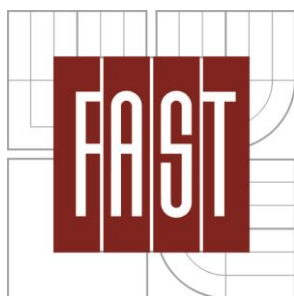


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

VÝVOJ A VÝZKUM ENVIRONMENTÁLNĚ ÚSPORNÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

DEVELOPMENT AND TESTING OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY INSULATION MATERIALS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Bc. JITKA HROUDOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2013

Abstrakt

Stále zvyšující se poptávka po nových progresivních stavebních materiálech klade tlak na společnost neustále vyvíjet nové materiály, které budou šetrné k životnímu prostředí, budou vykazovat velmi dobré užitné vlastnosti a budou také cenově dostupné. Jedním z hlavních cílů v oblasti materiálového výzkumu ve stavebnictví je využívat při vývoji nových stavebních materiálů snadno obnovitelné surovinové zdroje, případně průmyslové odpady. Současný trend zateplování stavebních konstrukcí vede k vývoji environmentálně úsporných izolačních materiálů na bázi snadno obnovitelných surovinových zdrojů ze zemědělství a chovu dobytka, které by v budoucnu mohly být alternativními materiály k dnes běžně užívaným izolačním materiálům. Disertační práce popisuje výzkum a vývoj izolačních materiálů na bázi přírodních vláken původem ze zemědělství, jedná se zejména o vlákna technického konopí, lnu a juty. Dále pak také studium tepelně vlhkostního chování těchto vyvíjených materiálů, včetně provedení výpočtových simulací chování těchto materiálů po zabudování do stavební konstrukce.

Abstract

Increasing demand for new progressive construction materials requires development of modern environmentally friendly materials with excellent end-use properties and reasonable price. One of the main objectives of material research in building industry is using renewable resources of raw materials of industrial waste for development of new construction materials. Current trend of thermal insulation of building constructions results in development of environmentally friendly insulation materials based on renewable material resources from agriculture and stock farming, which could become alternative for current common use insulation materials in the future. The thesis describes research and development of insulation materials based on natural fibres of agricultural origin; in particular fibres of hemp, flax and jute. Hydrothermal behavior of developed materials is studied including computational simulation of behavior of researched materials after building in the construction.

Klíčová slova

Izolační materiály, přírodní vlákna, tepelně izolační a akustické vlastnosti, sorpční vlastnosti, technické konopí, len.

Keywords

Insulation materials, natural fibres, thermal insulation and acoustic properties, sorption properties, technical hemp, flax.

Bibliografická citace VŠKP

HROUDOVÁ, Jitka. *Vývoj a výzkum environmentálně úsporných izolačních materiálů*. Brno, 2013. 192 s. Disertační 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 disertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu disertační práce Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce a zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců za odbornou pomoc při provádění laboratorních zkoušek. Dále děkuji také společnosti Canabest, s.r.o. za umožnění výroby zkušebních vzorků.

Obsah

ÚVOD.....	10
I. TEORETICKÁ ČÁST	12
1. Izolační materiály	12
1.1. Rozdělení izolačních materiálů dle jejich funkce	12
1.2. Rozdělení izolačních materiálů dle jejich původu	13
2. Přírodní izolační materiály na bázi obnovitelných surovinových zdrojů	16
3. Přehled vybraných přírodních surovinových zdrojů	20
3.1 Konopí seté (<i>Cannabis sativa</i> L.)	20
3.1.1 Historie a současnost pěstování konopí setého.....	20
3.1.2 Charakteristika konopí.....	22
3.1.3 Využití produktů konopí.....	24
3.2 Len setý (<i>Linum usitatissimum</i> L.)	25
3.2.1 Historie a současnost pěstování lnu setého.....	25
3.2.2 Charakteristika lnu.....	27
3.2.3 Využití produktů lnu setého	28
3.3 Juta	29
3.3.1 Historie a současnost pěstování juty.....	29
3.3.2 Charakteristika juty	30
3.3.3 Využití produktů juty	31
3.4 Další přírodní suroviny	32
3.4.1 Dřevo	32
3.4.2 Rákos	33
3.4.3 Sláma	34
3.4.4 Ovčí vlna	35
3.4.5 Bavlna.....	35
4. Vláknata vyžitelná při výrobě izolačních materiálů a jejich možné zpracování..	37
4.1 Rostlinná vlákna	37
4.1.1. Konopná vlákna.....	40
4.1.2. Lněná vlákna.....	41
4.1.3. Jutová vlákna	41
4.1.4. Bavlněná vlákna	41
4.2 Živočišná vlákna	42

4.2.1. Vlněná vlákna	42
4.3 Vlákná chemická	43
4.3.1. Chemická vlákna z přírodních polymerů	44
4.3.1.1. Viskózová vlákna	44
4.3.1.2. Měďnato-amonná vlákna	45
4.3.1.3. Lyocelová vlákna	45
4.3.1.4. Acetátová vlákna	46
4.3.2. Chemická vlákna ze syntetických polymerů	46
4.3.2.1. Polyamidová vlákna	47
4.3.2.2. Polyesterová vlákna	47
4.3.2.3. Akrylová vlákna	48
4.3.2.4. Polypropylenová vlákna	49
4.3.2.5. Bikomponentní vlákna	49
5. Technologie pojení vláken	52
5.1 Mechanické pojení	52
5.1.1 Vpichování	52
5.1.2 Technologie zpevňování vláken pomocí vodního paprsku	53
5.1.3 Technologie proplétání	54
5.2 Chemické pojení	54
5.3 Termické pojení	54
5.3.1 Teplovzdušné pojení bikomponentními vlákny	55
5.3.2 Technologie kolmého vlákna (STRUTO)	56
6. Tepelně izolační materiály a jejich vlastnosti	57
6.1 Šíření tepla stavební konstrukcí	58
6.1.1 Kondukce	58
6.1.2 Konvekce	60
6.1.3 Radiace	62
6.2 Součinitel tepelné vodivosti stavebních materiálů	65
6.2.1 Vliv objemové hmotnosti a pórovitosti	66
6.2.2 Vliv vlhkosti na hodnotu součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů ...	67
6.2.2.1 Oblast hygroskopické vlhkosti	71
6.2.2.2 Mimo oblast hygroskopické vlhkosti	71
6.2.2.3 Přepočet součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti	72
6.2.3 Vliv teploty na hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiálu	72

6.2.4 Vliv směru tepelného toku.....	73
6.2.5 Vliv vnitřní mikrostruktury a chemické povahy látek.....	73
7. Akusticko izolační materiály a jejich vlastnosti	75
7.1. Činitel zvukové pohltivosti stavebních materiálů	76
7.2. Dynamická tuhost	77
II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	80
1. Metodika práce	80
2. Metodika prováděných zkoušek.....	84
2.1 Stanovení tloušťky a lineárních rozměrů vzorků	84
2.2 Stanovení objemové hmotnosti	85
2.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti	85
2.4 Stanovení faktoru difúzního odporu (ekvivalentní difúzní tloušťky).....	86
2.5 Stanovení napětí při 10% deformaci	88
2.6 Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky.....	89
2.7 Stanovení dynamické tuhosti	89
2.8 Stanovení činitele zvukové pohltivosti	92
2.9 Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření.....	94
2.10 Stanovení sorpčních vlastností	95
2.11 Stanovení tloušťky vláken	96
2.12 Výpočtové simulace	96
3. Postup prací v jednotlivých etapách	98
3.1 Etapa I: Zmapování surovinové základny	98
3.2 Etapa II: Návrh receptur, výroba zkušebních těles	98
3.3 Etapa III: Laboratorní měření.....	101
3.4 Etapa IV: Stanovení sorpčních charakteristik a simulace chování vyvinutých materiálů ve stavebních konstrukcích.....	102
3.5 Etapa V: Závěrečné vyhodnocení a uplatnění vyvinutých materiálů v praxi	102
4. Výsledky experimentálních prací v rámci jednotlivých etap	103
4.1 Vyhodnocení etapy I „Zmapování surovinové základny“ a diskuze výsledků.....	103
4.1.1 Materiály pocházející ze zemědělství- konopí, len, juta	105
4.1.2 Materiály pocházející z chovu dobytka	108
4.1.3 Diskuze dílčích výsledků.....	110
4.2 Vyhodnocení etapy II „Návrh receptur, výroba zkušebních těles“ a diskuze výsledků	111

4.3 Vyhodnocení etapy III „Laboratorní měření“ a diskuze výsledků	116
4.3.1 Stanovení základních fyzikálních vlastností	116
4.3.2 Stanovení tepelně technických vlastností	118
4.3.3 Stanovení akustických vlastností	120
4.3.4 Stanovení mechanických vlastností	124
4.3.5 Stanovení dalších charakteristických vlastností pro izolační materiály	127
4.4 Vyhodnocení etapy IV „Stanovení sorpčních charakteristik a simulace chování vyvinutých materiálů ve stavebních konstrukcích“ a diskuze výsledků	130
4.4.1 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na teplotě	130
4.4.2 Stanovení rovnovážných sorpčních vlhkostí	133
4.4.3 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním obsahu	135
4.4.4 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti	137
4.4.5 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti vzduchu	138
4.4.6 Optimalizační proces	141
4.4.6.1 Optimalizační proces pro izolační materiály uplatnitelné při izolaci podlah	143
4.4.6.2 Optimalizační proces pro izolace uplatnitelné při izolaci střech, příček	145
4.4.7 Simulace tepelně vlhkostního chování vyvinutých přírodních izolací	146
4.4.7.1 Simulace chování obvodové stěny	147
4.4.7.2 Simulace chování podlahové konstrukce	153
4.4.7.3 Simulace chování obvodové stěny s předstěnou	156
4.5 Vyhodnocení etapy V „Závěrečné vyhodnocení a uplatnění vyvinutých materiálů v praxi“ a diskuze výsledků	166
5. Diskuze výsledků - souhrn	168
6. Závěr	172
Seznam použitých zdrojů	175
Seznam zkratk a symbolů	183
Seznam tabulek	186
Seznam obrázků	189

ÚVOD

Současná moderní doba klade velký důraz na vývoj nových perspektivních stavebních materiálů, které nebudou mít negativní dopad na životní prostředí, budou finančně dostupné a budou disponovat optimálními vlastnostmi vzhledem k jejich použití. Izolační materiály byly a jsou stále velmi důležitým článkem při provádění stavebních konstrukcí. Jejich vhodná aplikace a správná funkce ve stavebních objektech má velký podíl na stav životního prostředí, které výrazně ovlivňuje podmínky pro život obyvatelstva Země. Proto je možné sledovat neustálý zájem mnoha vědeckých týmů po celém světě vyvíjet nové, perspektivní, environmentálně úsporné izolační materiály. Celosvětovým trendem se v posledních letech stává návrat k využití přírodních surovinových zdrojů, případně využití recyklovaných či odpadních materiálů.

K nejstarším, od pradávna používaným, tepelně izolačním materiálům patřily především materiály na bázi přírodních surovin, např. rákos, sláma, seno, len, konopí, lišejníky. S rozvojem společnosti a se zvyšujícími se nároky na provádění a kvalitu staveb byly tyto materiály postupně nahrazeny novými, syntetickými materiály, ve větší míře se jednalo o polymerní materiály, např. polystyren, polyuretan, polyvinylchlorid (PVC), polyetylen (PE) a anorganické syntetické materiály, např. minerální vlna. [1]

Výroba, v současnosti používaných, izolačních materiálů je značně náročná nejen po stránce energetické, surovinové, ale i finanční. Proto je snaha o nalezení snadno dostupných alternativních surovinových zdrojů, přičemž z environmentálního hlediska a z hlediska trvale udržitelného rozvoje se jeví jako velmi výhodné využít snadno obnovitelné, lokální surovinové zdroje, nezatěžující životní prostředí, za předpokladu následného zpracování s nízkou energetickou náročností. Což je také v souladu s energeticko-klimatickým balíčkem „20-20-20“ schváleným Evropským Parlamentem a Radou v roce 2008, uzákoněným v červnu 2009. [2]

Jednou z možností řešení je využití přírodních surovinových zdrojů původem ze zemědělství. Další variantu řešení představují odpadní průmyslové látky, případně průmyslové recykláty. Efektivním využitím jejich vlastností je možné budovat moderní stavby vytvářející tepelnou pohodu a dobré vlhkostní mikroklima.

Používání kvalitních tepelně izolačních materiálů, správný návrh energeticky úsporných stavebních konstrukcí a v neposlední řadě dodatečné zateplování stávajících konstrukcí má klíčový význam ve snížení jejich energetické náročnosti. Tím dochází k omezení emisí plynů, sazí a prachu, což má přímý vliv na zlepšení životního prostředí. V současnosti je

tato problematika obzvláště významná s přihlédnutím k negativním aspektům globálního oteplování a dále z pohledu podmínek Kjótského protokolu, který Česká republika ratifikovala v říjnu roku 2001, dále pak s přihlédnutím ke směrnici Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU a požadavkům zákona č. 406/2000 Sb. - o hospodaření energií a souvisejících předpisech (ve znění zákona 318/2012 Sb. ze dne 3. 10. 2012), a dále již výše zmíněným energeticko-klimatickým balíčkem „20-20-20“. [3]

Hlavním cílem disertační práce je výzkum a vývoj nových environmentálně úsporných izolačních materiálů ze snadno dostupných surovinových zdrojů a studium jejich tepelně vlhkostního chování. Předpokladem je, že tyto materiály budou cenově přijatelné a svými vlastnostmi budou minimálně plně srovnatelné s dnes běžně užívanými izolačními materiály.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. Izolační materiály

Slovo izolace původem pochází z latinského slova „insula“, které představuje ostrov, a z francouzského slova „isolé“, znamenající oddělený či osamělý. Izolační materiály byly na počátku svého vývoje využívány zejména za účelem ochrany stavebních konstrukcí před nepříznivými účinky povětrnostních vlivů, s rozvojem společnosti však začaly plnit i funkce další, např. ochrannou funkci. V současné době nabízí stavební trh široké spektrum izolačních materiálů s nejrůznějšími speciálními funkcemi.

Existuje mnoho způsobů základního rozdělení izolačních materiálů dle různých hledisek, například dle:

- funkce izolačních materiálů,
- surovinového původu izolačních materiálů.

1.1. Rozdělení izolačních materiálů dle jejich funkce

Z hlediska jejich funkce ve stavebních konstrukcích lze izolace rozdělit do čtyř základních skupin:

1. *Izolace proti vodě a vlhkosti.* Do této skupiny jsou řazeny izolační materiály chránící stavební objekt před pronikáním vody a vodní páry. Tuto skupinu lze dále rozdělit na hydroizolace (izolace proti vodě a vlhkosti) a parozábrany (izolace proti vzdušné vlhkosti). Další dělení izolací proti vodě a vlhkosti je následující:

- **dle umístění v konstrukci** (izolace spodní stavby; izolace střech; izolace bazénů, nádrží, jímek; izolace tmelů a ražených podzemních staveb; izolace mostů a speciálních konstrukcí),
- **dle materiálu tvořícího izolační vrstvu** (izolace živичné – dehty, asfalty nebo bitumeny, které se dále rozdělují na přírodní, ropné, oxidované, modifikované plastomery a modifikované elastomery; izolace fóliové – termoplasty, termoplastické elastomery, elastomery; stěrky, nástřiky a nátěry; izolace silikátové – speciální cementové tmely; izolace speciální – chemické injektivní látky, lamináty, jíly, bentonity). [4]

2. *Tepelně izolační materiály.* Tyto materiály účinně zabraňují přenosu tepelné energie z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Jejich hlavní role spočívá ve snížení tepelných ztrát stavební konstrukce. Tyto materiály jsou dále rozděleny:

- dle druhu základní hmoty (anorganické, organické),
- dle struktury (vláknité, pórovité neboli pěnové, zrnité),
- dle obsahu pojiva (obsahující pojiva, neobsahující pojiva),
- dle tvaru výrobku (volný – zásyp, vlna; plochý – deska, rohož, plst'; tvarový – skruže, segmenty; šňůrový – těsnící provazce),
- dle reakce na oheň (A1, A2, B, C, D, E, F),
- dle vlastního materiálu (lehké silikátové hmoty – lehká kameniva, lehké betony; pěnové anorganické hmoty – pěnové sklo; pěnové organické hmoty – pěnové plasty; vláknité anorganické hmoty – skleněná a minerální vlákna; hmoty z organických materiálů – korek, dřevěná vlna, papír, technické konopí, len,...).

3. *Akusticko izolační materiály.* Ochrana proti hluku patří dle Směrnice Rady 89/106/EHS (u nás dle vyhlášky MMR 268/2009 Sb.) k šesti závazným požadavkům kladených na stavební konstrukce, mezi něž patří také požadavek na: mechanickou odolnost a stabilitu; požární bezpečnost; hygienu, ochranu zdraví a životního prostředí; bezpečnost při užívání; úsporu energie a ochranu tepla. Obecnou funkcí této skupiny izolačních materiálů je zejména zamezit, případně upravit šíření zvukových a mechanických vln ve stavební konstrukci. Tyto materiály řeší problematiku hluku ve stavebních konstrukcích a to především v oblasti vzduchové a kročejové neprůzvučnosti, kde se jedná právě o zamezení šíření hluku stavební konstrukcí a dále v oblasti zvukové pohltivosti, kde je snaha zejména o usměrnění a zoptimalizování parametrů zvuku v slyšitelné oblasti a srozumitelnosti.

4. *Speciální izolační materiály.* Do této kategorie patří izolační materiály se speciálními funkcemi, např. izolace proti radonu, protichemické izolace, izolace proti elektromagnetickému vlnění a ionizujícímu záření, izolace proti karbonataci, dále jsou zde zahrnuty také materiály odolné vůči vysokým, případně nízkým teplotám či tlakům. [5]

1.2. Rozdělení izolačních materiálů dle jejich původu

Dle původu izolačních materiálů se rozeznávají v praxi:

- syntetické izolační materiály (klasické, dnes běžně užívané izolace),
- přírodní izolační materiály.

Při volbě vhodného izolačního materiálu do stavební konstrukce (syntetický či přírodní) je nutné zvážit nejen tepelně technické vlastnosti zabudovaných hmot, ale také environmentální dopad. Se stále zvyšujícím se počtem obyvatel roste též spotřeba energie, s tím úzce souvisí mnoho dalších negativních faktorů, např. růst emisí CO₂. Při hodnocení

materiálů je tedy nezbytně nutné přihlížet k jejich ekologické stopě. Již řadu let jsou sledovány environmentální důsledky stavebních materiálů na kvalitu životního prostředí. Pro řešení této problematiky je nutné numericky definovat podíl energetické složky a výši vlivu produktu na životní prostředí. Rozlišují se tři hlediska:

1. *Množství vázané primární energie*, též označované jako šedá energie (PEI - Primary Energy Input = primární energie v určeném materiálu v MJ.kg^{-1}).

PEI představuje energii vynaloženou na získání suroviny, samotnou výrobu a dopravu materiálu.

2. *Emise CO_2* (GWP - Global Warming Potential = potenciál globálního oteplování).

GWP vykazuje emise látek, které přispívají ke skleníkovému efektu. CO_2 v tomto případě slouží jako srovnávací ekvivalent, vzhledem k jeho množství v atmosféře. GWP vyjadřuje množství uvolněného CO_2 během výrobního procesu v kilogramech.

3. *Emise SO_2* (AP - Acidification Potential = potenciál zakyselení životního prostředí).

Jako srovnávací element pro AP slouží právě SO_2 , ale týká se i dalších oxidů např. oxidu dusíku a NH_3 . AP udává informace o zasažení přírody průmyslovou výrobou. [1, 6]

Syntetické izolační materiály vznikají syntézou dílčích anorganických či organických složek. S těmito materiály se v současné době setkáváme v praxi nejčastěji. Mezi nejvýznamnější a nejvíce používané zástupce patří např. polystyren (EPS, XPS), minerální vlna, polyuretan a mnoho dalších. Tato skupina syntetických izolací se dále rozděluje dle chemické povahy na:

- minerální (anorganické) izolační materiály,
- organické izolační materiály.

Pro výrobu syntetických izolačních materiálů je nutné mít k dispozici nejen dostatečné zásoby nerostných surovin, ale také velké množství vstupní energie pro výrobní proces. Minerální anorganické izolace vycházejí z technologie zpracování nerostů, kterým může být např. čedič. Výsledným produktem tohoto procesu tavení nerostů je izolační materiál ve formě vlny či vaty. Vstupní surovinou u organických izolačních materiálů je nejčastěji ropa a její deriváty. Zde vzniká riziko spojené se spolehlivostí dodávek, otázkou je též budoucí cena tohoto neobnovitelného přírodního zdroje.

Obliba přírodních tepelných izolací ve světě neustále stoupá. Vzhledem k tomu, že v blízké budoucnosti bude umožněna dle Zákona č. 318/2012 Sb. pouze výstavba budov s nulovou spotřebou energie, lze očekávat zvyšující se poptávku po izolačních materiálech, což bude mít i pozitivní vliv na využití netradičních, alternativních izolací na bázi přírodních vláken. Této skupině izolačních materiálů je věnována více kapitola 2. Přírodní izolační materiály na bázi obnovitelných surovinových zdrojů.

2. Přírodní izolační materiály na bázi obnovitelných surovinových zdrojů

Současné vývojové trendy jsou v obecné rovině úzce spjaty s myšlenkami trvale udržitelného rozvoje. V daleko větší míře, nežli tomu bylo v minulosti, vznikají obavy z vyčerpání surovinových a energetických zdrojů, z nadměrného znečišťování ovzduší. Stále větší důraz se klade na zdravotní nezávadnost materiálů a recyklovatelnost. Uvedené tendence se promítají i do inovací stavebních konstrukcí. Pozornost se začíná přesouvat od energeticky náročných technologií k organické materiálové bázi, tzn. přírodním surovinám, které většinu požadavků udržitelného rozvoje splňují.

