kolmým kladením (STRUTO). Testovaná rohož vykazovala součinitel tepelné vodivosti $0,0454 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ při velmi nízké přirozené objemové hmotnosti $19,1 \text{ kg.m}^{-3}$. Poněkud překvapivé je, že optimální objemová hmotnost leží velmi blízko této běžné výrobní objemové hmotnosti (konkrétně je to v rozmezí $20 \text{ až } 25 \text{ kg.m}^{-3}$) s předpokládaným součinitelem tepelné vodivosti $0,0450 \text{ až } 0,0452 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ačkoliv je tedy tato teoretická minimální tepelná vodivost méně výhodná, než v případě konopí s vodorovným kladením ($0,0410 \text{ až } 0,0414 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), lze jí dosáhnout s až 3x menší spotřebou vlákenné suroviny. Samozřejmě i tento materiál má své nedostatky. Hlavním z nich je omezená tloušťka vyráběných rohoží. Tu lze zvýšit slepením či nakaširováním více rohoží na sebe, výsledkem je však komplikovanější výrobní proces a další energetické, případně i materiálové vstupy. Dalším nedostatkem jsou problémy se stejnoměrností objemové hmotnosti materiálu. Výsledkem je omezená garance vlastností výrobků. I přesto však má tento materiál před sebou nepochybně slibnou budoucnost. Bude však zapotřebí dalšího výzkumu a prohloubení znalostí o jeho chování v různých podmínkách.

Vzorky ovčí vlny vykazaly výrazně lepší tepelně izolační vlastnosti, než technické konopí i ostatní rostlinná vlákna. Při objemové hmotnosti $23,5 \text{ kg.m}^{-3}$ u vlny z vláken tloušťky $23 \text{ }\mu\text{m}$ a $20,5 \text{ kg.m}^{-3}$ u ostatních dvou vzorků byl stanoven součinitel tepelné vodivosti $0,0405 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pro vlnu $23 \text{ }\mu\text{m}$, dále $0,0457 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pro vlnu $33 \text{ }\mu\text{m}$ a $0,0420 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pro vlnu ze směsi vláken. Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti vykazuje obdobný charakter, jako v případě vodorovně kladeného technického konopí. Nejvýhodnější tepelně izolační schopnosti prokázal vzorek, zhotovený z vlákna tloušťky $23 \text{ }\mu\text{m}$, konkrétně $0,0322 \text{ až } 0,0326 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ při objemové hmotnosti $45 \text{ až } 52 \text{ kg.m}^{-3}$, vzorek z $33 \text{ }\mu\text{m}$ dosáhl stále ještě velmi příznivé, i když mírně vyšší hodnoty $0,0346 \text{ až } 0,0350 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ při objemové hmotnosti $42 \text{ až } 47 \text{ kg.m}^{-3}$. Vzorek ze směsi vláken prokázal při optimální objemové hmotnosti $40 \text{ až } 45 \text{ kg.m}^{-3}$ součinitel tepelné vodivosti $0,0332 \text{ až } 0,0338 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, tedy hodnotu takřka uprostřed mezi výsledky vzorků z čistých vláken. Není bez zajímavosti, že ačkoliv optimální tepelná vodivost u tohoto vzorku nedosahuje tak nízkých hodnot, jako u vzorku z $23 \text{ }\mu\text{m}$ vláken, pro její dosažení postačuje

o 5 až 10 kg.m⁻³ nižší objemová hmotnost (což může poskytnout 10 až 20 % úsporu materiálu).

Provedené zkoumání vlivu teploty na součinitel tepelné vodivosti v rozsahu teplot 0 až 20 °C prokázalo lineární závislost uvedených veličin u všech testovaných vzorků. Tato skutečnost je způsobena vlivem sálání, které se projevuje u všech těles teplejších než 0 K a s teplotou lineárně stoupá. Při vyšších teplotách se také zvyšuje intenzita transportu tepla prouděním. Taktéž negativní vliv vlhkosti na průběh součinitele tepelné vodivosti v důsledku nahrazování vzduchu uvnitř struktury vláknitého materiálu vodou byl prokázán. Na rozdíl od teploty však nepůsobí lineárně. Tepelně izolační schopnosti zhoršuje nejprve mírně, významné zhoršení nastává až při tzv. kritickém obsahu vlhkosti. Ten je pro různé materiály odlišný, vzhledem k nedostatečnému rozsahu měření se ho v rámci této práce u zkoumaných materiálů nepodařilo nalézt. Dále bylo zjištěno, že při zvyšování objemové hmotnosti materiálu mírně klesá vliv vlhkosti na tepelně izolační schopnosti.

Rychlost proudění vzduchu strukturou vláknitého materiálu nebyla z technických důvodů stanovena na vzorku technického konopí s kolmým vláknem. U ostatních vzorků byly zjištěny výsledky ve vcelku očekávaném rozmezí 0,11 až 0,17 m.s⁻¹. Na vzorcích technického konopí byla prokázána závislost na objemové hmotnosti obdobná, jako v případě tepelné vodivosti, tedy rychlost proudění postupně klesala až do teoretického optima objemové hmotnosti. Stejně tak závislost rychlosti proudění na teplotě, stanovená na materiálu BASIC, korespondovala se závislostí tepelné vodivosti na teplotě, což vede k závěru, že rychlost proudění uvnitř struktury izolační rohože z technického konopí je přímo úměrná hustotě tepelného toku, procházejícího materiálem. V případě ovčí vlny se však tento závěr potvrdit nepodařilo. Vzorky z čistých vláken 23 μm a 33 μm zmiňovanou závislost nevykázaly vůbec a směsný vzorek jen omezeně. Skutečný důvod tohoto jevu není přesně znám, pravděpodobně však je průvzdušnost ovčí vlny natolik velká, že ani při zvýšení objemové hmotnosti není schopna proudění vzduchu bránit. Svůj vliv mohou mít také odlišné mechanické vlastnosti vlněných vláken.

8.2. Etapa druhá – stanovení parametrů vláken

Náplní druhé etapy bylo studium parametrů jednotlivých surových vláken a jejich vlivu na tepelně izolační schopnosti budoucích izolačních materiálů. Konkrétně bylo provedeno stanovení tloušťky, délky a orientace vláken.