Nejen na českém stavebním trhu, ale i v ostatních vyspělých zemích a zemích EU stále více stoupá obliba využití alternativních tepelně izolačních materiálů na bázi organických surovinových zdrojů pocházejících ze zemědělství, ale i recyklátů či odpadních produktů z jiných průmyslových odvětví. Pěstování přírodních surovinových zdrojů, které mohou být ekologicky zpracovány a využity nejen v zemědělském průmyslu, je v současnosti podporováno EU. V zemích jako jsou Francie, Německo či Rakousko se s těmito materiály setkáváme velmi často, úzce je to spjato s výstavbou nízkoenergetických a pasivních domů a také velkým úsilím uvedených zemí provádět kvalitní, energeticky nenáročné, ekologické a ekonomicky dostupné stavební konstrukce. Tyto materiály se postupně začínají prosazovat i v České republice a získávají si mezi investory stále větší oblibu. Tento trend úzce souvisí se snahou české společnosti o zachování optimálních životních podmínek pro nastupující generace obyvatel.

Snadno obnovitelné materiálové zdroje jsou významné i z pohledu udržitelnosti materiálových zdrojů, která je jednou z šesti prioritních oblastí zaměření VaVaI v ČR do roku 2030 (dle usnesení vlády č. 552 ze dne 19. 7. 2012).

Důvodem k návratu využívání přírodních izolačních materiálů či materiálů z alternativních surovinových zdrojů ve stavebním odvětví jsou následující pozitivní skutečnosti:

- představují snadno obnovitelné zdroje,
- představují lokálně dostupnou materiálovou základnu,
- jejich vlastnosti jsou blízké potřebám lidského organismu, především z pohledu vnitřního vlhkostního mikroklimatu,
- dochází ke snížení energetické náročnosti výroby,

- snadnější recyklace těchto přírodních produktů po ukončení jejich životnosti v porovnání s klasickými běžně užívanými materiály,
- nižší pořizovací cena vstupních komponent,
- v blízké budoucnosti výstavba pouze pasivních a nízkoenergetických stavebních konstrukcí.

Přírodní stavební materiály dobře regulují vlhkost vzduchu ve vnitřním prostředí, jejich charakteristická vůně působí blahodárně na lidskou psychiku. V této souvislosti probíhá světový výzkum zabývající se studiem vlivu budov na zdraví lidí. Ubírá se několika směry, mezi významné řadíme:

- IAP (Indoor Air Pollution) zabývající se negativním působením škodlivin z fyzikálního, chemického a biologického hlediska,
- SBS (Sick Building Syndrome) – syndrom nemocných budov – zabývající se negativním ovlivněním zdraví člověka v budovách bez prokazatelného původu a souvislostí,
- BRI (Building Related Illness) zabývající se chorobami, které mají prokazatelný původ v samotné budově. [1]

Tab. 1 Vybrané klasické i přírodní izolační materiály a jejich hodnoty podílu energetické složky PEI a jejich míry vlivu na kvalitu životního prostředí vyjádřenými parametry GWP a AP [1, 6]

<i>Izolační materiál</i>	ρ_v [kg.m ⁻³]	PEI [MJ/kg]	GWP [kg CO ₂ ekv /kg]	AP [kg SO ₂ ekv /kg]
Konopné rohože bez PE vláken	30	27,100	-0,377	0,00437
Konopné rohože s PE vlákny	30	31,100	-0,133	0,00539
Lněné rohože bez PE vláken	30	34,000	0,121	0,00772
Lněné rohože s PE vlákny	30	38,000	0,364	0,00874
Ovčí vlna	30	14,700	0,045	0,00266
Korek	120	7,100	-1,230	0,00274
Skleněná vata	25	49,800	2,260	0,01600
Celulóza (volná)	35	7,030	-0,907	0,00341
Minerální vlna	33	23,30	1,640	0,01050
Minerální pěna (Multipor)	115	4,770	0,474	0,00111
EPS F	18	98,500	3,350	0,02160
XPS vypěňovaný CO ₂	38	102,000	3,440	0,02110

Jak lze ve výše uvedené tabulce 1 pozorovat, jsou emise skleníkových plynů CO₂ a SO₂ u přírodních materiálů v porovnání s dnes běžně užívanými materiály nízké.

Existují však také negativa přírodních materiálů, na které je nutné pamatovat. Mezi ně řadíme především vyšší vlhkostní citlivost a horší reakci na oheň v porovnání s klasickými izolacemi dnešní doby. Nadměrná dlouhodobá vlhkost může vést až k biologické korozi, tedy degradaci působením bakterií, plísní či hub. Reakci na oheň u přírodních materiálů je možné vylepšit přísadami retardujícími hoření či aplikacemi nehořlavých povrchových úprav (omítka nebo obklad). Efektivním využitím vlastností přírodních izolačních materiálů lze získat moderní stavby, které vytváří tepelnou pohodu a také dobré vlhkostní mikroklima.

Přírodní izolační materiály lze získat z obnovitelných zdrojů rostlinného či živočišného původu. Mezi již dávno známá živočišná vlákna, která našla uplatnění jako izolace ve stavebnictví, patří například ovčí vlna.

Rostlinná vlákna lze získat z různých částí rostlin, a proto jsou rozdělována do následujících skupin:

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

Z hlediska uplatnění ve stavebnictví, pro výrobu izolačních materiálů jsou využívána vlákna lýková. V následující tabulce 2 je uveden přehled světové spotřeby lýkových vláken a jejich vybraných fyzikálních vlastností.

Tab. 2 Světová spotřeba a vybrané fyzikální vlastnosti nejdůležitějších vláken [7, 8]

<i>Lýkové vlákno</i>	<i>Světová spotřeba</i> [tis. t]	<i>Střední délka</i> [mm]	<i>Střední jemnost</i> [μm]	<i>Relativní pevnost</i> [mN/tex]
Juta	2850	2–4	15–20	53–196
Len	850	17–20	12–17	440–530
Konopí	214	10–14	14–17	290–690
Ramie	170	50–65	30–50	500–900
Bavlna	26000	19–38	10–17	245–370

Podrobněji budou přírodní vlákna rozvedena v kapitole 4 „Vlákna využitelná při výrobě izolačních materiálů a jejich možné zpracování“.

V současné době existuje v České republice a zemích EU široká škála potenciálních surovinových zdrojů, které by mohli využít producenti izolačních materiálů pro výrobu těchto stavebních materiálů.

V níže uvedené tabulce č. 3 jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti charakteristické pro přírodní izolační materiály. Nejvýznamnější vlastností tepelně izolačních materiálů je součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. Na základě uvedených charakteristických hodnot lze konstatovat, že součinitel tepelné vodivosti se u syntetických a přírodních izolačních materiálů výrazně neliší. Dalším posuzovacím parametrem je měrná tepelná kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. Tabelované hodnoty měrné tepelné kapacity v suchém stavu jsou u přírodních materiálů vyšší oproti anorganickým materiálům, např. oproti minerální vlně. Širší interval hodnot normových objemových hmotností v suchém stavu $\rho_{v,dn}$ je ovlivněn především technologií zpracování přírodních surovinových zdrojů. Faktor difúzního odporu μ (suchý, mokrý) přírodních materiálů je blízký syntetickým izolačním materiálům typu skelná či minerální vata.

Tab. 3 Vybrané fyzikální vlastnosti u přírodních stavebních materiálů používaných ve stavebnictví nejen v zemích EU [1]

<i>Materiál</i>	<i>Součinitel tepelné vodivosti v suchém stavu λ_k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]</i>	<i>Objemová hmotnost v suchém stavu $\rho_{v,dn}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]</i>	<i>Měrná tepelná kapacita v suchém stavu c_{dn} [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]</i>	<i>Suchý/Mokrý Faktor difúzního odporu $\mu_{n,d} / \mu_{n,w}$ [-]</i>
Len	0,040	20–40	1600	1 / 2
Technické konopí	0,040	20–25	1600	1 / 2
Dřevovláknité desky				
- pevné	0,070	160–250	2000	5 / 10
- flexibilní	0,040	40–60	2000	1 / 2
Kokosová vlákna				
- role	0,050	75–80	1650	1 / 2
- rohože	0,045	120–135	1650	5 / 10
Korek				
- granulát	0,050	55–60	1560	5 / 10
- desky	0,058	80–500	1560	5 / 10
Granulát ze žita	0,050	100–120	1900	2 / 3
Ověčí vlna	0,040	20–25	1700	1 / 2
Rákos	0,050	190–225	1870	1 / 2
Mořská tráva	0,045	70–80	2000	1 / 2
Slaměné balíky	0,066	90–110	1800	2 / 4
Seno	0,040	30–65	2196	1 / 2

3. Přehled vybraných přírodních surovinových zdrojů

Na celém světě existuje široká škála možných přírodních snadno obnovitelných surovinových zdrojů, které by byly vhodné pro výrobu izolačních materiálů. S ohledem na lokální dostupnost surovinových zdrojů v ČR je tato kapitola zaměřena především na suroviny dostupné v rámci ČR a zemí EU.

3.1 Konopí seté (*Cannabis sativa* L.)

3.1.1 Historie a současnost pěstování konopí setého

Konopí je prastarou kulturní rostlinou, jejíž počátky pěstování zasahují do oblastí Střední Asie, Číny a Indie v období 3. tisíciletí před n. l. Do Evropy proniklo pěstování konopí v 7. století před n. l., na území České republiky a Slovenska nastal rozmach pěstování konopí na konci 18. století. Vzhledem k dovozu levnějších vláken z bavlny došlo na počátku 20. století k omezení pěstování této plodiny. V České republice se konopí pěstovalo až do r. 1956. V dalším období se pak konopí pěstovalo již pouze na jihu Slovenska, plocha osevu postupně klesala a pěstování bylo ukončeno v r. 1988. Po roce 1995 zaznamenalo konopí seté v České republice renesanci svého pěstování, avšak od roku 2007 se osevní plochy technického konopí v České republice pětinasobně zmenšily, dle dostupných údajů ministerstva zemědělství ČR. [9] Hlavním důvodem je pokles cen konopného vlákna, který nastal v důsledku hospodářské krize. Zatímco v roce 2007 dosahovaly pěstitelské plochy konopných polí, na které byly uzavřeny smlouvy se zpracovateli, 1530 ha, v roce 2008 se snížily na 518 ha. V roce 2009 bylo vyseto konopí pouze asi na 142 ha zemědělské půdy.

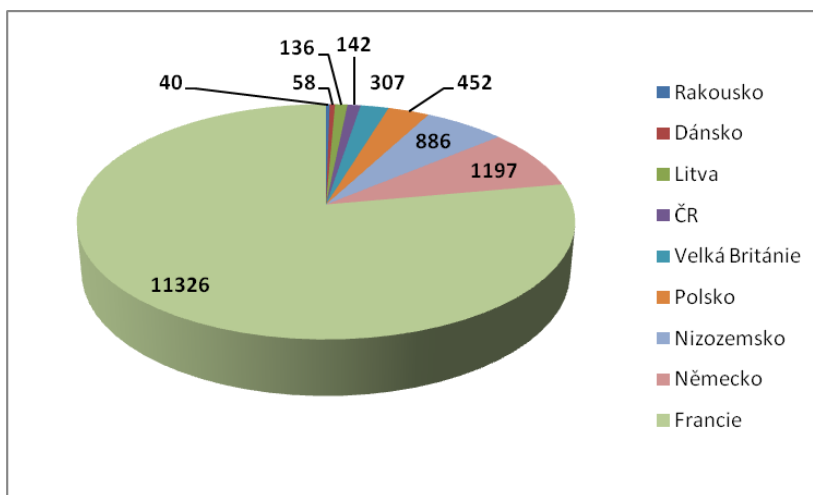
Pěstitelská plocha konopí setého v rámci zemí EU, na kterou byly uzavřeny smlouvy se zpracovateli této plodiny, značně kolísá. Při porovnání osevních ploch touto zemědělskou plodinou v jednotlivých obdobích (2005 až 2010) v rámci EU zjistíme, že k výraznému poklesu došlo v letech 2008 a 2009, kdy osevní plochy konopí setého dosahovaly pouze 10 544 ha na území států EU. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny níže na obr. 2. Dle posledních zveřejněných údajů Komise EU pro len a konopí z roku 2010 jsou hlavními producenty této zemědělské plodiny Francie, Německo, Nizozemsko a Polsko. Dalšími významnými státy, v nichž se konopí pěstuje pro vlákno, jsou především Rusko a Ukrajina. V ostatních se pěstuje konopí seté v malém rozsahu. S ohledem na snížení osevních ploch nejsou od r. 2010 statistiky uváděny. [9]

Přitom vývoj obchodu s konopnými produkty roste a poptávka po nich se neustále zvyšuje. Zájem je jak o surovinu - konopné vlákno, konopná semena, tak o hotové produkty. V současné době konopí využívá mnoho průmyslových odvětví, mezi ně patří především papírenský, textilní, automobilový a stavební průmysl. Stále populárnější se stává konopná kosmetika, konopné potraviny a léčiva. Konopí, především konopné pazdeří, lze užít i jako palivo.

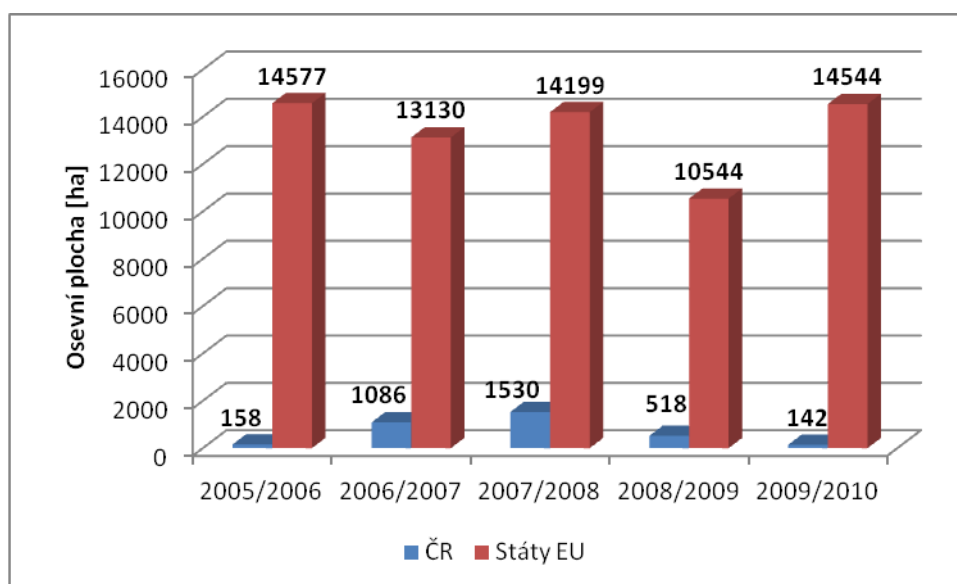
Podle Die nova-Institutu GmbH se sídlem ve městě Hürth v Německu, jenž se zabýval obchodními a cenovými poměry v sektoru přírodních vláken, se náklady na získání 1 tuny konopného stonku pohybují v mezích od 724 do 836 Eur při výnosech 6 až 8 tun stonku na 1 hektaru půdy. Byla též zveřejněna maximální možná cena 1 tuny konopného vlákna, která činí 450 Eur, přičemž výnos z 1 ha činí 1,6 tun konopných vláken. [10, 11]

Výhledově se předpokládá, že zemědělské výrobní náklady vzrostou. Cena konopného pazdeří zřejmě zůstane ve stejné cenové hladině vzhledem ke konkurenčním výrobkům, avšak tlak na růst cen lze očekávat u konopného vlákna v sortimentu kvalitou odpovídajícím materiálům pro výrobu rouna. Ovšem perspektivy užití vláken konopí jsou velice slibné a mnoho výzkumných institucí se této problematice věnuje již řadu let. Konopná vlákna mohou být vstupními surovinovými zdroji pro izolační materiály aplikované ve stavebnictví, v automobilovém průmyslu, dále pak mohou být složkami kompozitních materiálů, či být použity při výrobě plastických hmot. Problém vzniká především u dostupnosti a správnosti informací týkajících se velikosti osevních ploch a produkci technického konopí v ostatních světových zemích.

V zemích EU se pěstuje konopí seté, jak na vlákno, tak i pro energetické účely. Pěstování setého konopí je podporováno a konopné materiály jsou mezi spotřebiteli propagovány. Důvodem je tendence nahrazovat ve větší míře umělá vlákna, jejichž likvidace je z hlediska životního prostředí stále více problematická. Po lnu je konopí druhou nejrozšířenější přadnou rostlinou mírného pásma. [9, 12]



Obr. 1 Grafický přehled osevní plochy konopí setého v ha v zemích EU v letech 2009/2010 [9]

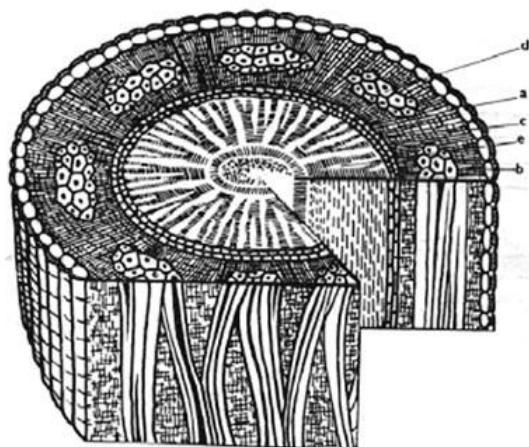


Obr. 2 Osevní plochy konopí setého v ha v zemích EU a v ČR v období 2005 až 2010 [9]

3.1.2 Charakteristika konopí

Konopí je charakterizováno jako jednoletá 80–350 cm vysoká dvoudomá bylina, řazená do čeledi konopovitých (Cannabaceae). Rostlina vytváří vřetenovitý kořen sahající běžně do hloubky 30–40 cm, na sušších stanovištích i hlouběji. Stonek je přímý, podle typu konopí dosahuje délky až 4 m a tloušťky až 3 cm. Na spodu rostliny je kulatý, uprostřed pak šestihranný, a v horní části čtyřhranný, často podélně rýhovaný. Je dutý, rozdělen na 7–15 internodií. Čím je menší počet internodií a jejich větší délka, je vlákno kvalitnější. Stavba stonku na příčném řezu je znázorněna na obr. 3, 4. Listy ve střední části lodyhy jsou dlanitě 5–7četné, ostatní jsou kopinaté, hrubě zubaté. Nejvyšší listy jsou většinou

trojčetné s lístky čárkovitými. Samičí rostliny, nazývané jako konopí hlavaté, jsou v porovnání se samčími rostlinami, označovanými jako konopí poskonné, větší a více olistěné s tmavě zbarvenými listy. Samčí květenství je latnaté, samičí je úžlabní. Květy samčích rostlin jsou pětičetné žlutavé, samičí jsou tmavozelené. Plodem je nažka.



Obr. 3 Stavba konopného stonku a- pokožka,

Obr. 4 Stavba konopného stonku [13]

b- parenchym, c- kambium, d- vlákno,

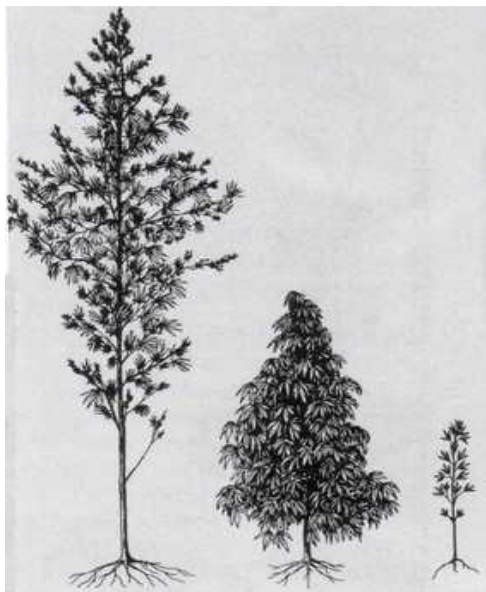
e- dřevovina [12]

Na rozdíl od lnu jsou svazky vláken ve stonku konopí rozmístěny nepravidelně, vytváří se primární i sekundární vlákna. Primární vlákna jsou uložena ve vnějším kruhu lýkových svazků, sekundární vlákna ve vnitřním kruhu lýkových svazků. Na spodní části stonku jsou převážně sekundární vlákna, ve vrchní části stonku jsou převážně primární vlákna. Sekundární vlákna jsou horší jakosti (kratší, dřevnatější, méně elastické). Konopné vlákno je pevné, avšak méně pružné. Děložní listy jsou jednodílné, podlouhle oválné. Právě listy jsou 3–13četné, protáhlé, na konci zašpičatělé, s pilovitým okrajem.

Nejčastěji jsou rozeznávány 3 druhy konopí z rodu Cannabaceae:

- *Konopí indické (Cannabis indica)*, někdy uváděné i jako *Cannabis sativa* se pěstuje pro pryskyřičný sekret, který je vylučován žláznatými listy a především samičím květenstvím. Tato pryskyřice obsahuje cannabinoidy: cannabidiol, cannabinol a hlavně delta-9-tetrahydrocannabinol-THC ($C_{12}H_{30}O_2$), jejíž vlastnosti se využívají pro výrobu marihuany (sušené listy a samičí květenství) a hašiše (pryskyřice).