Při mikroskopickém stanovení tloušťky vláken bylo zjištěno, že technické konopí dosahuje výrazně vyšších tloušťek vlákna (konkrétně u konopí Canabest byla průměrná tloušťka 56,89 μm a medián 60,00 μm, u konopí Jilana dokonce průměr 79,71 μm a medián 74,08 μm), než ovčí vlna (u 23 μm vlny byl zjištěn průměr 24,42 μm a medián 22,59 μm, u 33 μm vlny to bylo průměrně 40,47 μm s mediánem 38,15 μm). U technického konopí byl

v porovnání s ovčí vlnou zjištěn také značný rozptyl daných hodnot. Právě velký rozptyl hodnot vrhá pochybnost na zjištěný rozdíl hodnot tloušťky vlákna u konopí Canabest a Jilana, neboť dané hodnoty měly být podle předpokladů srovnatelné.

Porovnáním zjištěných hodnot tloušťky vlákna s tepelně izolačními vlastnostmi, stanovenými v první etapě, byl zjištěn přímý a velmi výrazný vliv tloušťky vlákna na hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Toto je pravděpodobně nejvýznamnější (nikoliv však jediný) důvod výrazně lepších tepelně izolačních schopností ovčí vlny. Vzorek technického konopí s kolmým kladením vykázal zcela v protikladu ke všem předpokladům lepší tepelně izolační vlastnosti ve vztahu k tloušťce vlákna než vzorek Canabest BASIC, kladený vodorovně. Tento závěr je velmi překvapivý, neboť výsledky výzkumů, provedených na jiných materiálech prokazují opak (například v případě minerální vlny zhoršuje kolmá orientace vláken tepelně izolační schopnosti až o 15 %). Ačkoliv v případě technického konopí byl tento vliv očekáván ve srovnání s vlákny minerálními nižší, vzhledem k nižšímu součiniteli tepelné vodivosti vlastních vláken, jeho naprostá absence je velmi nečekaná. Proto se nabízí možné vysvětlení, že vzorek vláken, na nichž byla stanovována tloušťka, nebyl vzhledem ke zjištěnému značnému rozptylu hodnot dostatečně reprezentativní a tím mohlo dojít ke zkreslení výsledků.

Co se týče délky vlákna, vykázala obě technická konopí srovnatelné hodnoty (Canabest průměr 66,24 mm a medián 62,35 mm, Jilana průměr 64,03 mm a medián 54,65 mm). Ovčí vlna tloušťky 23 μm prokázala průměrnou délku pouze 28,11 mm (s mediánem 22,65 mm), naopak vlna tloušťky 33 μm dokonce až 92,01 mm (medián 88,45 mm). Délky vlákna u všech testovaných vzorků podléhaly značnému rozptylu hodnot. Je to logický závěr, neboť zatímco u umělých vláken lze jejich parametry relativně snadno ovlivnit změnou výrobního procesu, parametry vláken přírodních plně závisí na podmínkách růstu a člověkem ovlivnitelné jsou jen velmi omezeně. Srovnáním hodnot délky vlákna s výsledky první etapy stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo zjištěno, že délka použitého vlákna nemá významný vliv na tepelně izolační vlastnosti vyráběného produktu.

Průměrný úhel orientace vláken v izolační rohoži byl stanoven na základě makroskopického hodnocení. Zatímco vzorek s kolmým kladením měl orientaci vláken skutečně téměř ideálně kolmou, vzorky s vodorovným kladením ideálně vodorovné nebyly. Technické konopí však vykázalo úhel obecně srovnatelný s ovčí vlnou (Canabest BASIC 13°, Canabest PLUS 6°, dále ovčí vlna 23 μm 19°, vlna 33 μm 9,1° a vlna směsná 13,5°). Ačkoliv dle obecné teorie vláknitých materiálů je optimální orientace vláken kolmo na směr tepelného toku, tedy ideálně vodorovná, a veškeré odchylky od striktní vodorovné orientace vedou k určitému zhoršení tepelně izolačních vlastností, přičemž nejméně vhodná je orientace kolmá, u přírodních vláknitých materiálů se tento předpoklad potvrdit nepodařilo, pravděpodobně z důvodu relativně nízkého součinitele tepelné vodivosti vlastních vláken, v porovnání s vlákny umělými. Lze proto tvrdit, že pokud jsou vlákna orientována přibližně

vodorovně, vliv orientace je v porovnání například s vlivem tloušťky vlákna takřka zanedbatelný.

8.3. Etapa třetí – zhodnocení výsledků zkoušek

Významným přínosem práce pro stavební praxi je zhodnocení výsledků z předcházejících etap podle ČSN EN ISO 10 456, kde jsou uvedeny postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových hodnot součinitele tepelné vodivosti pro tepelně homogenní stavební materiály a výrobky, a také metody pro přepočet těchto hodnot, stanovených při referenčních podmínkách teploty a vlhkosti na jiný soubor podmínek. V normě se nacházející převodní součinitele pro teplotu a vlhkost jsou definovány pouze pro běžně používané izolační materiály na bázi minerálních vláken či pěněných plastů, a proto byly stanoveny převodní součinitele také pro zkoumané materiály z přírodních vláken, aby bylo možné uvedené přepočtové metody využít i v jejich případě.

Převodní teplotní součinitele, stanovené pro všechny zkoumané materiály pro rozmezí teplot 0 až 20 °C jsou uvedeny v tabulkách 16 a 17. Určeny jsou pro hodnoty součinitele tepelné vodivosti, zjištěné při referenčních podmínkách střední teploty $(10 \pm 0,3)$ °C a rovnovážné sorpční vlhkosti při kondicionování vzorků při (23 ± 2) °C a (50 ± 5) % relativní vzdušné vlhkosti.

Převodní součinitele pro hmotnostní vlhkost se nachází v tabulce 18. Údaje o obsahu vlhkosti jsou uvedeny v rovnovážném stavu při teplotě vzduchu (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti vzduchu (50 ± 5) .