- *Konopí plané* nebo *rumištní* (*Cannabis ruderalis*), představuje spíše plevelnou rostlinu původem z jižní části Ukrajiny.
- *Konopí seté* (*Cannabis sativa*), nazývané jako kulturní nebo technické konopí s všestranným využitím. Obsahuje méně než 3 % THC. V průmyslu je využíváno pro svůj vysoký obsah celulosy a ligninu, má velmi pevná a kvalitní lýková vlákna, semena s vysokým obsahem oleje a pazdeří. Konopí seté produkuje 2,5x více vláken než bavlník a 6x více vláken než len.



Obr. 5 *Cannabis sativa*, *C. indica*, *C. ruderalis* [14]

Z hlediska chemického jsou vlákna z konopí tvořená převážně celulórou (70,2–74,4 %), hemicelulórou (17,9–22,4 %), ligninem (3,5–5,7 %), pektiny (0,9 %), vosky (0,8 %), vodou (10,8 %). Zbýlých 6,1 % tvoří další složky (pryskyřice, popeloviny a proteiny). Jakožto organický materiál, vykazuje konopí značnou nasákavost (80–100 %) a velice nízkou sypnou (80 kg.m^{-3}) a měrnou (1500 kg.m^{-3}) hmotnost. [13, 14]

3.1.3 Využití produktů konopí

Konopí seté, jako významný zdroj přírodního vlákna a organické hmoty má mnohostranné využití. Jedná se o rostlinu, kterou lze celkově využít bez vzniku odpadu. Nejčastěji se využívají konopná vlákna, pazdeří i semena.

Konopné vlákno nachází uplatnění v klasické výrobě textilních materiálů (plátno, džínovina, dekorační a potahové látky, koberce), při výrobě speciálních textilií a výrobků určených pro průmyslové využití (lana, provazy, nitě, motouzy, plachtoviny, pytle, kordy

do pneumatik), dále méně hodnotná a krátká vlákna nachází uplatnění ve stavebním průmyslu jako součást stavebních materiálů s dobrými tepelně a akusticko izolačními vlastnostmi (izolační rohože, dřevovláknité desky, minerálně obohacené plstěné geotextilie). Uplatnění nachází také jako čalounický a těsnicí materiál. Vlákna jsou možným zdrojem rostlinné buničiny pro výrobu benzínu, dřevěného uhlí, metanolu, plynu a elektřiny.

Pazdeří, odpad vznikající při zpracování konopných stonků na vlákna, obsahující značné množství celulózy, má širokou řadu využití. Lze jej využít v papírenském průmyslu (cigaretový papír, filtry, bankovky), dále ve stavebnictví (pazdeřo-konopné desky, stavební příčky apod.), dále v automobilovém průmyslu (směs konopných vláken a pazdeří slouží jako výplňové a izolační hmoty). Dále je používáno ve formě briket jako ekologické palivo či jako stelivo pro zvířata.

Široké spektrum využití mají konopná semena. Můžeme se s nimi setkat v potravinářství (konzervárenství), v chemickém průmyslu (výroba laků, fermeží, mazivových olejů, mýdel), v kosmetickém průmyslu (pleťové krémy, vlasová kosmetika apod.), v lékařství a veterinární medicíně (dermatologické přípravky), slouží i jako krmivo pro ptáky, ryby.

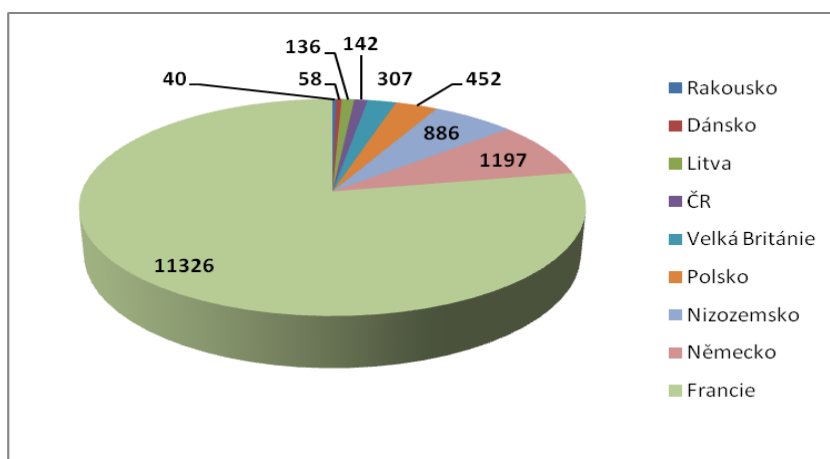
Uplatnění nachází také květy rostliny, setkat se s nimi můžeme v potravinářském a kosmetickém průmyslu. Celou rostlinu lze využít při pěstování na biomasu a využití k energetickým účelům pro spalování. [15, 16]

3.2 Len setý (*Linum usitatissimum* L.)

3.2.1 Historie a současnost pěstování lnu setého

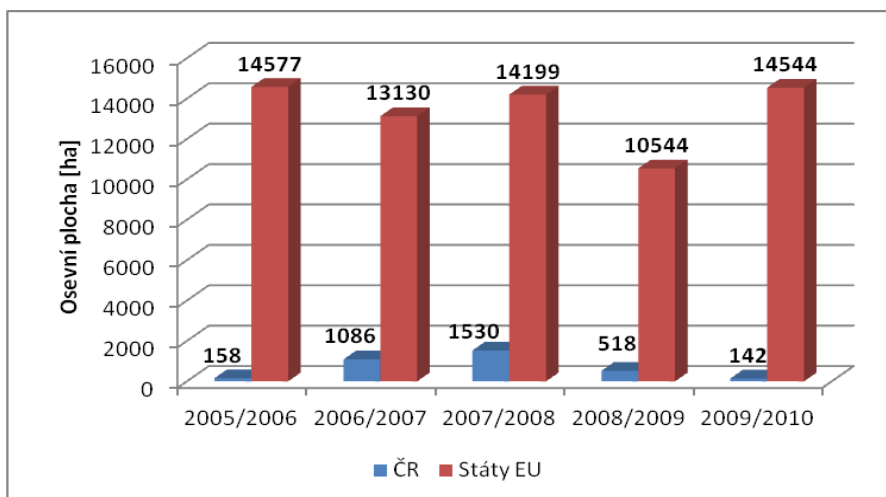
Len patří ke starým kulturním bylinám, jejichž pěstování bylo známo v Mezopotámii již 6 tisíc let před n. l. Rostlina byla patrně vyšlechtěna z mediteránního druhu *Linum bienne* Mill. Z lněných vláken byly tehdy vyráběny tkaniny, provazy a sítě. Odtud se rozšířilo pěstování lnu do Egypta, kde dosáhlo vysoké úrovně nejenom jeho pěstování, ale i zpracování. Důkazem mohou být pruhy lněných tkanin, ve kterých byly dochovány mumie faraónů. Odtud se dále pěstování rozšířilo do Persie, pak do oblasti Středomoří a Indie. Římané spolu se Slovany rozšířili pěstování lnu v Evropě. V Čechách v roce 1770 vydala Marie Terezie patent o pěstování lnu a předání příze. Světová produkce lněného dlouhého vlákna je koncentrována především v zemích západní Evropy.

V posledních několika letech nastal pokles osevních ploch lnu přadného po celém světě. I v tradičních lnářských západoevropských zemích jako jsou Francie, Belgie a Nizozemsko, které tvoří čtvrtinu světové osevní plochy této plodiny. Hlavním důvodem jsou zejména nízké ceny lnářských surovin na světových trzích. V České republice bylo v roce 2010 ukončeno pěstování lnu přadného. Staletí trvající tradice pěstování a zpracování lnu přadného v Českých zemích tak bylo prakticky ukončeno. Pěstební plochy lnu olejného v České republice meziročně kolísají. V roce 2005 došlo ke skokovému nárůstu na 7335 ha, v roce 2006 došlo ještě k mírnému navýšení na 7869 ha. V roce 2007 se osevní plochy výrazně snížily na 2642 ha. Tento pokles byl způsoben odbytovými problémy semene a poklesem ceny na 9972 Kč/t. Toto vedlo v následujícím roce ke snížení osevních ploch až na 1171 ha, v roce 2009 došlo k mírnému navýšení osevní plochy na 2631 ha, v roce 2010 činila osevní plocha 3400 ha. V současné době se z ekonomických důvodů od pěstování této rostliny ustupuje. Přednost dostávají jiné hospodářské, ekonomicky výnosnější plodiny. [9]



Obr. 6 Grafický přehled osevní plochy lnu přadného v ha v zemích EU v letech 2009/2010

[9]



Obr. 7 Osevní plochy lnu přadného v ha v zemích EU a v ČR v období 2005 až 2010 [9]

3.2.2 Charakteristika lnu

Rod *Linum* zahrnuje okolo 200 druhů, z nich praktický význam má především druh *Linum usitatissimum* L., neboli len setý, jenž má mnoho forem. Dle délky vegetační doby se len setý rozděluje na:

- len vytrvalý či dvouletý (*Linum angustifolium*),
- len trvale jednoletý (*Linum usitatissimum*).

Průmyslové využití má odrůda trvale jednoletého lnu, která se dále rozlišuje dle tobolek na:

- len s tobolekami pukavými – len prahlý (*Linum crepitans*),
- len s tobolekami nepukavými – len mlátec (*Linum vulgare*), který se dále rozděluje na formu:
 - ozimou (*biennis*),
 - jarní (*typicum*)- hospodářsky nejvýznamnější.

Podle velikosti semen se len setý dělí na:

- len olejný (*makrospermum*),
- len přadný (*mikrospermum*).

Tyto dva druhy představují 2 základní užitkové typy.

Len přadný má delší, jemnější, méně rozvětvený stonek. Hlavní surovinou z něj získávanou jsou stonky, které se zpracovávají na dlouhá vlákna a krátká vlákna, označovaná jako koudel. Vyrábějí se z něj tkaniny, pytle, cigaretové papírky. Semena představují pouze vedlejší produkt, vyrábí se z nich technický olej (výroba barev, fermeží,

laků, linolea, imitací kůže), extrahovaný šrot a pokrutiny je možné použít ke krmným účelům. V České republice převažuje pěstování tohoto typu lnu.

Len olejný má kratší a silnější stonky s rozvětveným květenstvím a větším počtem tobolek. Semena lnu se využívají v potravinářství, při výrobě krmiv a k technickým účelům. Stonky jsou vedlejším produktem, vlákno je hrubší než u přadného typu a obtížněji spradatelné. Je možné jej zpracovávat na koudel či pro využití v papírenském průmyslu. Ve světě se častěji setkáme s tímto typem olejného lnu.

Len setý dorůstá až do výšky 150 cm, jehož vegetační doba se pohybuje okolo 90 dnů. Lodyhy lnu setého jsou přímé, hustě listnaté. Listy jsou čárkovitě kopinaté až čárkovité, špičaté, trojžilné a celokrajné. Květy jsou umístěny v bohatých vrcholičnatých květenstvích, světle modré nebo bílé barvy, tobolky jsou kulatě vejčité. Stonek tvoří kutikula neboli vosková vrstva, která kryje pokožku, pod kterou se dále nachází lýková část stonku složená z primární kůry, korového parenchymu, škrobové vrstvy, svazků vláken, sekundární lýkové kůry a sítkovic. Lýková část stonku tvoří 40–50 % jeho hmotnosti. Dřevní část stonku, která představuje podstatnou část pazdeří, tvoří 50–60 % celkové hmotnosti stonku. Obsah vlákna ve stonku kolísá okolo 25–30 % hmotnosti stonku. Jakost vlákna se vyjadřuje v TEXech. Jeden TEX je hmotnost 1 km vlákna v gramech. Čím je hodnota TEX nižší, tím je kvalita lepší. Len je citlivý na zásobování vodou a proto by měl být pěstován v oblastech s ročním úhrnem srážek vyšším jak 600 mm.

Chemickou podstatu lněného vlákna tvoří celulóza (71–75 %), dále pak hemicelulóza (18,6–20,6 %), lignin (2,2 %), pektiny (2,2 %), vosky (1,7 %), další složky (3,8 %) a voda (10 %). Barva lnu je přírodní, od světle plavé až po sytější odstíny zelené, hnědé a šedé.

Len má přirozený lesk, vyniká vysokou pevností a schopností přijímat vlhkost. Lněná vlákna mohou přijmout až 30 % vody a přitom nejsou na omak mokrá. Tepelná odolnost lnu je vyšší než u bavlny, len snáší teploty i přes 200 °C. Lněné materiály mají dlouhou životnost, avšak delším působením slunečního záření ztrácí postupně svoji pevnost. [1]

3.2.3 Využití produktů lnu setého

Len setý je jedna z nejužívanějších bylin v oblasti textilního, potravinářského a technického průmyslu. Len, v podobě izolačního materiálu, je na trhu k dostání v několika formách, buď jako volně sypaný, anebo jako plst' či ve formě desek. Izolace ze lnu nacházejí uplatnění zejména jako vnitřní izolace stěn, stropů a podkroví. Při manipulaci s nimi nedochází k podráždění kůže, tudíž se s izolací snadno pracuje bez použití

ochranných pomůcek, toto obecně platí i pro další přírodní materiály, např. technické konopí. Lněné izolace vykazují velmi dobrou trvanlivost. Nevýhodou lněných vláken je jejich hořlavost, proto se do nich přidávají sloučeniny amoniaku, boraxu či vodního skla. Další nevýhodou je lámavost vláken, z tohoto důvodu se do lněných produktů přidávají polyesterová vlákna. Lýko ze stonku se používá pro textilní účely. Rozlámaný dřevnatý stonek, tzv. pazdeří, se původně přidával do cihel-vepřovic, později se lisoval s pojivem na pazdeřové desky pro stavební a nábytkářský průmysl. Semínka se využívají k výrobě lněného oleje. [1]



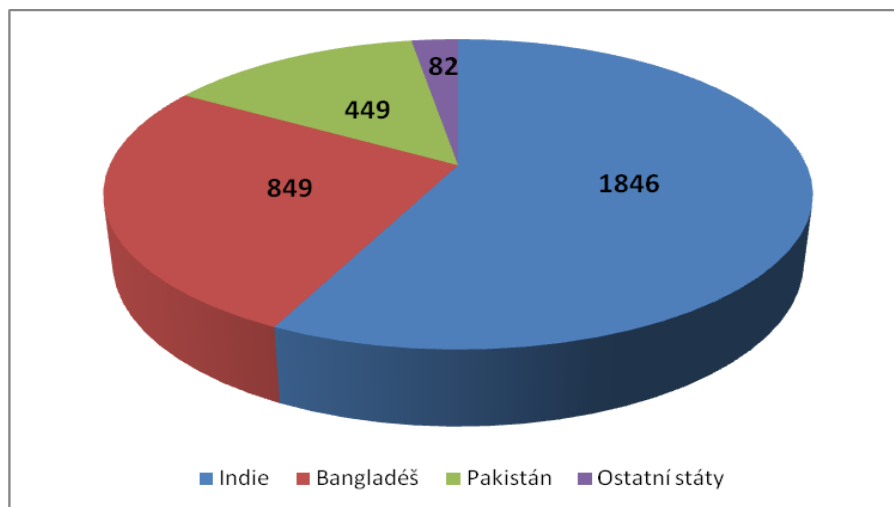
Obr. 8 Lněná tkanina [17]

3.3 Juta

3.3.1 Historie a současnost pěstování juty

Jutovník (*Corchorus*) je jednoletá rostlina z čeledi slézovitých, ve starších taxonomických rozděleních z čeledi lípovitých. Zmínky o jutě se nachází již v indickém eposu Mahábhárata a ve Starém zákoně. Bylo zaznamenáno, že v 16. století v Indii chudí občané nosili jednoduché oděvy z jutových tkanin. V roce 1830 byla zaznamenána první strojová výroba jutové příze ve skotském Dundee. Až do konce 19. století ovládali výrobu a trh s jutou Britové. V roce 1855 byla otevřena první tkalcovna jutového zboží v Indii (Kalkata a okolí), kam se postupně přesunul trh s jutovými vlákny. V roce 2008 pocházelo z Indie kolem 60 % světového množství jutových vláken a textilií z nich připravených. Teplomilná, ve vlhkých podmínkách rostoucí rostlina je rozšířena především v tropickém pásu Jižní a Jihovýchodní Asie, nejvíce v Indii, Bangladéši, Číně, Thajsku, Vietnamu, Indonésii, v Africe i Austrálii, přičemž největší producenti této rostliny jsou Indie,

Bangladéš a Čína. Pěstování juty v Evropě a v USA je spíše výjimečné, na počátku 21. století se zde zpracovávalo pouze asi 1,5 % jutových vláken z celkové produkce. [18]



Obr. 9 Celosvětová produkce juty v r. 2008 [tis. t] [18]

3.3.2 Charakteristika juty

Obecně jsou známy dva druhy juty, které jsou na světě pěstovány. Jedná se o:

- Corchorus olitorius* – je znám pod obchodním značením Tossa, tvoří 80 % celkové sklizně této plodiny. Rostlina roste do výšky až 2,5 metru, listy mají charakteristický elipsovitý tvar, plody vyrůstají z podlouhlých tobolek. Tento druh jutovníku je původem z Afriky, do Asie se dostal v průběhu 19. století.
- Corchorus capularis* – je označována jako „bílá juta“. Její podíl je asi 10 % z celkové sklizně. Dorůstá až do 4 metrů, plody vyrůstají z kulatých tobolek. Počátky jejího pěstování jsou zaznamenány na hranicích Indie a Barmy.

Mezi další známé druhy patří např. Mesta, Bimli a další. Za nepravou jutu se považují např. vlákna mračňáku Theophrastova (*Abutilon theophrasti*), označována jako čínská juta, dále pak jávská juta, gambo či vlákna kendu z bombajského konopí (*Hibiscus cannabinus*, synonyma *Hibiscus sabdariffa*, ibišek kenaf, bombajské konopí, prosvírník konopný).

Jutovníky představují byliny s vláknitým, často nerozvětveným stonkem, vysokým 2 až 4 m, dozrávají 120 až 150 dní po vysetí. Hektarový výnos této plodiny se pohybuje okolo 1,5 až 2 tun. Jasně zelené listy jsou jednoduché, kopinaté, řapíkaté, 5 až 15 cm dlouhé, s jemným zoubkovaným nebo lalokovitým okrajem. Malé žluté květy jsou přisedlé nebo na stopkách uspořádané do vrcholových květenství. Plodem je válcovitý nebo kulovitý míšek s mnoha malými, černými semeny.

Ze stonku jutovníku vyrobené vlákno je nejlevnější technické přírodní vlákno pro textilní průmysl, dostupné v dostatečném množství, recyklovatelné a biologicky rozložitelné. Před samotným zpracováním v přádelně se odřezává dolní část stonku, tzv. „cutting“ 20 až 40 cm, který je prodáván za nižší cenu. Stonky se po sklizni 18–30 dní máčí a poté se oddělují jednotlivá vlákna od dřeviny. Následuje sušení vláken po dobu 2 až 3 dnů. Existuje 6–8 jakostních tříd těchto získaných jutových vláken, rozdělují se např. dle pevnosti vláken či obsahu dřeviny aj. Technické vlákno, odolné vůči mikroorganismům a opotřebení, je 1500 až 4000 mm dlouhé, elementární části mají délku 1–5 mm, průměr asi 18 μm . Navlhavost vláken se pohybuje kolem 34 %. Jejich hlavní nevýhodou je však prašnost při manipulaci s nimi a nepříjemný zápach. [18]

3.3.3 Využití produktů juty

Jutovník je nejčastěji využíván v textilním a potravinářském průmyslu. Juta je označována jako přadná rostlina, která má ve stonku svazky textilně využitelných vláken již za 120 dnů od vyklíčení. Po zpracování (namáčení, tření, spřádání) se z nich získává hrubé textilní vlákno, které není nijak obzvlášť pevné, ale je levné. Vlákno se používá pro výrobu pytloviny (Saking, Hesián), provazů, lan a pro základovou osnovu při tkaní koberců (CBS Carpet Backing Cloth). Jutová vlákna se také spřádají společně s jinou přízí pro výrobu dekoračních textilií nebo nábytkářských tkanin. Pro svou hrubost se jutové tkaniny jen výjimečně používají na ošacení. Nebarvené vlákno je šedé až nažloutlé. Lněné tkaniny se zušlechťují napařováním a kalandrováním, zcela výjimečně se bělí či barví. Jutovník lze také využívat k výrobě balicích papírů. Dle objemu celosvětové produkce rostlinných vláken jsou jutová vlákna na druhém místě za vlákny bavlněnými. [18]



Obr. 10 Sklizeň jutovníku [18]



Obr. 11 *Corchorus capsularis* [18]

3.4 Další přírodní suroviny

3.4.1 Dřevo

Obecně rozšířeným a v mnoha směrech znovu objeveným surovinovým zdrojem je dřevní hmota. Jeden z mála stavebních materiálů, který lze aplikovat do všech dílů stavební konstrukce (nosná část, izolační materiál, výplňový materiál, vnitřní vybavení,...). V České republice na jednoho obyvatele připadá $0,23 \text{ m}^3$ dřeva, což odpovídá $\frac{1}{3}$ využití dřeva v sousedních zemích. Tím se řadíme na jedno z posledních umístění v Evropské unii. Místo dřeva jsou stále preferovány ekologicky méně vhodné materiály, jejich výroba významně zatěžuje životní prostředí. Jedná se zejména o polymerní látky, kovové materiály, beton apod.

V zemích produkujících dřevo je tendence využívat vzrostlé dřevo beze zbytku. Vyvíjejí se postupy úplného zhodnocení jednotlivých částí dřevin. Hlavním směrem uplatnění, dosud málo používaných zbytků, je výroba přířezů na upínací desky a tvarovky, chemický rozklad, spalování nebo výroba dřevěného uhlí.

Nejčastější zpracování dřeva je pro výrobu: celulózy, dřevovláknitých desek, dřevité moučky, dřevěného a aktivního uhlí, dřevěných výrobků v uměleckém a hračkářském průmyslu, betonu, kuřácké potřeby, podpalovače, hnojiv, meliorace, energií, stelivo pro dobytek.

Dobrým tepelně izolačním produktem dřevní hmoty s dobrými mechanickými vlastnostmi jsou výše zmíněné dřevovláknité desky, vyznačující se nízkým difúzním odporem, nízkým součinitelem tepelné vodivosti. Mezi známé výrobce dřevovláknitých desek patří např. firmy Hofatex či Steico. Tyto desky lze aplikovat: pro dodatečné zateplení budov, jako obvodové pláště dřevostaveb, pro zateplení podkroví či jako izolace (tepelné i akustické) do podlah. [1]

Pokud porovnáme délku růstu dřevin s délkou růstu výše uvedených alternativních přírodních zdrojů (technické konopí, len, juta a další), jsou jmenované materiály jednoznačně výhodnější z ekologického hlediska. Je také vědecky zjištěno, že 1 ha osetý konopím poskytuje 2,5 až 4 krát více celulózy s nižším obsahem ligninu než 1 ha lesa.

3.4.2 Rákos

Rákos (*Phragmites*) roste ve střední Evropě na mírných svazích u stojatých vod a pomalu tekoucích řek. Tato vytrvalá bylina z čeledi lipnicovitých roste do výšky 2 až 4 m, průměry stébla se pohybují od 3 do 9 mm. Rákos patří k tradičním nejstarším stavebním materiálům s průměrnými izolačními vlastnostmi. Oproti slámě je výrazně tvrdší, nepodléhá biologickému rozkladu a díky vysokému obsahu H_2SiO_3 je u něho značně sníženo riziko samovznícení. Při stlačení jednotlivých vrstev této rostliny dochází ke zvýšení požární odolnosti. Pro stavební účely se používá pouze rákosí jednoleté, které se zpracovává do desek, rolí a rohoží.

Jeho hlavním využitím v současném stavitelství je výroba došků, dále jsou pak využívány jako nosiče omítek či tepelně izolační desky. Základním úkolem každé krytiny je zajištění vodotěsnosti. Bylo ověřeno, že při tloušťce 250 až 350 mm může rákosová krytina dlouhodobě úspěšně odolávat působení atmosférických vlivů. Poměrně značným problémem této krytiny je zajištění její neprůvzdušnosti. Při větších náporech větru může v podstřeší proud studeného vzduchu penetrovat až k vnitřnímu povrchu. [1]

Obecně se rákos vyskytuje kromě Antarktidy na všech kontinentech, zejména v oblastech vodních toků a mokřad. V Evropě jsou velkými producenty rákosu Maďarsko, Slovensko, Itálie. Rákos se stále úspěšně používá v řadě zemí. Známé jsou realizace v Nizozemí a v severních oblastech Německa, což jsou území, která jsou vystavena značné srážkové činnosti a působení větru.

3.4.3 Sláma

Osevní plochy obilovin v rámci EU-27 činily v období 2011/2012 55,5 mil. ha, což je nepatrný pokles v porovnání s léty 2009/2010 (58 mil. ha) a 2010/2011 (56,5 mil. ha). V České republice se z dlouhodobého pohledu osevní plocha pěstovaných obilovin výrazně neliší, stále osciluje kolem výměry 1 550 tis. ha. Podle soupisu osevních ploch ČSÚ k 31. 5. 2011 činila celková osevní plocha obilovin u nás 1 468,1 tis. ha, oproti předchozí sezóně došlo k nárůstu o 8,6 tis. ha. Tyto plodiny vyprodukují okolo 6 milionů tun slámy, která je ze 70 % využita v zemědělství, zbývajících 30 % představuje přebytek. Proto je sláma vhodnou alternativou pro další její využití například ve stavebnictví. [20]

Sláma, kterou tvoří stonky vymláceného obilí, se v českých zemích používala již od nepaměti. Využití našla jako stelivo, izolace utěšňující spáry mezi trámy, případně balíky slámy byly umístěny v místnostech pro tepelnou ochranu. Sláma byla využívána též při výrobě vepřovic či byla přidávána do omítek. Použití slámy ve stavebním průmyslu je vhodné především z hlediska ochrany životního prostředí. Pro izolaci domu slámou hovoří zejména malá energetická náročnost ve všech fázích stavebního procesu, dále pak snadná recyklace po ukončení životnosti stavební konstrukce. Negativním podnětem pro stavění ze slaměných panelů nebo slámy balené do balíků může být především vysoká hořlavost, špatná odolnost vůči škůdcům a vůči vlhkosti. Je ji však možné hydrofobizovat, aby téměř vodu nepřijímala a byla taktéž odolná vůči škůdcům.

Ve stavebnictví je sláma používána ve formě lisovaných panelů či slaměných balíků. U ekopanelů je základním materiálem kvalitní pšeničná sláma slisovaná do hranolovitých balíků. Sláma tvoří jádro desky. Dalším nezbytným materiálem je recyklovaný kartonový papír, přírodní lepidlo a přísady proti hlodavcům, které se přidávají, plně v souladu s hygienickými a zdravotními limity, systémem přesného dávkování. Ekopanely se dnes nejčastěji používají místo klasických pevných příček z cihel, silikátů, sádrokartonu apod. Ekopanely nepotřebují nosnou konstrukci, jsou samonosné, kotví se jen do podlahy a stropu. Nevyžadují ani tepelnou a zvukovou izolaci. Jsou také velmi zajímavou alternativou klasického vnitřního obložení výrobních hal, skladů a dalších objektů. Je zde možnost využití na opláštění obvodové nenosné stěny s dřevěnou (ocelovou) nosnou kotrrou. Tato varianta se využívá na stavbu rodinných domů a jiných objektů. [1, 19]

3.4.4 Ovčí vlna

Na světě žije v současnosti 1,2 miliard ovcí, převážná část se však chová pro maso a mléko. Na chovu se podílí nejvíce Čína (171 mil.), Austrálie (103 mil.), státy EU (99 mil.) a země bývalého Sovětského svazu (65 mil.). Každá ovce ročně vyprodukuje v průměru mezi 2,5 až 5 kg vlny, některá plemena až 18 kg. Vlna se stříhá jednou až dvakrát ročně a ukládá se jako celistvé rouno, které se pak dále rozděluje dle různých částí do daných kvalitativních tříd. Ovčí vlna představuje snadno obnovitelný, snadno recyklovatelný, ekologický surovinový zdroj, který je tvořen v průměru z 60 % živočišných bílkovinných vláken, dále pak z 15 % vlhkosti, 10 % tuku, 10 % ovčího potu a 5 % nečistot. Čisté vlákno se skládá z keratinu, pigmentu a chemicky vázané vlhkosti. Chemické složení vláken sestává z 50 % uhlíku, 40 % kyslíku a 10 % dusíku. Vlákna mají šupinovitý povrch, jejich zvláštní struktura dodává vláknům výbornou pružnost a ohebnost. Prakticky celá produkce vláken z ovčí vlny se zpracovává dvěma základními technologiemi: výroba česané (včetně poločesané) a výroba mykané příze. [20]

Mezi výhody ovčí vlny řadíme následující charakteristiky:

- čistý, snadno obnovitelný přírodní surovinový zdroj,
- snadná a příjemná manipulace bez možností ohrožení zdraví lidí (podráždění pokožky, sliznic apod.),
- bezproblémová recyklovatelnost, nezatěžuje životní prostředí,
- samozhášecí schopnost, vlákna nepodporují hoření, za vysokých teplot dojde k seškvaření,
- relaxace materiálu, nedochází k objemovým změnám či ztrátě elasticity,
- vysoká hygroskopie, až 35 %.

Největší uplatnění nachází v textilním průmyslu, avšak vzhledem k jejímu přebytku je používána i jako stavební izolační materiál, využívaný zejména k zateplování stavebních konstrukcí. Její uplatnění ve stavebních konstrukcích je široké, setkáme se s ní u izolací příček, podhledů, akustických stropů a stěn. Pokládá se prakticky bez ztráty prořezem, protože případná nepřesně odříznutá hrana se dá jednoduše stlačit na potřebný rozměr. [1]

3.4.5 Bavlna

Bavlník je jednou z nejdůležitějších plodin pěstovaných pro výrobu textilního vlákna. Pochází zejména z plantáží ve střední Asii a východní Africe. V tropických oblastech byly vyráběny lehké bavlněné textilie po tisíciletí. Některé zdroje uvádějí, že Egypťané před 12 tis. lety používali bavlněné tkaniny, dále byly datovány také dochované bavlněné tkaniny

z 5 tis. př. n. l. z Mexika. První písemná zmínka o tomto keři produkujícím bavlněná vlákna pochází z Indie z 1 500 př. n. l. V Evropě byla bavlna neznámá až do pozdního středověku. V období průmyslové revoluce se však bavlna stala velmi důležitou surovinou pro textilní průmysl. V dnešní době si bavlna, jako jedno z nejvýznamnějších přírodních vláken, stále uchovává své postavení, avšak vzhledem k ceně je často nahrazována vlákny syntetickými. [21]

V současné době se pěstují dva druhy bavlníku: bavlník bylinný a bavlník stromový. Tyto keře mají žluté květy vyvíjející se v toboleky, které v době zrání pukají. Uvnitř těchto tobolek jsou ukryta drobná hnědá semena s osemením krytým 20 až 60 mm dlouhými bílými chlupy bavlněných vláken. Vzhledem k náchylnosti vláken k napadení plísněmi, či škůdci, je bavlna pěstována za podpory herbicidů, insekticidů, pesticidů a desikantů, což není optimální z pohledu ochrany životního prostředí. Pokud však dojde ke zlepšení podmínek při pěstování bavlny, může bavlna představovat zajímavou alternativní surovinu pro výrobu stavebních izolací. Další zátěží je i doprava na velké vzdálenosti. [1]

Obecně mají však bavlněná vlákna dobré izolační vlastnosti, působí stejně jako ovčí vlna jako dobrý regulátor vlhkosti. Ve stavebnictví se používá při zateplování budov, tato technologie je však využívána spíše v zahraničí. Z bavlny se vyrábějí rohože, pletence, plstěné kroužky, těsnící vaty, ale používá se i jako volně sypaná. Při tloušťkách 50 až 120 mm se využívá k izolování stěn a šikmých střech. Do příček je ukládána jako akustická izolace. Těsnící vata a bavlněné pletence představují alternativu k montážním pěním. Jejich optimální využití je k utěsnění štěrbin, spár a dutin. [1]

4. Vlákná využitelná při výrobě izolačních materiálů a jejich možné zpracování

Při výrobě izolačních materiálů je možné využít širokou škálu vláken, ať už se jedná o vlákna přírodní či umělá. Snahou velké řady odborníků je vyvíjet nové, ekologické materiály, jejichž výroba nebude zatěžovat životní prostředí a bude ekonomicky dostupná. Z tohoto důvodu jsou upřednostňována snadno dostupná vlákna, vznikající z nadbytku výroby, případně tvoří průmyslový odpad, který však lze využít dále v jiném průmyslovém odvětví, např. při výrobě izolačních materiálů využitelných nejenom ve stavebním průmyslu.

Podle způsobu vzniku vláken a jejich výroby jsou rozeznávány základní 2 typy:

- vlákna přírodní;
 - rostlinná,
 - živočišná,
 - anorganická,
- umělá;
 - z přírodních polymerů,
 - ze syntetických polymerů,
 - nepolymerní.

Pro určení vhodnosti použití daných vláken pro výrobu izolačních materiálů jsou stěžejní následující vlastnosti: tloušťka vláken, délka vláken a jejich chování za zvýšené teploty (teplota tání/teplota vznícení a způsob hoření). Základní charakteristiky přírodních vláken (délka, tloušťka,...) jsou dány podmínkami růstu vláken, člověk může tyto parametry ovlivnit pouze nepřímo. Naopak u vláken umělých je možné provádět úpravy jejich charakteristik při výrobním procesu. [22]

4.1 Rostlinná vlákna

Rostlinná vlákna jsou získávána z jednotlivých rostlinných částí. Největší procentuální zastoupení, týkající se chemické skladby vlákna, má ve většině případů celulóza. Dle původu vláken dělíme rostlinná vlákna do následujících kategorií:

- vlákna ze semen, např. bavlna, kapok (vlákna jednobuněčná),
- vlákna ze stonků neboli vlákna lýková, např. len, konopí, juta, kenaf (technická vícebuněčná vlákna),

- vlákna z listů, např. sisal, manilské konopí, novozélandský len (technická vícebuněčná vlákna),
- vlákna z plodů, např. kokosová vlákna (technická vícebuněčná vlákna).

Z pohledu uplatnění vláken pro vývoj izolačních materiálů ve stavebnictví na území České republiky jsou velkým potenciálem vlákna lýková.

Lýková vlákna sestávají ze svazků vláken, kde každý svazek obsahuje 10–40 jednotlivých buněk nebo elementárních vláken spojených pektinem. Jeden stonek obsahuje 20–50 svazků vláken. Elementární vlákna se dále skládají z několika vrstev. Uvnitř buňky se nachází, pro lýková vlákna typický, lumen, který prostupuje celou délkou vlákna. Délka takového vlákna je závislá na výšce rostliny.

Fyzikální, tepelně technické a mechanické vlastnosti vláken jsou ve velké míře závislé na kvalitě vláken, kterou ovlivňuje mnoho faktorů, např. střídání atmosférických podmínek při růstu rostlin, rosení, podmínek při zpracování vláken a uskladnění vláken, atd. Nejdůležitějším faktorem při zpracování přírodních vláken je obsah vlhkosti, dále pak odolnost vůči mikroorganismům a ohni. Pro definování kvality lýkových vláken pro tepelně izolační materiály existují základní ukazatele kvality, které stanovují např. čistotu vláken nebo mikrobiologickou kvalitu. Fyzikální a mechanické vlastnosti přírodních vláken jsou závislé zejména na chemickém složení vláken (podíl celulózy, hemicelulózy, ligninu, pektinu, vosku, obsahu vody a dalších doprovodných složek), které je spojeno s klimatickými podmínkami při růstu rostliny, a dále také na technologii získávání a zpracování vlákna.

Tab. 4 Chemické složení vybraných přírodních vláken [8]

<i>Složení vlákna</i>	<i>Juta</i>	<i>Len</i>	<i>Konopí</i>	<i>Kenaf</i>	<i>Sisal</i>	<i>Bavlna</i>
Celulóza	61–71	71–75	70,2–74,4	53–57	67–78	82,7
Hemicelulóza	13,6–20,4	18,6–20,6	17,9–22,4	15–19	10–14,2	5,7
Lignin	12–13	2,2	3,7–5,7	5,9–9,3	8–11	-
Pektin	0,2	2,2	0,9	-	10	-
Další složky	-	3,8	6,1	7,9	1	-
Vosky	0,5	1,7	0,8	-	2,0	0,6
Voda	12,6	10,0	10,8	-	11,0	-

Pórovitost, objemová hmotnost, vlhkost, teplota materiálu nebo směr tepelného toku jsou nejdůležitější parametry, které mají vliv na tepelně technické vlastnosti. Lýková vlákna jsou vhodná k vytvoření tepelně izolačních materiálů, jelikož mají porézní strukturu, jež má pozitivní vliv na objemovou hmotnost, tj. na její snížení. Hodnota součinitele tepelné vodivosti také závisí na distribuci, velikosti a tvaru pórů. U těchto organických materiálů je struktura velice složitá. Obecně platí, že látky s jednoduchou strukturou vedou teplo lépe než vlákna se strukturou složitější.

Vlhkost přírodních vláken má výrazný negativní vliv na součinitel tepelné vodivosti. Vzhledem k faktu, že lýková vlákna jsou tvořena převážně z celulózy, přijímání vlhkosti u těchto vláken ovlivňují hydrofilní skupiny v makromolekule vlákna a jejich přístupnost pro molekuly vody. Celulóza obsahuje tři hydrofilní hydroxylové skupiny ve své strukturní jednotce, přesto však nesorbuje vlhkost stejně (závisí na jejich přístupnosti). Molekuly vody se mohou vázat přímo na aktivní místa (hydrofilní skupiny nebo skupiny schopné s vodou vytvářet vodíkové můstky) nebo na molekuly vody již ve vláknech obsažené.

Absorpce a desorpce vlhkosti vede ke změně nejenom tepelně technických, ale i mechanických vlastností vláken. U všech přírodních vláken dochází se zvyšujícím se obsahem vlhkosti ve vzduchu ke zvýšení pevnosti, naopak při obsahu vlhkosti menším než 20 % se stávají přírodní vlákna křehká a lámavá, dochází k jejich vysušení. Relativní vlhkost okolí vyšší jak 60 % urychluje možné chemické a biologické napadení materiálu. Obecně voda v polymerech funguje jako plastifikátor snižující teplotu skelného přechodu a zvyšující tažnost. Důsledkem absorpce a desorpce nastává změna rozměrů vláken – bobtnání nebo smršťování. Vlivem tvorby vodíkových můstků v amorfních oblastech vlákna dochází k výraznému příčnému bobtnání. Podélné bobtnání je výrazně nižší. Lýková vlákna díky vyššímu obsahu ligninu bobtnají méně.

Lýková vlákna mají také dobré akustické vlastnosti a mohou se tak stát plnohodnotnou alternativou ke klasickým materiálům. Co se týče oblasti vzduchové neprůzvučnosti, musí mít materiál příznivou hodnotu činitele zvukové pohltivosti α . Vzhledem k tomu, že lýková vlákna mají porézní a vláknitou strukturu, vykazují tak příznivé hodnoty tohoto činitele zvukové pohltivosti. Díky velice dobrým mechanickým vlastnostem a pružnosti lýkových vláken se mohou z nich materiály složené využít k tlumení dynamických kmitů v oblasti kročejové neprůzvučnosti vodorovných konstrukcí. [8]

Přírodní vlákna mají však také vlastnosti negativní, mezi které řadíme:

- vysokou hořlavost;

Přírodní vlákna při teplotách nad 100 °C prodělávají nevratné změny, které mají podstatný vliv na jejich vlastnosti. Při působení suchého vzduchu o teplotě 110 °C dochází k depolymeraci vláken (jejich žloutnutí až hnědnutí), při 150 °C se tvoří pyrocelulóza a při 240 °C vlákna zplyňují a uhelnatí. Důsledkem je pokles pevnosti i všech ostatních jakostních parametrů. [8]

- nízkou odolnost vůči mikrobiologickým činitelům;

Pokud nastanou optimální podmínky pro rozmnožování plísní a bakterií (zvýšená vlhkost, přítomnost kyslíku a příhodné hodnoty pH), získávají tyto organismy své živiny enzymatickým štěpením ze substrátu. Při látkové výměně plísně produkují kyseliny šťavelovou, mléčnou, vinnou, které zabarvují substrát a mohou být zdrojem dalších poškození. V mnoha případech lze přítomnost plísní odhalit ultrafialovým světlem, které vyvolává u napadených míst intenzivně žlutou fluorescenci. Všechna převážně celulózová vlákna jsou štěpena enzymem celulózy, který je schopen hydrolyzovat celulózu až na jednoduché cukry. Biologický rozklad vláken začíná v jejich amorfni oblasti a rozšiřuje se do krystalické oblasti. Vyšší obsah ligninu ve vláknech mikrobiologické poškození zpomaluje.

- vyšší vlhkostní citlivost. [8]

V další části jsou uvedena vybraná přírodní vlákna a jejich základní charakteristiky, více bylo pojednáno již v kapitole 3 výše.

4.1.1. Konopná vlákna

Hrubší, tmavší a pevnější v porovnání s lněnými vlákny jsou vlákna konopná, získávaná ze stonků rostliny. Průměrná délka vláken je 20 mm a tloušťka 22 µm.

Chemické složení vláken je následující: 70,2–74,4 % tvoří celulóza, 17,9–22,4 % hemicelulózy, 3,5–5,7 % lignin, 0,9 % pektiny, 0,8 % vosky, 10,8 % voda a další složky 6,1 %.

Konopná tkanina hoří snadno a rychle jasným plamenem, přičemž se uvolňuje zápach jako při pálení listí či dřeva. Hoření je dokonalé bez nedohořelých natavených zbytků, popel má šedou barvu. Konopné vlákno má ze všech přírodních vláken nejvyšší odolnost vůči vlivům povětrnosti. [8]

4.1.2. Lněná vlákna

Svazky lněných vláken v kůře rostliny jsou tvořeny 15–30 elementárními vlákny, spojenými pektinem do těles délky 20–140 cm a tloušťky 200–300 μm . Jednotlivá vlákna mají délku obvykle 17–40 mm a tloušťku 12–17 μm .