E. ZÁVĚR

Cílem práce bylo studium mechanismů šíření tepla a vlhkosti ve struktuře tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken. Pro tento účel bylo vybráno několik zástupců přírodních vláknitých izolačních materiálů. Jednalo se o technické konopí s vodorovným kladením Canabest BASIC a Canabest PLUS, a dále ovčí vlnu tloušťky vlákna 23 μm , 33 μm a směs těchto vláken. Sada vzorků byla doplněna o inovativní produkt technického konopí s kolmým kladením vlákna. Na těchto vzorcích byla provedena série měření, hodnotících faktory, ovlivňující tepelně vlhkostní chování materiálů na bázi přírodních vláken. Jednak to byl velice významný vliv objemové hmotnosti, dále pak podmínky prostředí (teplota a vlhkost) a v neposlední řadě parametry vlastních vláken (jejich tloušťka, délka a orientace). Pro ověření vlivu proudění vzduchu strukturou materiálů bylo provedeno měření rychlosti proudění vzduchu strukturou materiálu anemometrem.

Výsledkem stanovení závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti materiálu bylo zjištění, že konkrétně v případě technického konopí výrobce dodává na trh materiál s objemovou hmotností kolem 30 kg.m^{-3} , při které materiál dosahuje součinitele tepelné vodivosti řádově 0,053 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, ačkoliv při zvýšení objemové hmotnosti na zjištěné optimum 70 kg.m^{-3} by součinitel tepelné vodivosti poklesl až na 0,041 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, tedy přibližně o 20 %. Z logiky věci však vyplývá více než dvojnásobná spotřeba materiálu. Jinak řečeno, výrobce za cenu úspory materiálu (a tedy i nákladů) raději na trh dodává materiál, jehož potenciálu není plně využito, protože optimalizace tepelně izolačních vlastností se jednoduše nevyplatí. Vzhledem k tomu se jako velmi zajímavá alternativa jeví materiál s kolmou orientací vláken, zhotovený technologií STRUTO, u něhož byl stanoven nejnížší dosažitelný součinitel tepelné vodivosti 0,045 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, tedy mírně horší, než v předchozím případě, ovšem již při objemové hmotnosti 20 až 25 kg.m^{-3} . U tohoto materiálu bude třeba nejprve odstranit některé technické nedostatky (malá maximální tloušťka, nestejněměrná objemová hmotnost) a zcela jistě bude zapotřebí dalšího výzkumu pro ověření jeho chování za různých podmínek, pokud však bude pokračovat tlak na co nejnížší spotřebu surovin, tento materiál má značný potenciál.

V porovnání s technickým konopím ovčí vlna dosáhla výrazně lepších tepelně izolačních schopností. Při dodané objemové hmotnosti kolem 20 kg.m^{-3} vykázal vzorek, zhotovený z 33 μm vláken hodnotu součinitele tepelné vodivosti 0,046 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, vzorek z 23 μm vláken dokonce pouze 0,041 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, tedy obdobnou, jaká je v případě technického konopí optimální. Při dosažení optima (v rozmezí 40 až 50 kg.m^{-3}) je to pak 0,035 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ u vzorku z 33 μm vláken a 0,032 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ u vzorku z 23 μm vláken (vzorek ze směsi vláken svými hodnotami leží téměř přesně uprostřed). Pro ovčí vlnu tedy platí stejný závěr jako v případě konopí, i bez optimalizace výrobního procesu však projevuje velmi dobré tepelně izolační vlastnosti.

Měření rychlosti proudění vzduchu strukturou materiálů z přírodních vláken prokázalo, že v případě technického konopí je rychlost proudění přímo úměrná procházejícímu tepelnému toku, tedy s objemovou hmotností klesá až do teoretického optima. Tento závěr nebyl zjištěn u ovčí vlny, kde patrně dochází ke kombinaci vlivu vysoké průvzdušnosti a odlišných parametrů vláken v porovnání s technickým konopím.

Co se týče působení vnějších podmínek na tepelnou vodivost, byl prokázán negativní vliv jak teploty, tak i vlhkosti materiálu. Zatímco teplota na zhoršování tepelně izolačních vlastností působí takřka lineárně, v případě vlhkosti je zhoršení nejprve mírné, při tzv. kritickém obsahu vlhkosti začíná být tento vliv výrazný.

Zkoumáním parametrů vlastní vlákenné suroviny byl prokázán velmi výrazný vliv tloušťky vlákna na tepelnou vodivost vláknitého materiálu. To je také hlavní důvod, proč technické konopí, které při průměrné tloušťce vlákna 60 μm dosahuje znatelně horších hodnot součinitele tepelné vodivosti ($0,053 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) v porovnání s ovčí vlnou, která vykázala součinitel tepelné vodivosti při tloušťce vlákna 23 μm $0,041 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, při tloušťce vlákna 33 μm pak $0,046 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Naproti tomu vliv délky a orientace vláken se ukázal jako nevýznamný. Zatímco u délky vláken se potvrdil předpoklad, v případě orientace je tento závěr překvapivý. Jeho pravděpodobnou příčinou je relativně nízký součinitel tepelné vodivosti vlastních přírodních vláken.

Posledním krokem práce bylo zhodnocení výsledků zkoušek v podobě odvození převodních součinitelů pro teplotu a vlhkost pro všechny testované materiály v souladu s ČSN EN ISO 10 456. Ty slouží pro přepočet hodnot součinitele tepelné vodivosti, stanovených při referenčních podmínkách teploty a vlhkosti na jiný soubor podmínek při určování deklarovaných a návrhových hodnot součinitele tepelné vodivosti. Zatímco předcházející výzkum by měl pomoci k optimalizaci výrobních procesů materiálů z přírodních vláken, doplnění ČSN EN ISO 10 456 o převodní součinitele pro přírodní vláknité materiály považují za hlavní přínos práce směrem do běžné stavební praxe.

Na základě výsledků práce lze ve vztahu k případné optimalizaci tepelně izolačních vlastností vláknitých izolačních materiálů na bázi přírodních vláken vyvodit některé obecné závěry. Ačkoliv faktorů, ovlivňujících tepelně izolační schopnosti, je celá řada, ne všechny lze spolehlivě ovlivnit, například vliv teploty a vlhkosti materiálu se uplatňuje do značné míry nezávisle na parametrech vyráběných materiálů či výrobní technologii. Naproti tomu byl prokázán významný vliv objemové hmotnosti, jejíž úprava je v rámci výrobního procesu relativně snadná. Ze zkoumaných parametrů vlastních vláken byl prokázán dominantní vliv tloušťky vlákna. Proto by měla být při optimalizaci výrobních procesů materiálů z přírodních vláken ve vztahu k jejich tepelně izolačním vlastnostem věnována pozornost zejména výběru vhodné tloušťky vlákna zpracovávané vlákenné suroviny a optimální objemové hmotnosti produkovaných výrobků.