Hlavní složku vláken tvoří ze 75 % celulóza, okolo 20 % jsou v zastoupení hemicelulózy a zbytek tvoří pektiny a další složky. V porovnání s vlákny technického konopí obsahují méně ligninu, cca 2,2 %. Aby se získala z rostliny lněná vlákna, je nutné po sklizni tyty plodiny máčet nebo rosit, poté se v tírně pročešou a valchují. Těmito procesy se oddělí lněná příze (9 %), využívaná v textilním průmyslu, a koudelová příze (7 %), dále využitelná v jiných odvětvích. Odpadním produktem je pazdeří, použitelné pro výrobu deskových stavebních materiálů. Tkanina z lněného vlákna je snadno hořlavá. Pokud plamen působí delší dobu, dochází ke vznícení. Lze ji však snadno uhasit sfouknutím. [8]

4.1.3. Jutová vlákna

Jutová vlákna jsou ve světě druhá nejrozšířenější textilní vlákna po bavlněných. Vlákna se získávají z lýka, které se musí ručně loupát. Další zpracování je podobné jako u lnu. Vlákna výborně odolávají mikroorganismům. Účinkem světla, tepla a vlhka se uvolňují elementární vlákna, což znamená, že z jutových výrobků se značně práší. Technické vlákno je 1,5–4 metry dlouhé a silně zdřevnatělé, díky vysokému podílu ligninu, elementární části mají délku 1–5 mm a tloušťku 15 μm . V plameni se juta chová obdobně jako len či konopí. [8]

4.1.4. Bavlněná vlákna

Bavlněná vlákna jsou 20–60 mm dlouhá, bílá vlákna pokrývající osemení bavlníku. O jejich kvalitě vypovídá délka vláken (neboli stapl) a stejnoměrnost staplu. Nejjakostnější bavlněná vlákna (stapl 50–60 mm) jsou spíše výjimečná a používají se pro velmi luxusní zboží. Běžně rozšířená kvalitní bavlněná vlákna mají délku vláken 28–40 mm, používají se samostatně či ve směsi s umělými vlákny pro výrobu lehkého tkaného a pleteného svrchního oblečení, spodního a ložního prádla a mnoha dalších aplikací. Nejčastěji se v praxi setkáváme s délkou vláken do 28 mm, kdy se vlákna hodí pro využití při výrobě tkanin, méně náročných na stejnoměrnost a hladkost příze, například džínsovin, prostěradla, hrubé ručníky, utěrky, apod. Bavlna nejhorší kvality (stapl 11–18 mm) se používá např. při výrobě pracovních oděvů.

Bavlněné vlákno je tvořeno téměř výlučně celulózu, až 96 %. Představuje nejčistší přírodní zdroj celulózy. Tloušťka vlákna se pohybuje v rozmezí 12–17 μm . Přírodní bavlna je samozhášivá, přičemž ke vznícení dochází při teplotách okolo 400 °C. Bavlna, která je součástí tkanin, je hořlavá a pokud je vystavena otevřenému ohni, může i vzplanout. Při hoření vydává zápach obdobný hořícímu papíru (ten je způsoben vysokým obsahem celulózy). Dým je šedý nebo bílý. Popel je jemný, snadno se rozpadající, bez spečených kuliček. [8]

4.2 Živočišná vlákna

Vlákna živočišného původu jsou na rozdíl od přírodních vláken na bázi bílkovin. Nejčastěji jsou získávána ze srsti zvířat, případně ze sekretu hmyzu, podle toho je rozdělujeme do 2 základních skupin:

- keratinová vlákna (srsti) – vlna ovčí a další srsti, např. mohér, kašmír, angora, srst lamy, velbloudí srst a dále chlupy kozí, psí, hovězí, koňské žíně, lidské vlasy atd.,
- fibroinová vlákna (výměšky hmyzu) – přírodní pravé hedvábí, plané hedvábí, pavoučí hedvábí. [8]

Z hlediska použití pro vývoj izolačních materiálů jsou vhodná spíše vlákna keratinová.

4.2.1. Vlněná vlákna

Obecně se vlna získává ze srsti zvířat. Vlněná vlákna jsou tvořena keratinem, stejně jako naše vlasy. Nejvíce využívaná a dostupná v našich zeměpisných šířkách je ovčí vlna. Vlna se získává ve formě rouna stříháním živých ovcí. Získáváním ovčí vlny se nesnižuje stav žádného přírodního zdroje. Stříhá se zpravidla jednou ročně, některá plemena lze stříhat i dvakrát ročně. Rouno je tvořeno souvislou vrstvou srsti, spojenou vlasovým tukem a potem. Nej kvalitnější vlákna nalezneme na lopatkách a bocích ovcí, naopak nejhorší kvalitu vláken nalezneme za hlavou ovce. Rouno obsahuje velké množství nečistot, které je nutné odstranit opakovaným praním ve vodě o teplotě 40 °C s přídavkem 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 % vosku, 15 % parafinového oleje a 20 % vody.

Tloušťka vláken z ovčí vlny je závislá na druhu ovcí, nejčastěji se pohybuje v rozmezí 25–45 μm . Délka vláken je dána délkou růstu srsti a druhem ovce, řádově se pohybuje v rozmezí 20–80 mm. Ovčí vlna je nehořlavá. Má zápalnou teplotu 560 °C a samozhášecí schopnost. Při vyšších teplotách se škvaří, přičemž vzniká silný zápach pálicích se vlasů či

peří a produkuje tmavý kouř a mírný dým. Popel obsahuje velké kusy tmavých, křehkých, nespálených vláken.

Ovčí vlna se zpracovává česáním nebo mykáním. Většina česaných vlněných přízí se však mísí s umělými vlákny, méně často s vlnou jiných zvířat. Používají se zejména na lehké tkané či pletené svrchní oděvy. Mykaná příze se používá na výrobu hrubších svrchních oděvů a též jako kobercová příze a výplň prošíváných dek a polštářů. V poslední době, kdy dochází ke stále většímu rozšíření umělých vláken, vzniká ve světě přebytek ovčí vlny. Jedním ze způsobů zpracování těchto přebytků je využití surových vláken ve stavebnictví pro výrobu tepelně a akusticky izolačních rohoží. [8]

4.3 Vlákná chemická

Chemická vlákna jsou definována jako textilní vlákna získaná chemickou cestou. Základní dělení chemických vláken je následující:

- chemická vlákna z přírodních polymerů;
 - celulózová vlákna z regenerované celulózy (vlákna viskózosá, měďnatoamonná, nitrátová),
 - celulózová vlákna z derivátů celulózy (vlákna acetátová, semidiacetátová, diacetátová),
 - vlákna z kyseliny algové (alginátová vlákna),
 - bílkovinová vlákna z regenerovaných živočišných bílkovin (vlákna kaseinová, keratinová, fibroinová),
 - bílkovinová vlákna z regenerovaných rostlinných bílkovin (vlákna sójová, zeinová),
- chemická vlákna ze syntetických polymerů;
 - polyamidy,
 - polyestery,
 - polyetylén,
 - polypropylen,
 - polyakrylonitril,
 - polyuretany a další,
- chemická vlákna anorganická (vlákna kovová, na bázi křemíku, uhlíková, z ostatních nízkomolekulárních látek, z monokrystalů).

Z výše uvedeného řazení je patrné, že pro izolační materiály jsou využitelná zejména polymerní vlákna, ať již získaná z přírodních polymerů či syntetických. [22]

4.3.1. Chemická vlákna z přírodních polymerů

Tato vlákna jsou uměle vytvořená, respektive vzniklá modifikací přírodních polymerů. Nejčastějším přírodním polymerem využívaným pro účely výroby chemických vláken je celulóza.

Proto se chemická přírodní polymerní vlákna dále rozdělují na vlákna z regenerované celulózy a na vlákna tvořená z derivátů celulózy. Podstatou vláken z regenerované celulózy je čistá celulóza, a proto jsou jejich vlastnosti obdobné vláknům z přírodní celulózy. Do této kategorie řadíme vlákna viskózová, měďnatoamonná a lyocelová. [22]

4.3.1.1. Viskózová vlákna

Nejrozšířenějšími chemickými vlákny z přírodních polymerů se světovou roční produkcí zhruba 3,8 milionu tun jsou viskózová vlákna, která tvoří 80 % produkce v této skupině. Jako vstupní surovina slouží štěpky ze smrkového či bukového dřeva. Štěpky se namáčí na několik hodin do lázně 17% roztoku NaOH, jehož působením na celulózu vznikne alkaliceulóza, po zrání nastává xantogenace, tzn. působení C_2S na alkaliceulózu. Výsledným produktem je xantogenát celulózy, nažloutlá kyprá hmota, ze které následným rozpuštěním ve zředěném NaOH vzniká hnědý roztok nazývaný viskóza. Poté se roztok filtruje a odvzdušňuje, aby mohlo dojít ke zvláknování. Viskóza se zvláknuje v roztoku H_2SO_4 , $ZnSO_4$ a Na_2SO_4 za současného zpětného vylučování C_2S . Vlákenná hmota prochází tryskami, jejichž velikost určuje průměr hotového vlákna. Současně se zvláknováním, ještě v plastickém stavu, se vlákno dluží, čímž se zvětšuje jeho orientace a pevnost, případně se dále chemicky upravuje či stříhá na staplovou délku.

Vlákna viskózy mají podle velikosti zvolené trysky průměr od 10 do 50 μm , pod mikroskopem se jeví jako rýhované tyčinky. Jsou dobře hořlavá, počátek destrukce nastává již při 174–190 °C. Hoří bez plamene, netaví se, přičemž vydává zápach podobný hořícímu papíru. Zanechává jemný, šedý popel.

Mezi výhody použití viskózových vláken patří zejména jejich velmi příznivá cena (2x levnější než bavlna a 4x levnější než ovčí vlna), avšak výrobní proces je ekologicky neúnosný. Na 1 tunu viskózových vláken se spotřebuje přibližně 6 m^3 dřeva a 2 tuny chemikálií. [22]

4.3.1.2. Měďnato-amonná vlákna

Jedná se o vlákna kruhového průřezu, pod mikroskopem mají vzhled tyčinek. Pro výrobu těchto vláken se používá postup rozpouštění celulózy v CUOXAMU, tj. v hydroxidu tetraamoměďnatém. Pro výrobu je zapotřebí velmi čisté celulózy (minimálně 96 %). Jako surovina se používají linters, tedy nespřadatelná vlákna, pokrývající semena bavlny po odsemenění, nebo vyvařená a vybělená, čistě bavlněná zbytky z výroby bavlněného zboží. Zvláknování se provádí dvěma způsoby:

- a) Dvoustupňová koagulace – prvním stupněm je srážení v proudící vodě. Vznikající gel se orientuje a výrazně protahuje (až 80x). Druhým stupněm je kyselá lázeň H_2SO_4 , ve které dochází ke srážení celulózy. Vznikají jemná, dobře vláknitá, avšak málo pevná vlákna.
- b) Alkalické zvláknování – principem je koagulace a zvláknování v lázni NaOH. Vznikají tak hrubší a pevnější vlákna.

V ohni jsou však vlákna nestabilní. Již při 150 °C ztrácí pevnost, při 170–205 °C nastává jejich rozklad. Dříve se hojně používal na dámské pavučinkové punčochy a spodní prádlo, dnes se z něho vyrábí pouze oděvní doplňky a jeho použití je spíše okrajové.

Naproti tomu vlákna z derivátů celulózy mají odlišné vlastnosti v porovnání s vlákny z přírodní celulózy, mezi rozdíly patří např. termoplasticita, menší navlhavost. Do této skupiny patří zejména různé druhy acetátových vláken. Setkat se můžeme také s vlákny bílkovinnými, která se dále rozlišují na vlákna regenerovaná z živočišných bílkovin (kaseinová, keratinová, fibroinová), ale také regenerovaná z bílkovin rostlinných (sojová, zeinová). [22]

4.3.1.3. Lyocelová vlákna

Obrovská ekologická zátěž při výrobě viskózy a vysoká toxicita vedly k hledání jiných, ekologicky příznivějších výrobních postupů pro získání stejně kvalitních vláken z regenerované celulózy. Výsledkem byla vlákna lyocelová. Při jejich výrobě je využit rozpouštědlový systém na bázi N-metylmorfolinu-N oxidu (NMMO). Díky silnému dipólu N–O lze celulózu fyzikálně rozpouštět ve vodném roztoku. Výhodou je, že rozpouštědlo NMMO se recykluje a téměř 100% znovu využívá. Ekologická zátěž je tedy výrazně nižší, než je tomu u viskózy.

V praxi se lyocelová vlákna využívají samostatně, ale častěji ve směsi se lnem, bavlnou, vlnou či polyesterem v textilním průmyslu. [22]

4.3.1.4. Acetátová vlákna

Jedná se o vlákna z derivátů celulózy, konkrétně z esterů. Tato vlákna se vyrábí z velmi čisté celulózy (97–99 %), acetylací, kdy se celulóza nechá nabobtnat v roztoku tvořeném ledovou kyselinou octovou CH_3COOH , kyselinou sírovou H_2SO_4 a anhydridem kyseliny octové $\text{CH}_3\text{-CO-O-OC-CH}_3$. Před samotným zvlákněním je nutné vyrobit spřádací roztok o koncentraci 20–35 %, složený z 85 % acetonu a 15 % etanolu. Zvláknění probíhá pomocí dvou metod. Dřívější metoda představuje mokré zvláknění do vody, v současné době se však využívá metoda suchého zvláknění, probíhající při teplotě 60–80 °C, při níž dochází zároveň k sušení vlákna a odpařování rozpouštědla. Stabilizace vláken probíhá v páře nebo na vzduchu.

Triacetátová vlákna se vyrábí podobně, pouze se vynechává proces zmýdelnění. Tato vlákna lze však získat také zvlákněním z taveniny.

Vysoce lesklá acetátová vlákna jsou lehčí než vlákna z přírodního hedvábí. Jejich pevnost je asi o polovinu nižší, avšak jsou několikanásobně levnější. Acetátová vlákna řadíme do skupiny vláken termoplastických. Jsou snadno zápalná, ale hoří pomalu. Pod mikroskopem mají silně rýhovaný povrch. V blízkosti plamene se taví, na konci se tvoří tvrdé černé kuličky. Při hoření vydávají typický štiplavý zápach podobný octu. [22]

4.3.2. Chemická vlákna ze syntetických polymerů

Syntetická vlákna dnes představují nejdůležitější skupinu technických vláken a jejich význam stále stoupá. Často jsou náhradou za ostatní vlákna díky nižším cenovým nákladům a zejména některým speciálním vlastnostem, např. velmi vysoká mechanická odolnost, pružnost, trvanlivost, kterých jiná vlákna nedosahují. Mají však i jisté nevýhody, zejména velmi špatné chování za vysokých teplot (hmoty teplem měknou a taví se, při hoření často uvolňují jedovaté zplodiny). Působením UV záření často syntetická vlákna degradují a v neposlední řadě také představují ekologickou zátěž při výrobě a recyklaci. U syntetických vláken lze cíleně měnit chemické složení, geometrii a strukturu. Základní jednotkou je vždy monomer, který je dále polymerizován (polykondenzace, polyadice, řetězová polymerizace), tzn. vznikají dlouhé řetězce, polymery. V současnosti nejvíce rozšířena jsou vlákna polyamidová, polyesterová a akrylová. [23]

4.3.2.1. Polyamidová vlákna

Patří mezi druhá, nejčastěji využívaná syntetická vlákna. Chemickou podstatou se polyamidová vlákna blíží vlně, avšak hlavním surovinovým zdrojem pro jejich výrobu je ropa. Vznikají polykondenzací ve dvou základních, nejčastěji užívaných formách, polyamid 6 a polyamid 6.6, které se liší molekulovou strukturou a některými vlastnostmi. Polyamid 6 (PAD 6) je znám pod obchodními názvy Perlon (Německo), Kapron (Rusko) či Nylon 6 (USA). Pod názvem Silon se vyráběl až do začátku 90. let minulého století také v bývalém Československu. Hlavním surovinovým zdrojem pro jeho výrobu je fenol, který se dále upravuje na kaprolaktam. Směs kaprolaktamu s vodou se zahřívá v inertní atmosféře a při 270 °C se v anaerobním prostředí taví. Tavenina se tvaruje v protlačovacích tryskách a je odtahována chladicí šachtou, následně se dluží za tepla či za studena.

Polyamid 6.6 (PAD 6.6), dodávaný pod názvy Nylon (USA) či Anid (Rusko), je vyráběn mísením metanolových roztoků kyseliny adipové a hexametylendiaminu za varu. Vzniká bílá nylonová sůl. K polykondenzaci dochází v roztoku 60% nylonové soli ve vodě, ohřevem v autoklávu na 260–280 °C, po dobu 4–16 hodin. Při 270 °C dochází k tavení a poté opět k průchodu protlačovacími tryskami. Oproti PAD 6 krystalizuje výrazně rychleji, proto je třeba jej v chladicí šachtě ofukovat vodní párou. Posledním krokem je opět dloužení.

Z technického hlediska je výhodnější vlákno PAD 6.6. Vyniká vyšší pevností, menší nasákavostí a také vyšší teplotou tání (256 °C oproti 220 °C). Společnými vlastnostmi jsou vysoká odolnost proti odření a trhání, snadná tvarovatelnost, naproti tomu ale také sklony k fotodegradaci (již zmiňované působení UV záření) a značná citlivost k vyšším teplotám (již při 90–100 °C dochází k poklesu pevnosti). V plameni snadno a rychle hoří, přičemž mají tendenci tát. Jsou samozhášivá, ale vznikající tavenina, stejně jako unikající dým, je velmi nebezpečná. Při hoření nevzniká popel, pouze tvrdé černé kuličky. Uvolňovaný zápach připomíná celer. [24]

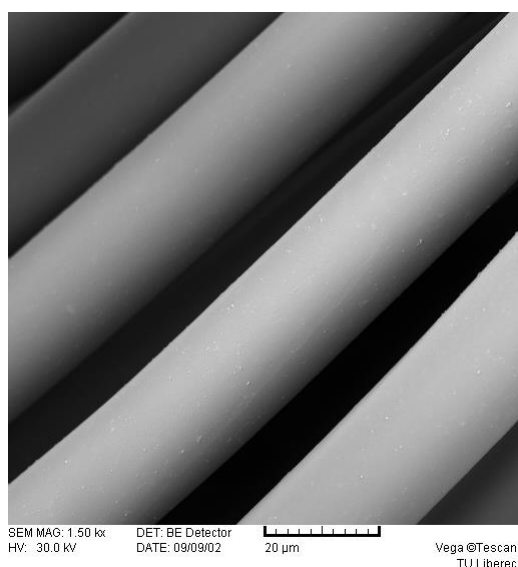
4.3.2.2. Polyesterová vlákna

Polyesterová vlákna zaujímají na trhu se syntetickými vlákny první místo, produkce okolo 47,5 %, jejich obliba stále stoupá. Hlavní vstupní surovinou pro získání polyesterových vláken je ropa. Výrobní proces vláken je obdobný jako u vláken polyamidových, tedy katalyzovaná polykondenzace při teplotě v intervalu 220–270 °C.

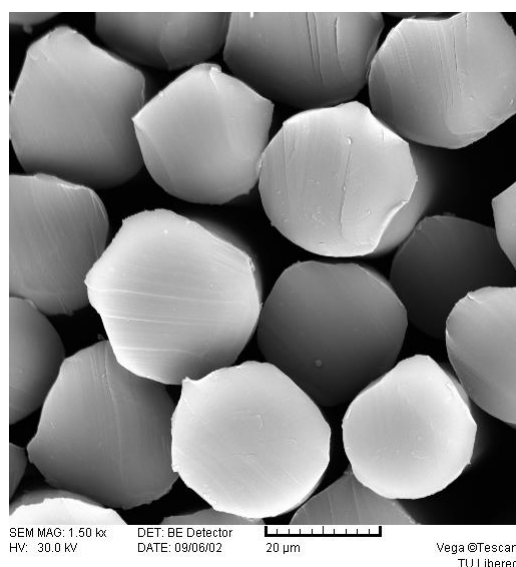
Vlákna získáváme zvlákňováním z taveniny přes protlačovací trysky a následným dloužením a fixací.

Polyesterová vlákna mají velmi dobré mechanické vlastnosti a odolnost proti oděru, odolávají vyšším teplotám (teplota měknutí až 230 °C, teplota tání 258 °C), jsou stálé na světle a vůči povětrnosti a lze je velmi snadno modifikovat chemickými přísadami, které ovlivňují jejich koncové vlastnosti. V ohni rychle hoří, dochází ke smršťení a tvoří tvrdé černé kuličky. Při hoření uvolňují lehce nasládlý, chemický zápach, nezanechávají žádný popel, ale jeho černý dým a zplodiny jsou velmi nebezpečné.

Polyesterová vlákna jsou velmi trvanlivá, mají velmi široké průmyslové využití. [25]



Obr. 12 Polyesterová vlákna (podélný směr)
[25]



Obr. 13 Polyesterová vlákna (příčný směr)
[25]

4.3.2.3. Akrylová vlákna

Akrylová vlákna zaujímají třetí místo v oblasti produkce syntetických vláken, jejich základní složkou jsou akrylonitrilové jednotky (PAN). Výchozí surovinou pro výrobu akrylových vláken je jedovatá kapalina akrylonitril $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$, která se dále zpracovává polymerací. Ke zvlákňování nedochází z taveniny, protože se rozkládá. Zvlákňování může probíhat několika způsoby, buď probíhá za sucha z roztoku v dimethylformamidu (DMF) při 80–150 °C, anebo za mokra v koagulační lázni s vodou a dimethylformamidu, či kombinací uvedených způsobů (metoda dry-jet-wet).