Závěrem lze konstatovat, že veškeré testované materiály z přírodních vláken vykazují zajímavé nejen environmentální, ale i technické vlastnosti. Konkrétně jsou to v případě

technického konopí výhodné mechanické vlastnosti a nízký součinitel tepelné vodivosti, v případě ovčí vlny pak vynikající tepelně izolační vlastnosti a schopnost pohlcovat škodlivé plyny, společnými vlastnostmi pak jsou vysoká měrná tepelná kapacita či schopnost redistribuce vlhkosti a samozřejmě také obnovitelnost a nízká energetická náročnost. Ačkoliv použití přírodních vláknitých materiálů není vzhledem k problematickým otázkám citlivosti k vlhkosti a nízké požární odolnosti tak univerzální, jako v případě minerálních a skelných vláken či pěněných plastů, při správné aplikaci však tyto materiály převyšují jak užitnými, tak mnohdy i technickými vlastnostmi, a proto zasluhují naši plnou pozornost, zejména v souvislosti s nízkoenergetickou a pasivní výstavbou v souladu s myšlenkami trvale udržitelného rozvoje.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

-
- [1] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/31 EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov. In: Úřední věstník Evropské unie L 153. 18. 6. 2010.*
- [2] HUDEC, Mojmír. *Pasivní rodinný dům: proč a jak stavět*. 1. vyd. Praha: Grada, 2008, 108 s. ISBN 978-80-247-2555-0.
- [3] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov: Požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [4] Zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: 63. 2006.
- [5] Vyhláška č. 268/2009 o technických požadavcích na stavby. In: 81. 2009.
- [6] Vyhláška č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb. In: 10. 2008.
- [7] Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů. In: 74. 2000.
- [8] Zákon č. 102/2001 Sb. o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů. In: 41. 2001.
- [9] Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve znění pozdějších předpisů. In: 115. 2000.
- [10] Vyhláška č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov. In: 36. 2013.
- [11] Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů. In: 6. 1997.
- [12] Nařízení č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky. In: 67. 2002.
- [13] *Energetický informační systém* [online]. 2006 [cit. 2013-08-27]. Dostupné z: <http://www.eis.cz/>
- [14] *Wienerberger* [online]. © 2013 [cit. 2013-08-27]. Dostupné z: <http://www.wienerberger.cz/>
- [15] *Ytong* [online]. © 2011 [cit. 2013-08-27]. Dostupné z: <http://www.ytong.cz>
- [16] ŠŤASTNÍK, Stanislav a Jiří ZACH. *Zkoušení izolačních materiálů*. Brno: CERM, 2002, 95 s. ISBN 80-214-2253-X.
- [17] ČSN EN 826. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví: Zkouška tlakem*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [18] ČSN EN 1607. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví: Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [19] ČSN 73 0810. *Požární bezpečnost staveb: Společná ustanovení*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [20] ČSN EN 13 501-1. *Požární klasifikace výrobků a konstrukcí staveb: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [21] Kyoto protocol. *United Nations Framework Convention on Climate Change* [online]. © 2013 [cit. 2013-08-30]. Dostupné z: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php

- [22] Česko bere Kjótský protokol vážně. *Český rozhlas* [online]. 11.12.2007 [cit. 2013-08-30]. Dostupné z: <http://www.radio.cz/cz/rubrika/ocem/cesko-bere-kjotsky-protokol-vazne>
- [23] CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2009, 268 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [24] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Typy vláken: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/materialy>
- [25] LINUM USITATISSIMUM L. – len setý / ľan siaty. HOSKOVEC, Ladislav. *Botany.cz* [online]. © 2007-2012 [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/linum-usitatissimum/>
- [26] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Rostlinná vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/materialy>
- [27] Len přadný (Linum usitatissimum -L.). *Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta* [online]. © 2013 [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Len_sety.htm
- [28] NOVA-INSTITUT. *Gülzower Fachgespräche Band 26: Studie zur Markt- und Konkurrenz- situation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen (Deutschland und EU)* [online]. 2008 [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: http://www.nova-institut.de/pdf/08-01-Flachs-Hanf_Buch_Carus_et_al.pdf
- [29] *Faostat* [online]. © 2013 [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: <http://faostat.fao.org>
- [30] Digitální depozitář. *Poslanecká sněmovna parlamentu České Republiky* [online]. © 1995-2013 [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: http://snem.cz/eknih/1929ns/ps/tisky/t0547_00.htm
- [31] Čemolen v červnu definitivně ukončí zpracování lnu. *Deník.cz* [online]. 23.5.2010 [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: <http://www.denik.cz/ekonomika/chemolen-v-cervnu-definitivne-ukonci-zpracovani-lnu.html>
- [32] Projekt Cíl 3 - Translinum. *Lnářský svaz ČR* [online]. [2012] [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: http://www.lnarskysvaz.cz/new/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=3&Itemid=7&lang=cs
- [33] *Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský* [online]. © 2009-2013 [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/ukzuz/portal/>
- [34] LEN SETÝ: Linum usitatissimum [obrázek]. *Kipp d'Amundsen Services* [online]. © 2005-2013 [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: <http://www.trollfood.cz/?file=bylinylensety>
- [35] Konopí seté: Cannabis sativa. *Květena ČR* [online]. © 2003-2013 [cit. 2013-09-24]. Dostupné z: <http://www.kvetenacr.cz/detail.asp?IDdetail=185>
- [36] Konopí seté (Cannabis sativa L.). *Konopnářský svaz České Republiky* [online]. 3.3. 2009 [cit. 2013-09-24]. Dostupné z: <http://www.konopi.info/default.asp?ch=203&typ=1&val=88871&ids=3715>
- [37] Využitie konope. *Konopa* [online]. 26. 5. 2010 [cit. 2013-09-24]. Dostupné z: http://www.konopa.sk/vyuzitie_konope/
- [38] ALLIN, Steve. *Building with hemp*. Kenmare, Co. Kerry: Seed Press, 2005. ISBN 978-095-5110-900.

- [39] O tírnách, aneb dolování vláken z konopí. *Konopnářský svaz České Republiky* [online]. [cit. 2013-09-24]. Dostupné z: <http://www.konopa.cz/zpracovani/o-tirnach-aneb-dolovani-vlaken-z-konopi.html>
- [40] Unikátní sekačka sklízí konopí na Moravě. *E15.cz* [online]. 20.8.2007 [cit. 2013-09-25]. Dostupné z: <http://euro.e15.cz/profit/unikatni-sekacka-sklizi-konopi-na-morave-886478>
- [41] Přírodní izolace z konopí [obrázek]. *Envi Web* [online]. 16.06.2009 [cit. 2013-09-25]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/zemedelstvi/76792/prirodni-izolace-z-konopi>
- [42] Bavlna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 22. 7. 2013 v 22:32 [cit. 2013-09-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Bavlna>
- [43] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Zpracování odpadů 3 a 4 (textilní zpracování): Učební texty Fakulty textilní*. Liberec. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index.php>
- [44] *Bonded Logic* [online]. © 2013 [cit. 2013-09-29]. Dostupné z: <http://www.bondedlogic.com/>
- [45] *Mr Insulate* [online]. © 2012 [cit. 2013-09-29]. Dostupné z: <http://www.mrinsulate.net/>
- [46] *INNO-THERM* [online]. © 2013 [cit. 2013-09-29]. Dostupné z: <http://www.recovery-insulation.co.uk/>
- [47] BŘICHÁČEK, Pavel. *Možnosti využití odpadů z textilního průmyslu při výrobě novodobých izolačních materiálů*. Brno, 2012. 61 s., 65 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D..
- [48] R19 15" x 93" UltraTouch Denim Insulation [obrázek]. *Menards: Dedicated to service and quality* [online]. ©2004-2013 [cit. 2013-09-29]. Dostupné z: <http://www.menards.com/main/building-materials/insulation/rolls-batts/r19-15-x-93-ultratouch-denim-insulation/p-1689681-c-5780.htm>
- [49] Album - Krytosemenné - dvouděložné I. - č. 094: Bombaceae - Bavlník srstnatý [obrázek]. *Gymnázium Uherské Hradiště* [online]. 2004 [cit. 2013-09-29]. Dostupné z: http://www.guh.cz/edu/bi/biologie_rostliny/html02/foto_094.html
- [50] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Živočišná vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/materialy>
- [51] Ovčí vlna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 14. 7. 2013 v 15:04. [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Ovčí_vlna
- [52] Ovce domácí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 7. 9. 2013 v 18:25. [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Ovce_domácí
- [53] Plemena ovcí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 22. 7. 2013 v 09:32. [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Plemena_ovcí

- [54] Vlastnosti ovčí vlny a její hlavní přednosti. *Austermann: fashion and style* [online]. © 2006-13 [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: <http://pleteni.eu/clanky-a-informace/vlastnosti-ovci-vlny.htm>
- [55] Ovčí vlna vzácná surovina. *Stránky o lidové kultuře, ovčích a pastýřích* [online]. © 2013 [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: <http://www.salasnictvi.estranky.cz/clanky/ovci-vlna-vzacna-surovina.html>
- [56] Why Should I Use Wool?. *Sheep Wool Insulation Ltd.* [online]. [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: http://www.sheepwoolinsulation.ie/why_wool/default.asp
- [57] Izolace z ovčí vlny. *TZB-info* [online]. 1.4.2013 [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/9718-izolace-z-ovci-vlny>
- [58] *Thermobond insulation* [online]. [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: <http://www.closedloopscotland.com>
- [59] *Izolace z ovčí vlny* [online]. © 2008 [cit. 2013-10-01]. Dostupné z: <http://www.isolena.cz/>
- [60] LUAMKANCHANAPHAN, Thitiwan, Sutharat CHOTIKAPRAKHAN, Songklod JARUSOMBATI, Guangping HAN a Shuichi KAWAI. A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers. *APCBEE Procedia* [online]. 2012, vol. 1, issue 1, s. 46-52 [cit. 2013-10-24]. DOI: 10.1016/j.apcbee.2012.03.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212670812000103>
- [61] *EKOPANELY* [online]. 2013 [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: <http://www.ekopanely.cz/>
- [62] ZHOU Xiao-yan, LI Jian, ZHOU Ding-guo. *Thermal Transfer Properties of Low Density Wheat Strawboard*. Journal of Nanjing Forestry. [online] Volume 28, 2004. Dostupné z: [www.paper.edu.cn/.../1000-2006\(2004\)06-0001-04](http://www.paper.edu.cn/.../1000-2006(2004)06-0001-04)
- [63] ZHOU, Xiao-yan, Fei ZHENG, Hua-guan LI, Cheng-long LU a Shuichi KAWAI. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings* [online]. 2010, vol. 42, issue 7, s. 1070-1074 [cit. 2013-10-24]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.01.020. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778810000277>
- [64] KHEDARI, Joseph, Noppanun NANKONGNAB, Jongjit HIRUNLABH, Sombat TEEKASAP a Shuichi KAWAI. New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and Environment* [online]. 2004, vol. 39, issue 1, s. 59-65 [cit. 2013-10-24]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2003.08.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778810000277>
- [65] XU, Jianying, Ryo SUGAWARA, Ragil WIDYORINI, Guangping HAN a Shuichi KAWAI. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science* [online]. 2004-2-1, vol. 50, issue 1, s. 62-67 [cit. 2013-10-24]. DOI: 10.1007/s10086-003-0522-1. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10086-003-0522-1>
- [66] MANOHAR, Krishpersad, Dale RAMLAKHAN, Gurmohan KOCHHAR, Subhas HALDAR a Shuichi KAWAI. Biodegradable fibrous thermal insulation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2006, vol. 28, issue 1, s. -