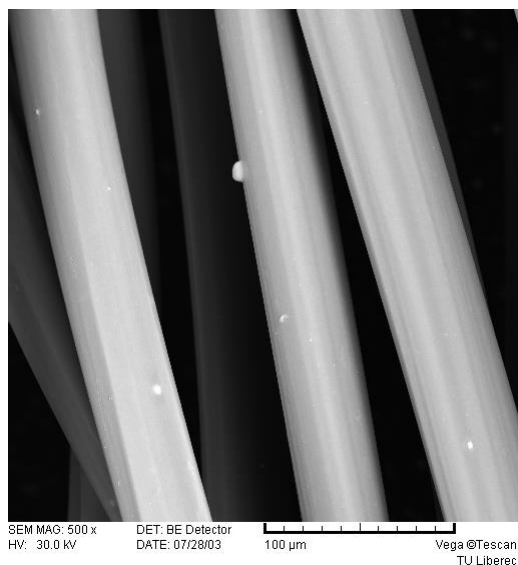
Akrylová vlákna mají oproti ostatním syntetickým vláknům menší odolnost proti oděru a mají sklon ke žmolkování, vynikají však dobrými tepelně izolačními vlastnostmi,

dostatečnou odolností proti UV záření a také nižší cenou. Při teplotě 235 °C začínají měknout, postupně dochází ke srážení. Jsou vysoce hořlavá, v žáru mají tendenci odkapávat. Tavenina je, stejně jako dým a zplodiny, vysoce nebezpečná. Při hoření vydávají silný, štiplavý zápach, podobný rybímu pachu. [23]

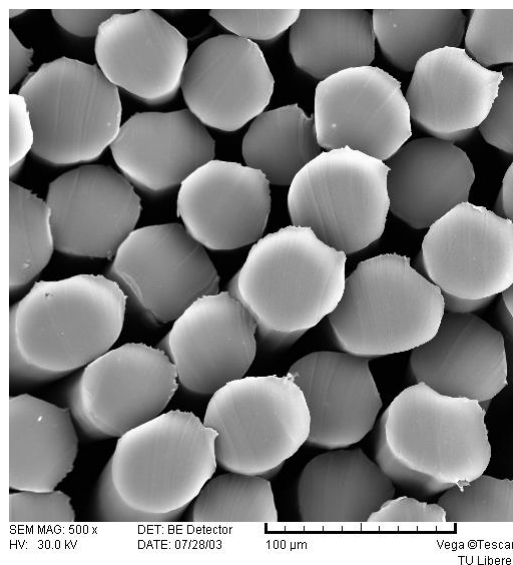
4.3.2.4. Polypropylenová vlákna

Výroba polypropylenových vláken průmyslově začala již v roce 1960 v Itálii. Samotná výroba těchto vláken probíhá polymerací propylenu s využitím Ziegler-Nattových katalyzátorů (halogenidy titanité). Polypropylenová vlákna se získávají z taveniny, dále jsou podrobeny chlazení v dlouhé šachtě a dloužení.

Vlákna jsou specifická jejich vysokým koeficientem tření, vysokou pevností a tažností, lehkostí, trvanlivostí a snadnou tvarovatelností. Teplota měknutí se pohybuje v rozmezí 149–154 °C, teplota tání v intervale 165–170 °C. Oproti ostatním syntetickým vláknům jsou specifická nízkým součinitelem tepelné vodivosti 0,1 až 0,3 W.m⁻¹.K⁻¹. Mezi nevýhody patří zejména malá odolnost vůči UV záření. [26]



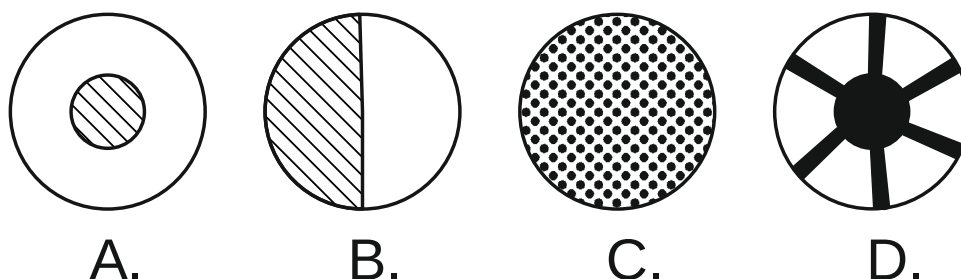
Obr. 14 Polypropylenová vlákna (podélný směr) [26]



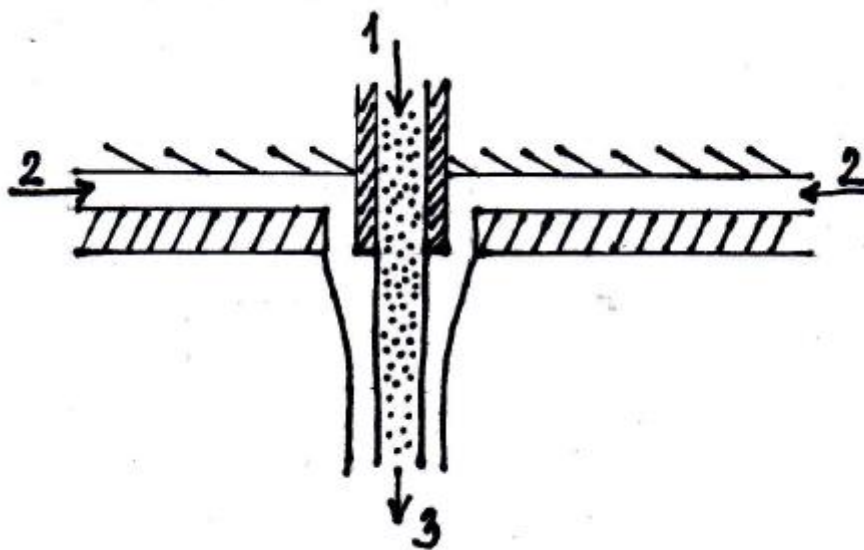
Obr. 15 Polypropylenová vlákna (příčný směr) [26]

4.3.2.5. Bikomponentní vlákna

Tato vlákna bývají také označována jako vícekomponentní vlákna či zkráceně BiCo vlákna. Vyrábí se zvlákňováním nejčastěji dvou různých polymerů pomocí zvláštní zvlákňovací hubice, viz následující obr. 16. [27]



Obr. 16 Charakteristické tvary příčných řezů bikomponentních vláken [27]



Obr. 17 Průřez zvláknovací hubice pro výrobu bikomponentních vláken typu jádro – plášť, 1,2- přívody jednotlivých polymerů, 3- vznikající bikomponentní vlákno [27]

Vlákna jádro-plášť (obr. 16- A) a bok po boku (obr. 16- B) se využívají při výrobě pojených textilií jako pojiva. Sestávají obvykle z výše a níže tající polymerní složky. Nejčastěji je ve funkci výše tající složky polyester a níže tající složky kopolyester nebo polypropylen. Bikomponentní vlákna se aplikují do směsi se základními vlákny nebo samotná. V průběhu pojení se vlákno díky výše tající složce nezbortí a výrobky mají vyšší objemnost. Adhezní spoje se vytvářejí v místech křížení vláken. Nazýváme je bodové. Větší část vláken tvoří pak poměrně pohyblivé úseky mezi spoji. To vede k výrobkům s dobrou ohebností a nízkým počátečním modulem v tahu. Malý rozměr pojících míst však zvyšuje nároky na vzájemnou adhezi zúčastněných polymerů, což je obecně problém.

Vlákna typu ostrovy v moři (obr. 16- C) se využívají k tvorbě velmi jemných vláknenných struktur extrakcí matrice. Vlákna s průřezem podle (obr. 16- D) se vyrábějí pro

svou schopnost rozštěpit se na několik jemných fibril. Jejich využitím se obcházejí problémy obtížné zpracovatelnosti velmi jemných vláken a po rozštěpení se dosahuje jemného omaku výrobků. [27]

5. Technologie pojení vláken

Existuje celá řada způsobů netkaného spojování technických vláken. Některé technologie pojení vláken jsou právě vhodné i pro výrobu izolačních materiálů ve stavebním průmyslu. Existují 3 základní druhy technologií pojení vláken, mezi něž patří pojení:

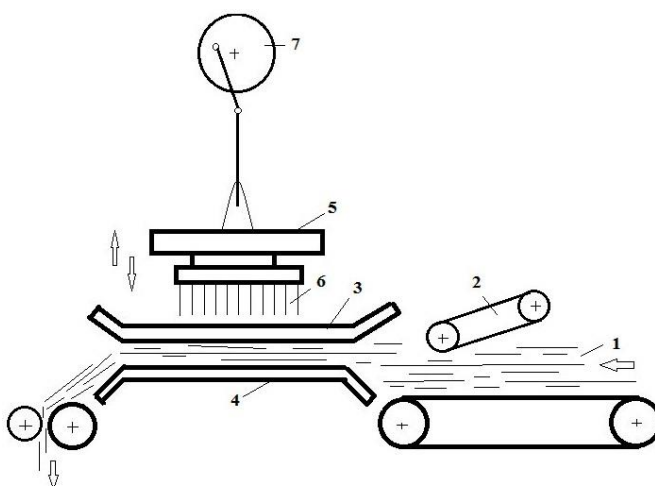
- mechanické,
- chemické,
- termické. [27]

5.1 Mechanické pojení

Principem mechanického pojení vláken je působení mechanické energie na rouno (jedná se o technologie založené na principu přeorientace vláken). Nejrozšířenější technologií je vpichování (needlepuching), které se hodí i pro účely výroby izolačních materiálů a proto o něm bude pojednáno podrobněji. Okrajově budou zmíněny také další mechanické technologie zpevňování paprsky vody (spun-lanced) a proplétání (stitchbond). [27]

5.1.1 Vpichování

Vpichování patří k nejstarším a dosud nejrozšířenějším způsobům zpevňování vlákenných vrstev. Podstatou vpichování je provazování vlákenné vrstvy svazky vláken, vzniklými přeorientací části vláken účinkem průniku jehel s ostny. V průběhu vpichování dochází také k podstatné redukci tloušťky vlákenné vrstvy. [27, 28]



Obr. 18 Základní schéma vpichovacího stroje: 1- vlákenná vrstva, 2- vstupní ústrojí, 3- stěrací rošt, 4- opěrný rošt, 5- jehelná deska, 6- vpichovací jehla, 7- pohon jehelné desky

[27]

Vláknenná vrstva je přiváděna vstupním zařízením mezi dva perforované rošty. Otvory v roštích pronikají periodicky vpichovací jehly umístěné v jehelné desce. Ostny jehel zachytávají skupiny vláken vrstvy, přeorientovávají je kolmo k vrstvě a protahují vrstvou. Vrstva je posunována odtahovými válci po spodním roštu, tzv. opěrném. Při zpětném pohybu soustav jehel zabezpečí vrchní, tzv. stěrací rošt vysunutí jehel z vláknenné vrstvy.

Výkon vpichovacího stroje závisí na počtu jehel v jehelné desce a také na frekvenci jehelné soustavy. Síla, působící na jehlu při průchodu materiálem, může být značná (až 10 N), což vyvolává potřebu masivní konstrukce roštů, jehelné desky i pohybového ústrojí. K dosažení vysokých frekvencí těžké jehelné desky (běžně 800 zdvihů za minutu, špičkové stroje až 2200) je nutno redukovat amplitudu výkyvu a tedy i vzdálenost roštů, potažmo tloušťku vyráběného materiálu, většinou se jedná o tloušťky 40–60 mm. Před vlastní jehelnou soustavou tedy musí být umístěno zařízení, redukující tloušťku přiváděného materiálu, která může být až 250 mm, na rozměr menší než je vzdálenost roštů, při dodržení rovnoměrnosti. Tuto roli může zastávat přiváděcí zařízení, tvořené dvěma válci, dvojicí šikmých dopravníků či vibračním roštem, anebo předvpichovací stroje s malým počtem jehel v úzkých jehelných deskách.

Hlavním parametrem, ovlivňujícím míru zpevnění, je počet jehel na jednotku plochy, dalšími parametry jsou hloubka vpichu, typ a způsob rozmístění jehel a též vlastnosti zpracovaného vlákna. Obecně lze konstatovat, že 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. [27, 28]

5.1.2 Technologie zpevňování vláken pomocí vodního paprsku

Technologie zpevňování vláknenných vrstev paprsky vody je rozšířena od 80. let minulého století. K provázání jednotlivých vláken rouna je využito proudu vody. Technologický proces zahrnuje vlastní zpevňování, následné odvodňování a sušení. Tato technologie je používána pro výrobu širokého sortimentu textilií, využívaných například jako podklady pro povrstvování, oděvní vložky, dekorace, filtry, čisticí textilie, izolace, geotextilie a stavební textilie. Získané textilie mají vynikající mechanické vlastnosti, jsou prodyšné a mají dobré absorpční vlastnosti. Díky zdravotní nezávadnosti jsou produkty této technologie využívány také ve zdravotnictví. Využití materiálů ve stavebnictví by však

pro vysoké investiční náklady a energetickou náročnost výrobního procesu (zejména na sušení) bylo neefektivní. [27]

5.1.3 Technologie proplétání

Technologie proplétání vznikla v padesátých letech minulého století, jejímž principem je mechanické provazování vlákenné vrstvy soustavou vazných nití. Jako výplň je možné použít prakticky jakýkoliv druh vláken (přírodní, umělá i recyklovaná) a vytvořit lze libovolný plošný útvar. Proplety lze použít jako čistící textilie a mycí hadry, technické i oděvní izolační materiály, bytové textilie či obalové materiály. Širšímu využití ve stavebnictví opět brání značně technicky náročná a nákladná výroba. [27]

5.2 Chemické pojení

Principem chemického pojení je vzájemné pojení vláken pomocí chemických (většinou polymerních) lepidel. Mezi základní operace při výrobě chemicky spojených textilií patří následující kroky. Nejprve je připravena vlákenná vrstva, na kterou je nanese pojidlo, dále následuje proces zpevnění pojiva. Poté je odstraněno disperzní prostředí (disperze, zpěněné disperze) nebo rozpouštědla (roztoky). Na závěr procesu chemického pojení dochází ke ztužení pojiva (síťování). Chemické pojení se provádí zpravidla disperzemi a zpěněnými disperzemi polymerů. Pojidlo se nanáší impregnací (nasycením v nádrži s vhodnou disperzí) a následným ždímáním, průchodem mezi dvěma válci či stříkáním, jehož účinnost je menší. Pojidlo se vytvrzuje koagulací, kterou způsobuje odpaření disperzního prostředí (vody) či přidavek termosenzibilizátorů. Účinnost chemického pojení je relativně vysoká a vyrobené tkaniny dosahují zajímavých mechanických vlastností, avšak dochází k velmi vysoké spotřebě pojiva pro docílení spojitého nánosu na povrchu vláken (20–30 % hmotnostních), s tím úzce souvisí vysoké výrobní náklady a značná ekologická zátěž. Proto je využití na velkoobjemovou produkci ve stavebnictví nepravděpodobné. [27]

5.3 Termické pojení

Při teplovzdušném pojení se zpracovává nejčastěji vlákenná vrstva připravená ze směsi základních a pojivých vláken. Jsou však možné i jiné varianty, např. folie nebo mřížka z termoplastického polymeru vložená mezi dvě vrstvy ze základních vláken.

Principem teplovzdušného pojení je průchod dokonale promíchané a rovnoměrně rozvrstvené směsi vláken horkovzdušnou pojící komorou s cirkulujícím horkým

vzduchem. Ohřev vrstvy je velmi rychlý (kolem 10 s). Uvnitř či u výstupu z komory může být umístěna dvojice kalandrovacích válců, sloužící ke zvýšení pojícího efektu vlivem tlaku na taveninu pojiva. To je však zpravidla doprovázeno snížením objemnosti výrobku a také snížením rychlosti postupu vlákně vrstvy a tím i výkonu linky. Poté dochází ke zpevnění pojiva ochlazením.

Výběru vhodného pojiva je třeba věnovat značnou pozornost, na rozdíl od chemických způsobů totiž dochází k pojení pouze mezi některými vlákny a relativně malá plocha těchto spojů musí zajišťovat stabilitu celé struktury. Při vhodné volbě pojiva však lze takto spojovat takřka jakýkoliv vláknitý materiál.

Nejčastější formou pojiv jsou nízkotavitelná monokomponentní a bikomponentní vlákna. Pro účely stavebnictví je výhodnější pojení teplovzdušné pomocí bikomponentních vláken, viz kapitola 5.3.1. níže.

Kromě výše uvedených existují také způsoby pojení ultrazvukem či infračerveným zářením, ty jsou však omezeny pro speciální účely. [27]

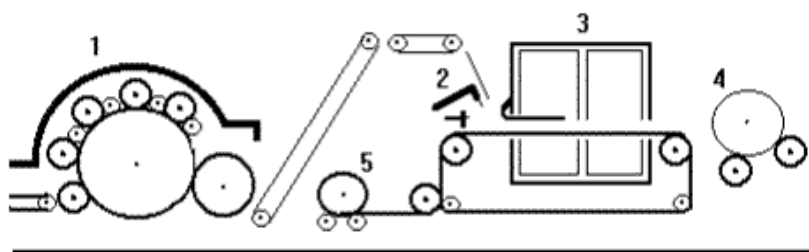
5.3.1 Teplovzdušné pojení bikomponentními vlákny

Bikomponentní vlákna se vyrábí zvlákněním nejčastěji dvou různých polymerů pomocí zvláštní zvláknovací hubice, jak již bylo uvedeno výše v kapitole 4.3.2.5. Zpravidla jsou tvořena jádrem z výše tavitelného polymeru (nejčastěji polyester) a níže tavitelným pláštěm (obvykle kopolyester či levnější polypropylen). V průběhu pojení se vlákno (na rozdíl od vláken monokomponentních) díky výše tajícímu jádru nezbotí. Bodové spoje se tvoří v místech křížení vláken. Větší část vláken tvoří poměrně pohyblivé úseky mezi spoji. Bikomponentní vlákna musí mít vhodnou teplotu tavení vzhledem k základním vláknům, taveninu s nízkou viskozitou, nízkou srážlivost za tepla a dobrou adhezi k základním vláknům. Množství přidaných pojivých vláken závisí na požadavcích na mechanické vlastnosti, pro účely výroby stavebních izolačních výrobků postačí většinou přídavek do 15 %.

Nevýhodami této technologie je nutnost správného výběru pojiva, jeho vyšší cena a potřeba dokonalého rozptýlení v hmotě výrobku, k výhodám naopak patří celková jednoduchost procesu, vysoká produktivita, možnost pojit téměř jakákoliv základní vlákna a pro stavebnictví velmi důležitá možnost produkovat výrobky vyšších tloušťek (až do 180 mm). U nás tuto technologii provozují například břevlanská firma Canabest s.r.o. nebo firma JUTA a.s., vyrábějící izolační materiály z technického konopí a lnu. [27]

5.3.2 Technologie kolmého vlákna (STRUTO)

Zajímavou alternativu k technologiím s vodorovným kladením vlákna tvoří technologie STRUTO. Touto technologií lze zpracovat všechny typy vláken, včetně recyklovaných. Prvním výrobním technologickým krokem je dokonalé promísení vláken s bikomponentními pojivými vlákny. Kolmé kladení je zajišťováno vibračním kolmým kladečem. Do něho je shora přiváděná pavučina stahována vibrující pilkou k pohybujícímu se dopravníku. Tím se vytvoří sklad pavučiny, který je z hrany pilky sejmut soustavou hladkých jehel, umístěných na spřaženě vibrující pýchovací liště. Sejmutý sklad je pýchovací lištou doražen k vlákenné vrstvě tvořící se a postupující mezi dopravníkem a drátovým roštem. Alternativou je rotační kolmý kladeč. Vlákenná pavučina je přiváděná k soustavě pracovních kotoučů, jejichž hroty je formována do vlákenné vrstvy tvořené kolmými sklady. Sklady jsou snímány z hrotů soustavou drátů roštu, umístěných mezi jednotlivými pracovními kotouči. V obou případech následuje zpevnění v teplovzdušné pojící komoře a vytvrzení ochlazováním. [29]



Obr. 19 Struto agregát [29]

Na obr. 19 je vyobrazen technologický postup, kdy směs základních a termoplastických vláken je zpracovávána mykacím strojem (1). Pavučina z mykacího stroje je formována vertikálním kladečem (2) do kolmých skladů na dopravníku horkovzdušné komory (3). Po propojení průchodem horkovzdušnou komorou prochází STRUTO[®] chladicí zónou a je navíjeno (4). V případě aplikace podkladu je podkladová vrstva (5) přiváděna od podlahy k dopravníku horkovzdušné komory. Podklad je spojován s kolmo kladenou vlákennou vrstvou STRUTO[®] během pojícího procesu. Tak vzniká kompozitní materiál v jedné operaci. [29]

6. Tepelně izolační materiály a jejich vlastnosti

Podle normy ČSN 727300 „Tepelně izolační materiály a výrobky. Názvy a definice“ platné do r. 2003 byly jako tepelně izolační materiály definovány materiály s hodnotou součinitele tepelné vodivosti $\lambda \leq 0,175 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ při 25 °C určené pro tepelnou izolaci budov, technologických zařízení, potrubí a tepelných i chladících průmyslových zařízení. Nově zavedená řada evropských norem však specifikuje konkrétní deklarované hodnoty tepelných odporů a součinitelů tepelných vodivostí při teplotě 10 °C pro jednotlivé tepelně izolační výrobky pro stavebnictví, viz tabulka 5 níže.