- [cit. 2013-10-24]. DOI: 10.1590/S1678-58782006000100005. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext
- [67] JIRSÁK, Oldřich a Klára KALINOVÁ. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Netkané textilie: Skriptum Fakulty textilní*. Liberec. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index.php>
- [68] *Jilana non-woven* [online]. 2013 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://www.jilana.cz/>
- [69] Wet Wipes 101: Wet Wipes Manufacturing Process - Part 3 [obrázek]. *Rockline: Europe* [online]. 2012 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://www.rockline.co.uk/blog.php?id=56>
- [70] Needle-punched mats [obrázek]. *Technobasalt* [online]. 2010 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://www.technobasalt.com/applications/item/needle-punched-mats-6/>
- [71] Canabest PLUS [obrázek]. *Mabeko* [online]. 2008 [cit. 2013-10-30]. Dostupné z: <http://www.mabeko.cz/?canabest-plus,37>
- [72] *Struto* [online]. [cit. 2013-10-30]. Dostupné z: <http://www.struto.com/index.htm>
- [73] BÖHM, Martin, Jan REISNER a Jan BOMBA. ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE, Fakulta lesnická a dřevařská. *Materiály na bázi dřeva* [online]. 2012 [cit. 2013-10-31]. ISBN 978-80-213-2251-6. Dostupné z: <http://drevene-materialy.fld.czu.cz/uvod/>
- [74] KORJENIC, Azra, Vít PETRÁNEK, Jiří ZACH a Jitka HROUDOVÁ. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings* [online]. 2011, vol. 43, issue 9, s. 2518-2523 [cit. 2013-12-01]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.06.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811002611>
- [75] ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: ÚNMZ, 2005
- [76] SLÍPKOVÁ, Andrea. *Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken*. Brno, 2013. 86 s., 6 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.
- [77] HROUDOVÁ, Jitka, Pavel KOUT a Jiří ZACH. Komplexní hodnocení vlastností přírodních izolačních materiálů z technického konopí určených do podlah. *TZB-info* [online]. 28.3.2011 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7290-komplexni-hodnoceni-vlastnosti-prirodnich-izolacnich-materialu-z-technickeho-konopi-urcenych-do-podlah>
- [78] ŠŤASTNÍK, Stanislav. *Zkoušení izolačních materiálů*. Brno: CERM, 2002, 95 s. ISBN 80-214-2253-X.
- [79] ARAMBAKAM, R., H. VAHEDI TAFRESHI a B. POURDEYHIMI. A simple simulation method for designing fibrous insulation materials. *Materials* [online]. 2013, vol. 44, s. 99-106 [cit. 2013-11-14]. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.07.058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306912005109>
- [80] FICKER, Tomáš. *Handbook of building thermal technology, acoustics and daylighting: Příručka stavební tepelné techniky, akustiky a denního osvětlení*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, v, 266 s. ISBN 80-214-2670-5.

[81] KORJENIC, Azra a Thomas BEDNAR. Developing a model for fibrous building materials. *Energy and Buildings* [online]. 2011, vol. 43, issue 11, s. 3189-3199 [cit. 2013-11-14]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.08.017. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811003677>

[82] ČSN EN 822. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví: Stanovení délky a šířky*. Praha: ÚNMZ, 2013.

[83] ČSN EN 823. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví: Stanovení tloušťky*. Praha: ÚNMZ, 2013.

[84] ČSN EN 1602. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví: Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: ÚNMZ, 2013.

[85] ČSN 72 7012-3. *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu - Metoda desky: Metoda měřidla tepelného toku*. Praha: ČNI, 1994.

[86] ČSN EN ISO 10 456. *Stavební materiály a výrobky – Tepelně vlhkostní vlastnosti: Návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových tepelných hodnot*. Praha: ÚNMZ, 2009.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol:	Veličina:	Jednotka:
b	tepelná jímavost	$W^2.s.m^{-4}.K^{-2}$
b	šířka	m
c	měrná tepelná kapacita	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
D	difuzní koeficient pro difundující plyn	$m^2.s^{-1}$
∇c	gradient koncentrace vlhkosti	$mol.m^3$
∇T	teplotní gradient	$K.m^{-1}$
F_a	vliv stárnutí	-
F_M	převodní vlhkostní faktor	-
F_T	převodní teplotní faktor	-
f_T	převodní teplotní součinitel	K^{-1}
f_u	převodní součinitel pro hmotnostní vlhkost	$kg.kg^{-1}$
f_ψ	převodní součinitel pro objemovou vlhkost	$m^3.m^{-3}$
j	hustota difuzního toku	$mol.m^{-2}.s^{-1}$
l	délka	m
m	hmotnost	kg
q	hustota tepelného toku	$W.m^{-2}$
T	teplota vzduchu	K
t	tloušťka	m
T_1	referenční teplota vzduchu	K
T_2	přepočtená teplota vzduchu	K
U	součinitel prostupu tepla	$W.m^{-2}.K^{-1}$
u	hmotnostní vlhkost materiálu	%
u_1	referenční hmotnostní vlhkost	$kg.kg^{-1}$
u_2	přepočtená hmotnostní vlhkost	$kg.kg^{-1}$
V	objem	m^3
v	rychlost proudění vzduchu	$m.s^{-1}$
α	objemový podíl pevné fáze	-
λ	součinitel tepelné vodivosti	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_1	součinitel tepelné vodivosti při referenčních podmínkách	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_2	součinitel tepelné vodivosti při přepočtených podmínkách	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_f	součinitel tepelné vodivosti pevné fáze	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_g	součinitel tepelné vodivosti vnitřního vzduchu	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ρ	objemová hmotnost	$kg.m^{-3}$
φ	relativní vlhkost vzduchu	%
ψ_1	referenční objemová vlhkost	$m^3.m^{-3}$
ψ_2	přepočtená objemová vlhkost	$m^3.m^{-3}$

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Shrnutí zahraničních výsledků zpracování přírodních vláken</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 2 - Složení jednotlivých zkoušených materiálů</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 3 - Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 4 - Přehled tep. vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - Canabest BASIC.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 5 - Přehled tep. vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - Canabest PLUS.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 6 - Přehled tep. vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - konopí STRUTO</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 7 - Přehled tep. vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - ovčí vlna 23 μm</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 8 - Přehled tep. vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - ovčí vlna 33 μm</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 9 - Přehled tep. vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti - vlna 23 + 33 μm</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 10 - Přehled rychlosti proudění v závislosti na objemové hmotnosti</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 11 - Přehled rychlosti proudění v závislosti na teplotě – Canabest BASIC</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 12 - Přehled tepelné vodivosti v závislosti vlhkosti pro stlačení 0 a 30 %.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 13 - Stanovení tloušťky vlákna - přehled hodnot</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 14 - Stanovení délky vlákna - přehled hodnot</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka 15 - Stanovení průměrné orientace vláken</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 16 - Převodní teplotní součinitele pro technické konopí</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 17 - Převodní teplotní součinitele pro ovčí vlnu</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 18 - Převodní součinitele pro hmotnostní vlhkost u zkoumaných materiálů</i>	<i>81</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 - Len setý</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 2 - Konopí seté</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 3 - UltraTouch (izolační rohož z odpadní bavlny)</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 4 - Bavlník srstnatý</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 5 - Vpichovaná textilie</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6 - Schéma zpevňování vpichováním</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 7 - Typické tvary příčných řezů bikomponentních vláken</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 8 - Průřez zvlákňovací hubicí pro výrobu vláken typu jádro – plášť</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 9 - Izolační deska z tech.konopí, zhotovená technologií vodorovného kladení</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 10 - Polyesterová rohož, zhotovená technologií STRUTO</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 11 - Měkká dřevovláknitá deska</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 12 - Zkoušené materiály (číslování odpovídá tabulce 2)</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 13 - Zařízení pro stanovení tloušťky dle ČSN EN 823</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 14 - Přístroj Lambda 2300</i>	<i>52</i>

<i>Obrázek 15 - Optický mikroskop s okulárovým mikrometrem</i>	53
<i>Obrázek 16 - Detail měřicí sondy.....</i>	54
<i>Obrázek 17 - Přístroj Testo 435</i>	54
<i>Obrázek 18 - Proces měření rychlosti proudění vzduchu uvnitř vláknitého materiálu.....</i>	64

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 - Sklizňové plochy lnu olejného v ČR v letech 2007 – 2012</i>	23
<i>Graf 2 - Sklizňové plochy konopí setého v ČR v letech 2007 – 2012</i>	26
<i>Graf 3 - Průběh závislosti tepelné vodivosti na obj. hmot. obecného vláknitého materiálu ...</i>	45
<i>Graf 4 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - Canabest BASIC</i>	57
<i>Graf 5 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - Canabest PLUS.....</i>	58
<i>Graf 6 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - konopí STRUTO.....</i>	59
<i>Graf 7 - Závislost tepelné vodivosti na poměrném stlačení - konopí STRUTO.....</i>	60
<i>Graf 8 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - ovčí vlna 23 μm.....</i>	61
<i>Graf 9 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - ovčí vlna 33 μm.....</i>	62
<i>Graf 10 - Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - vlna 23 + 33 μm.....</i>	63
<i>Graf 11 - Závislost rychlosti proudění na objemové hmotnosti</i>	65
<i>Graf 12 - Závislost tepelné vodivosti na teplotě</i>	66
<i>Graf 13 - Závislost rychlosti proudění na teplotě – Canabest BASIC</i>	68
<i>Graf 14 - Závislost tepelné vodivosti na teplotě pro stlačení 0 a 30%.....</i>	69
<i>Graf 15 - Srovnání stanovených tloušťek vláken</i>	71
<i>Graf 16 - Srovnání tepelných vodivostí s tloušťkou vlákna</i>	72
<i>Graf 17 - Závislost tepelné vodivosti na tloušťce vlákna, sestavená pro ovčí vlnu.....</i>	73
<i>Graf 18 - Srovnání stanovených délek vláken</i>	74
<i>Graf 19 - Srovnání tepelných vodivostí s délkou vlákna</i>	75
<i>Graf 20 - Srovnání průměrné orientace vláken.....</i>	76
<i>Graf 21 - Souhrn závislostí tepelné vodivosti na objemové hmotnosti.....</i>	82

PŘÍLOHY

Příloha A: Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2

Tabulka A1 – Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla pro budovy s převažující návrhovou vnitřní teplotou θ_{im} v intervalu 18 °C až 22 °C včetně

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla [W/(m ² ·K)]		
	Požadované hodnoty $U_{N,20}$	Doporučené hodnoty $U_{rec,20}$	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy $U_{pas,20}$
Stěna vnější	0,30 ¹⁾	těžká: 0,25	0,18 až 0,12
		lehká: 0,20	
Střecha strmá se sklonem nad 45°	0,30	0,20	0,18 až 0,12
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop s podlahou nad venkovním prostorem	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop pod nevytápěnou půdou (se střechou bez tepelné izolace)	0,30	0,20	0,15 až 0,10
Stěna k nevytápěné půdě (se střechou bez tepelné izolace)	0,30 ¹⁾	těžké: 0,25	0,18 až 0,12
		lehké: 0,20	
Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině ^{4), 6)}	0,45	0,30	0,22 až 0,15
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k nevytápěnému prostoru	0,60	0,40	0,30 až 0,20
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k temperovanému prostoru	0,75	0,50	0,38 až 0,25
Strop a stěna vnější z temperovaného prostoru k venkovnímu prostředí	0,75	0,50	0,38 až 0,25
Podlaha a stěna částečně vytápěného prostoru přilehlá k zemině ⁶⁾	0,85	0,60	0,45 až 0,30
Stěna mezi sousedními budovami ³⁾	1,05	0,70	0,5
Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně	1,05	0,70	
Stěna mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně	1,30	0,90	
Strop vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně	2,2	1,45	
Stěna vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně	2,7	1,80	
Výplň otvoru ve vnější stěně a strmé střeše, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí, kromě dveří	1,5 ²⁾	1,2	0,8 až 0,6
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45°, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí	1,4 ⁷⁾	1,1	0,9
Dveřní výplň otvoru z vytápěného prostoru do venkovního prostředí (včetně rámu)	1,7	1,2	0,9
Výplň otvoru vedoucí z vytápěného do temperovaného prostoru	3,5	2,3	1,7
Výplň otvoru vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí	3,5	2,3	1,7