Tab. 5 Deklarované hodnoty tepelného odporu R a součinitele tepelné vodivosti λ při teplotě 10 °C

Název normy	R [$\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$]	λ [$\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
ČSN EN 13162 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z minerální vlny (MW) - Specifikace	$\geq 0,25$	$\leq 0,060$
ČSN EN 13163 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z pěnového polystyrenu (EPS) - Specifikace	$\geq 0,25$	$\leq 0,060$
ČSN EN 13164 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z extrudovaného polystyrenu (XPS) - Specifikace	$\geq 0,25$	$\leq 0,060$
ČSN EN 13165 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z tvrdé polyuretanové pěny (PUR) - Specifikace	$\geq 0,05$	$\leq 0,01$
ČSN EN 13166 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z fenolické pěny (PF) - Specifikace	$\geq 0,40$	$\leq 0,050$
ČSN EN 13167 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z pěnového skla (CG) - Specifikace	$\geq 0,50$	$\leq 0,065$
ČSN EN 13168 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z dřevité vlny (WW) - Specifikace	$\geq 0,15$	$\leq 0,010$
ČSN EN 13169 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z expandovaného perlitu (EPB) - Specifikace	$\geq 0,20$	$\leq 0,070$
ČSN EN 13170 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné výrobky z expandovaného korku (ICB) - Specifikace	$\geq 0,25$	$\leq 0,060$
ČSN EN 13171 Tepelně izolační výrobky pro stavebnictví – Průmyslově vyráběné dřevovláknité výrobky (WF) - Specifikace	$\geq 0,50$	$\leq 0,070$

Norma ČSN EN ISO 9229 „Tepelné izolace - Terminologie“ definuje tepelně izolační materiály jako materiály, které omezují prostup tepla, a jejichž izolační vlastnosti vyplývají z jejich chemického složení a/nebo fyzikální struktury. Tepelně izolační výrobek je dle ČSN 72 7221-1 „Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Část 1: Typy konstrukcí a kategorie použití“ výrobek z tepelně izolačního materiálu výrazně omezujícího šíření tepla, vykazujícího charakteristickou hodnotu součinitele tepelné vodivosti $\lambda_{k,max} = 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Při referenčních teplotních a vlhkostních podmínkách dle ČSN 73 0540-3 a daném stáří, má-li vliv na udávanou hodnotu. Jednotlivé dělení tepelně izolačních materiálů je uvedeno v tabulce 5 výše. Tepelně-technické vlastnosti stavebních materiálů reprezentují především tyto fyzikální veličiny:

- součinitel tepelné vodivosti $\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$,
- tepelná kapacita $c [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$,
- teplotní vodivost $a [\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$,
- tepelná jímavost $b [\text{J}^2\cdot\text{m}^{-4}\cdot\text{K}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$,
- emisivita povrchů těles $\varepsilon [-]$.

6.1 Šíření tepla stavební konstrukcí

Teplo se může šířit v jakémkoliv prostředí pouze tehdy, pokud jsou na různých místech tohoto prostředí rozdílné teploty, přičemž z míst s vyšší teplotou postupuje teplo do míst s teplotou nižší, často dochází k vyrovnávání teplot. Z pohledu prostředí a způsobu přenosu tepelné energie jsou známy tři základní způsoby šíření tepla:

- kondukcí (vedením),
- konvekcí (prouděním),
- radiací (sáláním). [30, 31]

6.1.1 Kondukce

K transportu tepelné energie kondukcí neboli vedením dochází především v tuhých látkách ve směru klesající teploty, přičemž u kapalných a plyných látek, v závislosti na daných podmínkách. Při kondukcí dochází k předávání kinetické energie molekul těles navzájem při jejich dotyku. Vedení je však důležité ve stavební praxi z pohledu vlastního návrhu a projektování tepelných izolací ve stavebních konstrukcích. U běžných stavebních materiálů, které mají v převážné většině pórovitou strukturu, dochází k přenosu tepla i jinými způsoby, než jen vedením, ale většinou přenos tepla vedením nabývá dominantního významu.

Nejvýznamnějším tepelně technickým parametrem stavebních materiálů je součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], který charakterizuje schopnost látek vést teplo. Hodnota součinitele tepelné vodivosti je závislá na řadě materiálových vlastností (objemová hmotnost, chemické složení, krystalická struktura, homogenita materiálu...), dále na řadě faktorů určujících stav materiálu, z nichž zřejmě nejdůležitější je vlhkost, teplota. [30]

Obecně je teplota v daném bodu tělesa funkcí prostorových souřadnic x, y, z a času τ : $\tau = f(x, y, z, \tau)$. Nemění-li se s časem teplota je $d\theta / d\tau = 0$, jedná se o stacionární (ustálené) teplotní pole. Jestliže je teplota funkcí času $\theta = f(\tau)$, pak platí $d\theta / d\tau \neq 0$, jedná se o teplotní pole nestacionární (neustálené).

Početní řešení přenosu tepla vedením je založeno na zákonu zachování energie.

Za podmínky, že součinitel tepelné vodivosti nezávisí na teplotě a směru šíření tepla a že se v tělese nenachází žádný zdroj tepla, má pro homogenní a izotropní těleso Fourierova parciální diferenciální rovnice tvaru (1. Fourierova rovnice):

– pro jednorozměrné vedení tepla

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

θ ... teplota [$^{\circ}\text{C}$]

τ ... čas [s]

a ... součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

x ... vzdálenost dvou bodů [m]

c ... měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

– pro trojrozměrné vedení tepla

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

x, y, z ... souřadnice [m]

Proces šíření tepla vedením popisuje i 2. Fourierova rovnice:

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dx}, \text{ obecně } \bar{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \theta \quad (3)$$

q ... hustota tepelného toku při kondukcii [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

λ ... součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$\frac{d\theta}{dx}$... teplotní gradient [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$] [31, 32]

6.1.2 Konvekce

K šíření tepla prouděním dochází u látek plynných a kapalných (kapalina, plyn, sypká hmota, tekutý kov,...). K šíření tepla dochází vlivem pohybujících se hmotných částic. Vlivem lokálního ohřevu dochází k vzájemnému předávání tepelné energie mezi molekulami látky (kinetická energie částic). Následkem přemísťování hmoty nastává vyrovnávání teploty. Podle způsobu pohybu částic rozeznáváme následující druhy proudění:

- a) přirozené – pohyb látky je dán její rozdílnou hmotností při různé teplotě,
- b) nucené – pohyb látky je vyvolán uměle (pomocí ventilátorů, čerpadel, kompresorů)

Rovnice sdílení tepla v pohybujícím se prostředí v ortogonálních souřadnicích má tvar (veličiny jsou vztaženy na m^3):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + q_v + \\ & + A \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial w_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right)^2 - \right. \\ & \left. - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right\} = \\ & = c \rho \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + w_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - A \left(\frac{\partial p}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial p}{\partial x} + w_y \frac{\partial p}{\partial y} + w_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

q_v ... vnitřní tepelný zdroj [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]

w ... rychlost proudění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

A ... tepelný ekvivalent mechanické práce [$\text{J} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]

μ ... součinitel dynamické viskozity [$\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$]

θ ... teplota [$^{\circ}\text{C}$]

τ ... čas [s]

$x, y, z \dots$ prostorové koordináty [m]

$c \dots$ měrná tepelná kapacita [J.kg.K^{-1}]

$\rho \dots$ hustota [kg.m^{-3}]

Ve výše uvedené rovnici výraz $\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$ (5) představuje množství tepla, obsažené v elementárním objemu prostředí při vedení tepla.

Dále výraz q_v představuje množství tepla, uvolněné vnitřním zdrojem, nacházejícím se v uvažovaném objemu prostředí. Může se jednat např. o teplo Joule-Lentzovo, které vzniká při průchodu elektrického proudu vodičem, teplo vznikající při radioaktivním rozpadu apod.

Výraz:

$$A \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial w_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right\} - A \left(\frac{\partial p}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial p}{\partial x} + w_y \frac{\partial p}{\partial y} + w_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (6)$$

vyjadřuje množství tepla přivedeného do uvažovaného objemu v souvislosti s prací, kterou proudící tekutina vykoná.

Výraz $c \rho \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + w_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$ (7) vyjadřuje změnu tepelného obsahu elementárního objemu prostředí.

Teplotní i rychlostní pole v pohybujícím se prostředí jsou výsledkem řady tepelných i mechanických vlivů, které vzájemně souvisejí a nelze je vyšetřovat bez respektování vzájemné souvislosti jednoho s druhým. Přitom však rozložení teplotního pole souvisí s rychlostním polem. Opačná závislost se v řadě případů nuceného proudění nevyskytuje. Z toho důvodu se při nuceném proudění často vliv teplotního pole zanedbává. Rychlostní pole se vyjádří:

– rovnicí kontinuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \cdot w) = 0 \quad (8)$$

V pravoúhlých souřadnicích má tato rovnice kontinuity tvar:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \gamma \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + w_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + w_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

γ ... měrná hmota, hustota prostředí [$\text{kg.s}^2.\text{m}^{-4}$]

– pohybovou rovnici v pravoúhlých souřadnicích:

$$\begin{aligned} \gamma \frac{D w_x}{d\tau} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \operatorname{div} w) \\ \gamma \frac{D w_y}{d\tau} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w_y}{\partial x} + \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \operatorname{div} w) \\ \gamma \frac{D w_z}{d\tau} &= \gamma g - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w_z}{\partial x} + \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) \right] + \\ &+ 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \operatorname{div} w). \end{aligned} \quad (10)$$

Při stanovení součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů je většinou snaha vycházet pouze z podmínek přestupu tepla (viz výše) a přenos tepla prouděním se neřeší. Jiná situace ovšem nastává při obecnějším řešení prostupu tepla stavební konstrukcí. Zde existují případy (odvětrávané vzduchové dutiny), kdy je nezbytné počítat i s tímto fenoménem. [32]

6.1.3 Radiace

Sálání je forma energie, která je přenášena pomocí elektromagnetických vln nebo hmotných částic, tzv. fotonů, které jsou po dopadu na povrch tělesa přeměněny v teplo. Tepelná radiace je jen malá část elektromagnetického spektra, tzv. infračervené tepelné záření, které se šíří ve vakuu rychlostí světla asi $300.10^6 \text{ m.s}^{-1}$. Infračervená část spektra se skládá z blízké infračervené oblasti s vlnovými délkami od 760 do 15 000 nm, střední infračervené oblasti s vlnovými délkami 15 až 100 μm a daleké infračervené oblasti s vlnovými délkami 100 až 420 μm . V praxi se setkáváme s teplotami, při nichž se hlavní část zářivé energie proměňuje v teplo při vlnových délkách 760 do 15 000 nm, tedy

s oblastí blízkého infračerveného spektra. Sálání ve viditelné oblasti spektra má význam jen při velmi vysokých teplotách.

Teplotní sálání různých těles je určeno jejich teplotním stavem. Při stejné teplotě je sálavá schopnost jednotlivých povrchů stavebních materiálů odlišná. Ideální těleso, které má při dané teplotě maximální sálavou schopnost, se nazývá absolutně černé těleso. Sálavá schopnost reálných konkrétních těles představuje pouze určitou část energie sálání absolutně černého tělesa při stejné teplotě.

Energie vyzařovaná tělesem může být z části pohlcována okolním prostředím, může dopadat na jiná tělesa a rozptylovat se do okolí. Každé těleso má jinou schopnost pohlcování energie. Teplo sálají a absorbují především tuhá tělesa a kapaliny. Sálání kapalin se řídí stejnými zákonitostmi jako sálání pevných těles. Jistou výjimku tvoří částečně propustné kapaliny pro dané vlnové délky. [30]

Intenzita výměny tepelné energie sáláním je při rozdílných teplotách různá a závisí na jejich teplotě, schopnosti sálat, pohlcovat a odrážet teplo, na jejich tvaru, rozměrech a vzájemné poloze ozářených částí konstrukce. Celková energie záření dopadající na těleso je rovna:

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

Q_0 ... celková energie záření dopadající na těleso [J]

Q_A ... část energie pohlcené tělesem [J]

Q_R ... část energie odražené od tělesa [J]

Q_T ... část energie procházející tělesem [J]

Rovnici lze dále upravit na tvar:

$$\frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_T}{Q_0} = 1 \quad (12)$$

$$A + R + T = 1 \quad (13)$$

A ... pohltivost záření [-]

R ... odrazivost záření [-]

T ... propustnost záření [-]

Základem pro technické výpočty tepelných toků šířených sáláním je zákon, který určuje, že hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. Jedná se o:

Stefan-Boltzmannův zákon

$$q_{\varepsilon} = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (14)$$

q_{ε} ... hustota zářivého toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

σ_0 ... součinitel sálání absolutně černého tělesa, tj. $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$

T ... absolutní teplota povrchu tělesa T [K]

Ve skutečnosti se absolutně černá tělesa nevyskytují. Součinitel sálání skutečných těles je součinem pohltivosti sálajícího tělesa A a součinitelem sálání absolutně černého tělesa σ_0 . Tento vztah se označuje jako Kirchhoffův zákon, který lze vyjádřit vztahem [30]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\sigma_0 \cdot T^4} = A \quad (15)$$

Zároveň dle Kirchhoffova zákona, který udává vztah mezi pohltivostí a emisivitou platí, že těleso vyzařuje při dané teplotě stejné množství energie, jako při stejné teplotě pohltí. Každý materiál je z hlediska sálavých toků charakterizován součinitelem sálání σ a emisivitou ε .

Výpočet vyzařované hustoty tepelného toku z objektu je vyjádřen tzv. emisivitou ε , která je definována jako poměr mezi hustotou tepelného toku reálného a černého tělesa při stejné teplotě a platí že:

$$\varepsilon = \frac{q_s}{q_{\varepsilon}} \quad (16)$$

q_s ... hustota zářivého toku skutečného (šedého) tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

q_{ε} ... hustota zářivého toku absolutně černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

ε ... emisivita [-]

Emisivita nezávisí na teplotě, ani na vlnové délce. Její hodnota je menší než 1. Hustota zářivého toku skutečného tělesa je dána rovnicí:

$$q_s = \varepsilon \cdot q_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \quad [31] \quad (17)$$

6.2 Součinitel tepelné vodivosti stavebních materiálů

Při kvantifikaci šíření tepelných toků stavební konstrukcí je nutné vycházet z tepelně technických vlastností stavebních materiálů. Avšak, jak je obecně známo, tyto vlastnosti nejsou veličinami konstantními, jsou závislé na celé řadě parametrů. Mezi nejvýznamnější tepelně technické vlastnosti patří součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], který vyjadřuje schopnost látky vést teplo. Tepelná vodivost daného materiálu je hustota tepelného toku při jednotkovém teplotním gradientu.

U stavebních výrobků je nezbytné počítat s hodnotou součinitele tepelné vodivosti, kterou budou mít materiály po zabudování do konstrukce, respektive po dobu užívání konstrukce. Důležité je také zohlednění vlivu všech vnějších činitelů, které mají na hodnotu součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů vliv. Zjednodušeně lze zapsat:

$$\lambda = f\{\rho_v, w_m, \theta, P, \varphi(I)\} \quad (18)$$

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

w_m ... hmotnostní vlhkost materiálu [%]

θ ... teplota materiálu [$^{\circ}\text{C}$]

P ... pórovitost [-]

$\varphi(I)$ funkce vnitřních proměnných – chemicko-mineralogické složení, fázové složení, krystalické modifikace, a další. [31]

Dle normy ČSN EN ISO 10456 lze obecně vyjádřit přepočtené tepelné hodnoty z jednoho souboru podmínek (λ_1, R_1) na jiný soubor podmínek (λ_2, R_2) pomocí následujících vztahů:

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_m * F_a \quad (19)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T * F_m * F} \quad (20)$$

F_T ... převodní teplotní faktor [-]

F_m ... převodní vlhkostní faktor [-]

F_a ... převodní faktor stárnutí [-]

$\lambda_{1,2}$... součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

R ... tepelný odpor [$\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$]

Převodní součinitele mohou být získány z tabulek uvedených v normě ČSN EN ISO 10456 či mohou být odvozeny na základě naměřených hodnot dle normou uvedených norem (ISO 8301, ISO 8302, ISO 8990). [33]

6.2.1 Vliv objemové hmotnosti a pórovitosti

Objemová hmotnost je vlastností, která vyjadřuje hutnost a celistvost struktury daného stavebního materiálu (na makroskopické i mikroskopické úrovni). Většina stavebních materiálů vykazuje jisté procento pórovitosti. Se vzrůstající pórovitostí klesá hodnota objemové hmotnosti daného materiálu. Obecně platí, že se vzrůstající objemovou hmotností vzrůstá i hodnota součinitele tepelné vodivosti daného materiálu.

V praxi je však situace poněkud složitější. U materiálů s velmi nízkou objemovou hmotností (např. pěnový polystyren, minerální vlna) dochází při snižování objemové hmotnosti pod jistou hranici k postupnému snižování tepelně izolačních vlastností (zvyšování hodnoty součinitele tepelné vodivosti). Tento efekt je způsoben zvýšením intenzity výměny tepla vlivem konvekce a radiace při velmi nízké hutnosti materiálu, tzn. vysoké pórovitosti materiálu. Vliv konvekce je možné z větší části eliminovat snížením tlaku v pórech materiálu (vakuové tepelné izolace) a vliv radiace přidáním částic, které pohlcují nebo odrážejí infračervené záření (např. částice hliníku, uhlíku).

Výsledná hodnota součinitele tepelné vodivosti pórovitého materiálu se skládá z hodnoty součinitele tepelné vodivosti materiálové kostry (homogenního materiálu bez pórů) a z hodnoty součinitele tepelné vodivosti vzduchu. Pórovitost materiálu snižuje hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Z literatury je známý odhad výsledné hodnoty součinitele tepelné vodivosti pórovitého materiálu [30]:

$$\lambda_{dry} = \lambda_{mat} \cdot (1 - P) + \lambda_{vzd} \cdot P \quad (21)$$

případně:

$$\lambda_{dry} = \lambda_{mat}^{(1-P)} \cdot \lambda_{vzd}^P \quad (22)$$

λ_{dry} ... výsledný součinitel tepelné vodivosti suchého materiálu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

λ_{mat} ... součinitel tepelné vodivosti hutného materiálu bez pórů [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

λ_{vzd} ... součinitel tepelné vodivosti vzduchu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

P ... pórovitost [-]

6.2.2 Vliv vlhkosti na hodnotu součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů

Většina stavebních konstrukcí obsahuje jisté množství vlhkosti. K šíření vlhkosti v konstrukci dochází především difúzí vodní páry a kapilárním vedením. Kromě vlhkosti vnitřního prostředí má na šíření vlhkosti zásadní vliv i velikost, tvar a otevřenost pórů stavebního materiálu. Vlhkostní transfer probíhá od místa s vyšším obsahem vlhkosti do místa s vlhkostí nižší. Vázání molekul vodní páry probíhá adsorpcí na povrch stavebního materiálu účinkem van der Waalsových sil.

Vlhkostní zatížení stavebních konstrukcí lze charakterizovat řazením do několika skupin. Dle ČSN P 73 0600 „Hydroizolace staveb – základní ustanovení“ lze hydrofyzikální namáhání staveb dělit do následujících skupin:

- a) hydrofyzikální namáhání – všeobecně;
- b) namáhání vodní parou;
- c) namáhání vlhkostí přilehlého pórovitého prostředí;
- d) namáhání vodou stékající po povrchu konstrukcí;
- e) namáhání vodou prosakující přilehlým pórovitým prostředím;
- f) namáhání tlakovou vodou;
- g) namáhání vodou v pevném skupenství.

Obecně se však vlhkost ve stavební konstrukci rozděluje do níže uvedených oblastí:

- Expediční vlhkost
Tuto okamžitou vlhkost obsahuje stavební materiál při dodání na stavbu. Při výrobě stavebních materiálů mokrým způsobem je do výrobku vneseno vysoké procento vlhkosti, které se po dobu skladování a sušení ve výrobním závodě nepodaří zcela odstranit. U některých speciálních výrobků může být expediční vlhkost $w_{m,exp}$ velmi vysoká, například u pórobetonu se pohybuje na hranici 30 %. Často však dochází k vnesení nemalého množství vlhkosti špatným uskladněním u prodejců stavebnin, např. nezastřešené prostory, porušené ochranné hydroizolační obaly na materiálu.
- Technologická vlhkost
Technologická vlhkost je vnášena do konstrukce při realizaci výstavby mokrými technologickými způsoby. Jedná se o vlhkost, která se přenáší kapilárním vedením, tedy přímým stykem suchého materiálu s materiálem vlhkým (zdění, provádění omítek, lití podlah, ...), a dále o vlhkost šířící se difúzí, kdy se vlhkost při mokrému

způsobu výstavby uvolňuje do vnitřního prostředí a difunduje do přilehlých stavebních konstrukcí. Vázání vodní páry probíhá adsorpcí na povrch stavebního materiálu vlivem Van der Waalsových sil.

– Zemní vlhkost

Zemní vlhkost proudí do konstrukce z přiléhající zeminy, což je způsobeno špatnou či porušenou hydroizolací. Projevuje se většinou u starších objektů, v případě novostaveb se jedná většinou o hrubou technologickou vadu při provádění hydroizolací anebo o nevhodný návrh hydroizolačních opatření (např. zanedbání vlivu tlakové spodní vody).

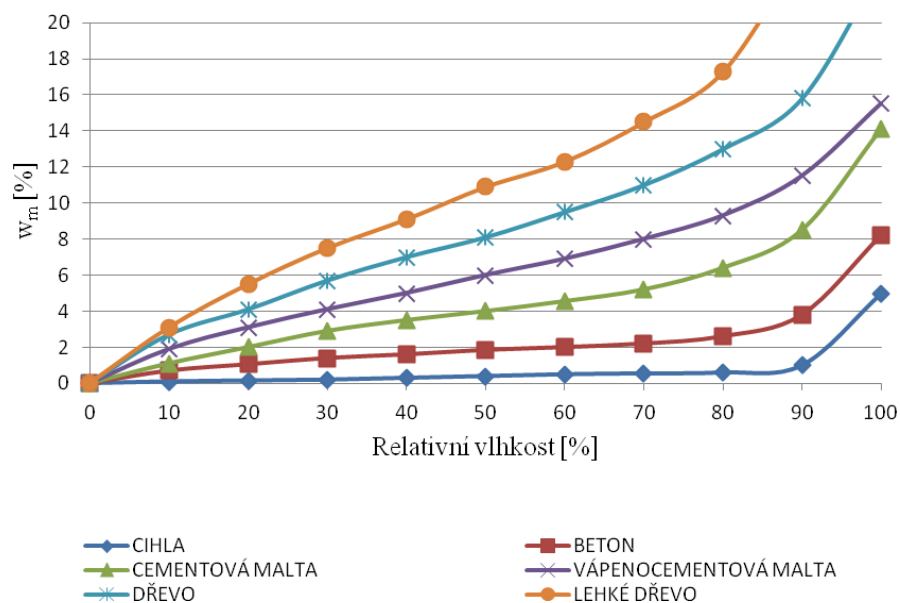
– Srážková vlhkost

Děšť a sníh patří ke klimatickým vlivům, kterým nelze zabránit. Lze však konstrukci chránit kvalitní hydrofobizační povrchovou úpravou (nátěry, obklady).