Popis konstrukce		Součinitel prostupu tepla [W/(m ² ·K)]		
		Požadované hodnoty $U_{N,20}$	Doporučené hodnoty $U_{rec,20}$	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy $U_{pas,20}$
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45° vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí		2,6	1,7	1,4
Lehký obvodový plášť (LOP), hodnocený jako smontovaná sestava včetně nosných prvků, s poměrnou plochou průsvitné výplně otvoru $f_w = A_w / A$, v m ² /m ² , kde A je celková plocha lehkého obvodového pláště (LOP), v m ² ; A_w plocha průsvitné výplně otvoru včetně příslušných částí rámu v LOP, v m ² .	$f_w \leq 0,5$	$0,3 + 1,4 \cdot f_w$	$0,2 + f_w$	$0,15 + 0,85 \cdot f_w$
	$f_w > 0,5$	$0,7 + 0,6 \cdot f_w$		
Kovový rám výplně otvoru		-	1,8	1,0
Nekovový rám výplně otvoru ⁵⁾		-	1,3	0,9 – 0,7
Rám lehkého obvodového pláště		-	1,8	1,2
POZNÁMKY ¹⁾ Pro jednovrstvé zdivo se nejpozději do 31.12.2012 připouští hodnota 0,38 W/(m ² K). ²⁾ Nejpozději do 31.12.2012 se připouští hodnota 1,7 W/(m ² K). ³⁾ Nemusí se vždy jednat o teplosměnnou plochu, ovšem s ohledem na postup výstavby a možné změny způsobu užívání se zajišťuje tepelné ochrana na uvedené úrovni. ⁴⁾ V případě podlahového a stěnového vytápění se do hodnoty součinitele prostupu tepla započítávají pouze vrstvy od roviny, ve které je umístěno vytápění, směrem do exteriéru. ⁵⁾ Platí i pro rámy využívající kombinace materiálů, včetně kovových, jako jsou například dřevo-hliníkové rámy. ⁶⁾ Odpovídá výpočtu součinitele prostupu tepla podle ČSN 73 0540-4, (tj. bez vlivu zeminy), nikoli výslednému působení podle ČSN EN ISO 13370. ⁷⁾ Nejpozději do 31.12.2012 se připouští hodnota 1,5 W/(m ² K).				

Příloha B: Záznam z laboratorního stanovení tloušťky a délky vláken

Tabulka B1 – Technické konopí Canabest

Tloušťka vlákna										Délka vlákna [mm]				
Dílky					μm									
9,9	11,3	13,1	3,7	11	73,3	83,7	97,0	27,4	81,5	58,5	67,7	103,1	43,2	51,2
8,1	6,8	6,1	13,2	6,3	60,0	50,4	45,2	97,8	46,7	62,5	93,1	62,2	35,9	78,3
10,6	9,9	5,2	4,9	3,1	78,5	73,3	38,5	36,3	23,0	95,3	112,3	59,8	47,2	84,2
5,4	9,2	8,9	8,8	4,6	40,0	68,2	65,9	65,2	34,1	88,6	46,5	49,1	74,1	53,6
9,1	3,2	10,8	8,1	6,1	67,4	23,7	80,0	60,0	45,2	77,4	79,3	56,2	45,8	42,1
3,5	2,8	9,1	13,5	4,1	25,9	20,7	67,4	100,0	30,4	68,8	62,1	46,1	78,8	64,1
Průměr 56,89					Sm. Odch. 23,53					Průměr 66,24				
					Sm. Odch. 19,22									

Tabulka B2 – Technické konopí Jilana

Tloušťka vlákna										Délka vlákna [mm]				
Dílky					μm									
10	11	11	13	14	74,1	81,5	81,5	96,3	103,7	56,2	72,6	65,9	50,2	90
9	14	10	8,3	7,5	66,7	103,7	74,1	61,5	55,6	58	53,1	133,2	34,8	43,2
12	9	7,2	9,2	13	88,9	66,7	53,3	68,2	96,3	41,2	79,1	40,9	32,2	99,5
16	6,6	13	10	10	118,5	48,9	96,3	74,1	74,1	40,9	51,9	40	50,5	105,2
9,3	16	9,5	8,9	7,3	68,9	118,5	70,4	65,9	54,1	51,1	74,2	44,9	99,5	90,2
11	10	11	12	14	81,5	74,1	81,5	88,9	103,7	41,2	88	62,4	78,6	52,3
Průměr 79,71					Sm. Odch. 18,25					Průměr 64,03				
					Sm. Odch. 24,46									

Tabulka B3 – Ovčí vlna 23 μm

Tloušťka vlákna											Délka vlákna [mm]					
Dílký					µm											
3,1	3,1	2,9	2,1	3,5	23,0	23,0	21,5	15,6	25,9	34,5	29,6	22,3	21,5	19,5		
2,7	2,8	3	3	5,2	20,0	20,7	22,2	22,2	38,5	17,8	52,5	14,5	52,3	17,4		
3,3	3,5	2,9	3,7	3,8	24,4	25,9	21,5	27,4	28,1	22,8	45,6	20,5	28,5	28,3		
2,7	2,8	2,9	4	3,5	20,0	20,7	21,5	29,6	25,9	15,6	48,3	18,6	27,2	15,6		
4,2	3	2,9	3,6	5,8	31,1	22,2	21,5	26,7	43,0	41,2	19,6	44,9	18,6	32,6		
3,2	2,8	3,1	2,9	2,9	23,7	20,7	23,0	21,5	21,5	19,1	22,5	16,2	25,8	49,8		
					Průměr 24,42		Sm. Odch. 5,42			Průměr 28,11					Sm. Odch. 12,04	

Tabulka B4 – Ovčí vlna 33 μm

Tloušťka vlákna											Délka vlákna [mm]			
Dílký					μm									
6,6	4,3	5,1	7,9	8	48,9	31,9	37,8	58,5	59,3	81,2	104,5	81,2	65,8	84,3
6,5	6,9	4,8	5,5	4,9	48,1	51,1	35,6	40,7	36,3	119,7	72,3	108,3	143,2	79,3
4,9	6,1	5,9	5,9	4,8	36,3	45,2	43,7	43,7	35,6	110,2	88,9	86,2	118,6	68,3
6	4,7	4	6,9	4,6	44,4	34,8	29,6	51,1	34,1	95,3	103,8	75,6	66,8	97,3
4,1	5,2	7,1	4,1	4	30,4	38,5	52,6	30,4	29,6	51,1	105,6	122,3	84,8	67,1
4,5	5,6	4,5	5,9	4,6	33,3	41,5	33,3	43,7	34,1	103,5	88	78,9	112,4	95,8
					Průměr 40,47		Sm. Odch. 8,32				Průměr 92,01		Sm. Odch. 20,22	