– Provozní vlhkost

Ve stavební konstrukci během jejího užívání vzniká provozní vlhkost. Závisí zejména na způsobu užívání stavební konstrukce a na klimatických podmínkách, v nichž je daná konstrukce exponována. Tato vlhkost, která se šíří většinou z vnitřního do vnějšího prostředí, při dosažení rosného bodu může v konstrukci kondenzovat.

Pórovitý stavební materiál obsahuje za běžných podmínek vždy jisté procento vlhkosti (min. 0,5–2 %). Množství této vlhkosti je závislé na jeho pórovém systému, na relativní vlhkosti prostředí a teplotě. Kromě množství pórů je důležitá také jejich velikost. Obecně platí, že menší póry se díky vysokému kapilárnímu tlaku zaplňují vodou dříve než velké póry. Schopnost materiálu přijímat vlhkost vyjadřuje sorpční izoterma. Na následujícím grafu jsou vyobrazeny sorpční izotermy některých, běžně používaných stavebních materiálů. [30]



Obr. 20 Sorpční izotermy stavebních materiálů [34]

Návrhová hodnota součinitele tepelné vodivosti u stavebního materiálu úzce souvisí s jeho vlhkostním obsahem, proto je většinou nutné při reálných výpočtech uvažovat okamžitou vlhkost stavebního materiálu při zabudování do konstrukce a jeho ustálenou vlhkost, při užívání konstrukce s ohledem na reálné okrajové podmínky. Při tepelně technických výpočtech není možné počítat pouze s transportem tepla, ale je nutné započítat také transport vlhkosti s ohledem na změnu tepelně technických vlastností materiálů.

Součinitel tepelné vodivosti vlhkého materiálu je definován tepelnou vodivostí pevné matrice, tekutých fází, plynných fází a jejich množstvím, fázovými změnami a prostorovým uspořádáním fází. Hodnotu suchého materiálu, s ohledem na jeho pórovitost, lze vyjádřit vztahem, který je uveden výše.

Hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiálu plně saturovaného vlhkostí (nasáklého) lze přibližně vyjádřit vztahem:

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_{\text{mat}}^{(1-P)} \cdot \lambda_{\text{vody}}^P \quad (23)$$

Pro hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiálové kostry platí:

$$\lambda_{\text{mat}} = \left(\frac{\lambda_{\text{dry}}}{\lambda_{\text{vzd}}^P} \right)^{\frac{1}{(1-P)}} \quad (24)$$

λ_{dry} ... součinitel tepelné vodivosti suchého materiálu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

λ_{sat} ... součinitel tepelné vodivosti materiálu nasáklého vodou [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

λ_{mat} ... součinitel tepelné vodivosti materiálu bez pórů [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

λ_{vzd} ... součinitel tepelné vodivosti vzduchu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

λ_{vody} ... součinitel tepelné vodivosti vody [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

P objemová pórovitost [-]

Jak je patrné, lze tedy na základě znalosti součinitele tepelné vodivosti suchého materiálu a jeho pórovitosti stanovit hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiálové kostry λ_{mat} . Na základě této hodnoty potom můžeme stanovit hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiálu saturovaného vlhkostí λ_{sat} .

Vlivem zvyšování vlhkosti dochází u stavebních materiálů k postupnému zaplňování vzduchových pórů vodou. Přičemž hodnota součinitele tepelné vodivosti vlhkého materiálu $\lambda_{(w)}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] se postupně zvyšuje a při plném zaplnění pórového systému vlhkostí dosáhne mezní hodnoty součinitele tepelné vodivosti saturovaného materiálu λ_{sat} .

Z rovnice popisující vztah mezi součinitelem tepelné vodivosti suchého pórovitého materiálu λ_{dry} a jeho pórovitostí P poté získáme vztah:

$$\lambda_{(w)} = \lambda_{mat} \cdot (1 - P) + \lambda_{vody} \cdot w + \lambda_{vzd} \cdot (P - w) \quad (25)$$

w ... objemová vlhkost [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$]

Nárůst hodnoty součinitele tepelné vodivosti je v oblasti nízké (hygroskopické) vlhkosti strmější. Pro tento jev existují dvě hypotézy. Obě jsou založeny na sorpčním procesu vlhkosti. V souladu s hypotézami je pevný materiál rozdělen vzrůstajícím vlhkostním obsahem na hygroskopické oblasti a celková hodnota součinitele tepelné vodivosti je vyjádřena takto vzniklým sériovým modelem.

První hypotéza – menší suché póry jsou vlivem vyššího kapilárního tlaku zaplňovány přednostně vodou a při svém zaplnění tvoří ve struktuře materiálu tepelné mosty. Při další absorpci vlhkosti dochází k zaplňování makropórů vlhkostí, přičemž strmost nárůstu hodnoty součinitele tepelné vodivosti se postupně snižuje.

Druhou hypotézou je smrštění materiálu (oblast mikrotrhlin) vlivem rozdělení tlaku ve struktuře materiálu. [30]

6.2.2.1 Oblast hygroskopické vlhkosti

Pokud vezmeme v úvahu tepelné mosty, které existují ve vzduchosuchém materiálu za normálních podmínek vlivem stálého zaplnění nejmenších pórů vlhkostí w_{min} , a mezní hygroskopickou vlhkost materiálu $w_{h,max}$, obdržíme pro součinitel tepelné vodivosti matrice $\lambda_{mat(w)}$ [W.m⁻¹.K⁻¹] následující vztah:

$$\lambda_{mat(w)} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{mat}} + \frac{w - w_{min}}{\lambda_{vody}} + \frac{w_{h,max} - w}{\lambda_{vzd}}} \quad (26)$$

Po dosazení získáme následující vztah:

$$\lambda_{(w)} = \lambda_{mat(u)} \cdot (1 - P) + \lambda_{vody} \cdot (w - w_{min}) + \lambda_{vzd} \cdot (P - w) \quad (27)$$

Při zaplňování pórového systému vlhkostí u některých stavebních materiálů dochází k objemovým změnám. Tyto změny souvisí především se změnou kapilárního tlaku v závislosti na saturaci kapilárního systému vlhkostí.

6.2.2.2 Mimo oblast hygroskopické vlhkosti

Po dosažení maxima hygroskopické vlhkosti $w_{h,max}$ dochází k zaplňování kapilárního systému vlhkostí a paralelní systém vyjádření tepelné vodivosti je modifikován vlivem klikatostí kapilárního systému nerovnoměrně zaplněného vlhkostí. Tento efekt lze kvantifikovat zavedením faktoru stejnoměrnosti R . Tento faktor může být určen na základě strukturálních parametrů pórového systému.

Konečnou hodnotu součinitele tepelné vodivosti vlhkého materiálu $\lambda_{(w)}$ [W.m⁻¹.K⁻¹] za oblastí hygroskopické vlhkosti lze vyjádřit:

$$\lambda_{(w)} = \lambda_{mat(u)} \cdot (1 - P) + \lambda_{vody} \cdot \sum_f w_f \cdot R_f + \lambda_{vzd} \cdot (P - w) \quad (28)$$

f ... počet uvažovaných pórových frakcí

$w_f R_f$... autokorelační funkce vyjádření odchylky reálných pórů od paralelního uspořádání kapilár v ideálním modelu

Exaktně je však nutné použít pro výpočet model, který popisuje konkrétní typ stavebního materiálu, jeho materiálové kostry a pórového systému. [30]

6.2.2.3 Přepočet součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti

Vztahy pro přepočet součinitele tepelné vodivosti a tepelného odporu jednoho souboru podmínek (λ_1, R_1) na jiný soubor podmínek (λ_2, R_2) dle ČSN EN ISO 10456 byly uvedeny již výše v kapitole 6.2.

Převodní vlhkostní faktor F_m pro přepočet na hmotnostní obsah vlhkosti je vyjádřen vztahem:

$$F_m = e^{f_u(u_2 - u_1)} \quad (29)$$

f_u ... převodní součinitel pro hmotnostní vlhkost [-]

u_1 ... hmotnostní vlhkost v 1. souboru podmínek [kg.kg^{-1}]

u_2 ... hmotnostní vlhkost v 2. souboru podmínek [kg.kg^{-1}]

Podle normy ČSN EN ISO 10456, tabulky 4 na straně 17, je roven převodní součinitel hmotnostní vlhkosti $f_u = 0,5 \text{ kg.kg}^{-1}$ (volná buničitá vlákna).

Převodní vlhkostní faktor F_m pro přepočet na objemový obsah vlhkosti je vyjádřen vztahem:

$$F_m = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)} \quad (30)$$

f_ψ ... převodní součinitel pro objemovou vlhkost [-]

ψ_1 ... objemová vlhkost v 1. souboru podmínek [$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$]

ψ_2 ... objemová vlhkost v 2. souboru podmínek [$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$]

Hodnoty převodních součinitelů vlhkosti f_u a f_ψ jsou uvedeny v tabulce 4 normy ČSN EN ISO 10456. [33]

6.2.3 Vliv teploty na hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiálů

Hodnota součinitele tepelné vodivosti se většinou zvyšuje se stoupající teplotou látky. Zvýšení součinitele tepelné vodivosti při vyšší teplotě látky souvisí se zvýšením kinetické energie molekul v základní látce. Z pohledu skupenství látek lze konstatovat, že největší míru závislosti součinitele tepelné vodivosti na teplotě mají plynné a kapalně látky. K přenosu tepelné energie dochází především vlivem proudění. Pro zjednodušení je však často použita ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti $\lambda_{cv,ev,p}$ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$], která zohledňuje všechny tři základní způsoby přenosu tepla. U většiny pevných látek se hodnota součinitele tepelné vodivosti spolu s teplotou zvyšuje.

Jednu z mála výjimek však tvoří kovy. U kovů lze pozorovat těsnou korelaci mezi vodivostí elektrickou a tepelnou, která souvisí s pohybem volných elektronů kovů. Proto na rozdíl od ostatních látek, hodnota součinitele tepelné vodivosti kovů v závislosti na zvyšující se teplotě klesá.

Významné jsou především změny součinitele tepelné vodivosti při teplotách okolo bodu mrazu a pod bodem mrazu. Tepelná vodivost ledu je asi 4x vyšší než tepelná vodivost vody. Čím větší vlhkost se v materiálu nachází, tím větší množství se mění v led a tím více narůstá součinitel tepelné vodivosti. [30]

Vztahy pro přepočet součinitele tepelné vodivosti a tepelného odporu jednoho souboru podmínek (λ_1, R_1) na jiný soubor podmínek (λ_2, R_2) dle ČSN EN ISO 10456 byly uvedeny již výše v kapitole 6.2.

Převodní teplotní faktor F_T pro přepočet je vyjádřen vztahem:

$$F_T = e^{f_T(\Theta_2 - \Theta_1)} \quad (31)$$

f_T ... převodní teplotní součinitel [1/K]

Θ_1 ... teplota 1. souboru podmínek [°C]

Θ_2 ... teplota 2. souboru podmínek [°C]

Hodnoty f_T jsou uvedeny v příloze A normy ČSN EN ISO 10456. [33]

6.2.4 Vliv směru tepelného toku

U anizotropních látek závisí hodnota součinitele tepelné vodivosti na směru tepelného toku. Typickým představitelem takových látek jsou vláknité látky, jejichž délka vláken je mnohokrát větší než jejich průměr. Vláknité látky proto vytvářejí póry ve tvaru dlouhých štěrbin. V rovnoběžném směru s vlákny jsou póry mnohem větší, než póry ve směru kolmém na vlákna. Tepelný tok kolmo na směr vláken musí překonat větší množství pórů a mezer uvnitř vláken a mezi vlákny, než ve směru rovnoběžném s vlákny. Z toho vyplývá, že součinitel tepelné vodivosti při tepelném toku kolmo na vlákna bude nižší, než při tepelném toku rovnoběžném s vlákny. [30]

6.2.5 Vliv vnitřní mikrostruktury a chemické povahy látek

Chemická skladba, fázové a mineralogické složení - krystalická struktura látek mají zásadní vliv na tepelně izolační vlastnosti materiálů.

Přenos tepla vedením v pevných materiálech je uskutečňován přímým předáváním kinetické energie mezi částicemi látky. Schopnost vést teplo ovlivňuje vzdálenost těchto částic a jejich fixace mezimolekulárními silami v dané poloze. Je to dáno zejména

krystalickou strukturou. Obecně lze konstatovat, že krystalické látky vedou teplo lépe, než látky amorfni a látky po chemické stránce jednodušší vedou teplo lépe, než ty složitější. Na vedení tepla v látkách se nejvíce podílejí elektrony. Existence volných elektronů u kovů se tak projevuje jejich vysokou tepelnou vodivostí. Látky kyselé také obecně vedou teplo lépe než látky zásadité. [30]

7. Akusticko izolační materiály a jejich vlastnosti

V obytném prostředí má hluk trvale vzrůstající tendenci. Jedním z hlavních cílů bytové a občanské výstavby je zabezpečení akustické pohody architektonického prostředí. Akustická pohoda má příznivý vliv na zdraví člověka, k její tvorbě přispívají svými akusticko izolačními vlastnostmi určené stavební prvky. Pro správně zvolený materiál, jeho umístění v konstrukci či mechanické ukotvení je třeba znát některé principy ze stavební akustiky.

Pro pohlcování zvuku je možné použít tři typy pohlcovačů, mezi které patří:

- porézní pohlcovače,
- dutinové pohlcovače,
- rezonanční zvukové pohlcovače (na principu kmitajících desek a membrán).

V praxi se pro obecné pohlčení zvuku nejčastěji používají porézní pohlcovače, tedy první uvedený typ. Proto jsou v oblasti zvukové izolace ve stavební praxi nejpoužívanější porézní materiály. Vhodná pórovitost pro utlumení akustické energie je alespoň 60 % (důležitá je zde otevřenost pórové struktury). Vzhledem k nízkým mechanickým vlastnostem nemohou být akustické izolanty použity většinou jako nosné stavební prvky. Jejich funkce v konstrukci je především výplňová či obkladová.

Porézní materiály jsou schopny svou porézní strukturou pohltit dopadající akustickou energii. Principem je převod mechanické energie na energii tepelnou. Při šíření zvuku vzduchem dochází k jeho zředňování a zhušťování a tím ke tření molekul v pórech. [35]

K pohlčení akustické energie dochází třemi způsoby:

- násobnými odrazy zvukového paprsku v pórech,
- třením vzduchu přenášejícího akustickou energii o stěny pórů,
- přeměnou akustické energie na expanzní práci, periodicky stlačovaný vzduch v pórech.

Stavební akustika se zabývá akustickými izolacemi ze dvou pohledů a to z pohledu:

- konstrukčního, kdy je zájem směřován k celé stavební konstrukci, měření jsou prováděna přímo v praxi nebo v laboratořích na existujících konstrukcích,
- stavebních materiálů, kdy je zájem směřován k akustickým vlastnostem dílčích částí stavební konstrukce, měření jsou prováděna za laboratorních podmínek, mezi nejdůležitější zvukové izolační vlastnosti z materiálového hlediska patří:

- činitel zvukové pohltivosti α [-],
- dynamická tuhost s' [MPa.m⁻¹].

Z pohledu akusticko izolačních vlastností dělicích konstrukcí rozeznáváme:

- vzduchovou neprůzvučnost- zvuk se šíří vzduchem,
- kročejovou neprůzvučnost- zvuk, vznikající mechanickými nárazy na dělicí konstrukci (strop, podlaha).

Vzduchová neprůzvučnost představuje schopnost konstrukce přenášet akustický výkon šířící se vzduchem z místa zdroje (vysílací prostor) do chráněné místnosti (přijímací prostor) v zeslabené míře. Vzduchová neprůzvučnost je základním kritériem, které charakterizuje zvukoizolační vlastnosti dělicí konstrukce. Závisí na frekvenci (měření se provádí v třetinooktávové řadě od 100 Hz do 3150 Hz) a na plošné hmotnosti.

Kročejovou neprůzvučností rozumíme schopnost konstrukce v zeslabené míře přenést vyzařovaný kročejový hluk svým druhým povrchem do chráněné místnosti. Vyjadřuje se hladinou akustického tlaku v přijímací místnosti pod stropní konstrukcí. Na kročejovou neprůzvučnost se posuzují zejména stropní konstrukce. Požadavky na stavební konstrukce z pohledu vzduchové a kročejové neprůzvučnosti jsou deklarovány (v souladu s vyhláškou 268/2009 Sb.) v ČSN 73 0532. [36]

7.1. Činitel zvukové pohltivosti stavebních materiálů

Zvuková pohltivost je schopnost materiálu pohltit část dopadajícího akustického výkonu. Jedná se o vlastnost porézních pohlcovačů, které tvoří převážnou část izolačních materiálů s otevřenou pórovou strukturou. Činitel zvukové pohltivosti je poměr pohlceného akustického výkonu a dopadajícího akustického výkonu:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} = \frac{W_i - W_r}{W_i} [-] \quad (32)$$

W_a ... pohlcený akustický výkon [W]

W_i ... dopadající akustický výkon [W]

W_r ... odražený akustický výkon [W]

Činitel zvukové pohltivosti nabývá hodnot od 0 do 1. Pro konstrukce s $\alpha = 0$ je veškerý akustický výkon odražen zpět, jedná se o totální odraz. V případě $\alpha = 1$ se jedná

o totální absorpci a všechny dopadající akustický výkon je konstrukcí pohlcen. Činitel zvukové pohltivosti závisí na frekvenci a na úhlu dopadu. Z materiálového hlediska hraje důležitou roli pórovitost materiálu. Při každém odrazu od stěny pórů dochází ke snížení intenzity dopadajícího zvuku. Kromě množství pórů jsou důležité také velikost, tvar, rozmístění a propojení pórů. Je také nezbytně nutné, aby nedocházelo k uzavření pórů při povrchových úpravách akusticko izolačních materiálů. Frekvenční průběh činitele zvukové pohltivosti je závislý také na vztahu jeho tloušťky a frekvenci dopadajícího zvuku. Maximálního činitele zvukové pohltivosti lze dosáhnout právě tehdy, když platí:

$$d = \frac{c}{4 \cdot f} \quad (33)$$

c ... rychlost zvuku v daném prostředí [m.s^{-1}]

f ... frekvence daného zvuku [Hz]

Z konstrukčního hlediska lze činitel zvukové pohltivosti zvýšit odsazením akustického materiálu od konstrukce a vytvořit tak mezi akustickým materiálem a konstrukcí vzduchovou mezeru. Lze také použít i menší tloušťky akustického materiálu. Je ale nutné jej umístit do vzdálenosti lichého násobku $\lambda/4$ zvukového signálu. [37]

7.2. Dynamická tuhost

Každé pružně uložené těleso tvoří se svým pružným upevněním kmitavou soustavu. Dostane-li kmitavá soustava impuls, rozkmitá se vždy určitým kmitočtem, tzv. vlastním kmitočtem soustavy f_r (rezonanční frekvence) a ten lze vyjádřit vztahem:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad [\text{Hz}] \quad (34)$$

s' ... dynamická tuhost materiálu [MPa.m^{-1}]

m' ... plošná hmotnost pevné plovoucí desky [kg.m^{-2}]

Dynamická tuhost materiálu je schopnost tlumit impulsy, které soustavu rozkmitaly.

Pro zvýšení neprůzvučnosti stropních konstrukcí se užívají plovoucí podlahy, jejichž podstatou je roznášecí (plovoucí) deska, která je od nosné části stropu oddělena pružnou podložkou. Akusticko izolační efekt závisí na dynamické tuhosti podložky a na plošné hmotnosti roznášecí desky.

Pro utlumení kročejového hluku je tedy vhodné používat materiál s vysokou pružností, aby došlo k utlumení dynamických kmitů. Tento jev charakterizuje právě již zmíněná veličina dynamická tuhost. Je dána poměrem dynamické síly k dynamické výchylce vztahem [35]:

$$s' = \frac{F}{S \cdot \Delta d} \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (35)$$

F ... dynamická síla působící na zkušební vzorek kolmo [N]

S ... plocha vzorku [m^2]

Δd ... výsledná změna tloušťky vzorku [m]

Dle plošných hmotností můžeme podlahy rozdělit dle následující tabulky. [36]

Tab. 6 Rozdělení podlah dle plošné hmotnosti

Typ podlahy	Plošná hmotnost m' [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$]
Těžké podlahy	≥ 75
Lehké podlahy	15–75
Izolační podlahové povlaky	2,5–15

Dle dynamické tuhosti můžeme podlahy rozdělit dle následujících tabulek do kategorie podložky nebo do skupin akusticko izolačních materiálů.

Tab. 7 Kategorie podložky dle dynamické tuhosti [36]

Kategorie podložky	Dynamická tuhost s' [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]
I. Kategorie	≤ 30
II. Kategorie	$30 < s' \leq 200$
III. Kategorie	> 200

Kvalitu akusticko izolační podložky, s ohledem na trvalost zvukově izolačního efektu, je třeba brát v úvahu statické a relaxační vlastnosti. Jejimi parametry je stlačitelnost K [%], pružnost ε [%] a poddajnost. Dané parametry jsou dány následujícími vztahy:

$$K = \frac{h'_0 - h_n}{h_0} \cdot 100 \quad (36)$$

$$\varepsilon = \frac{h_0' - h_n}{h_0 - h_n} \cdot 100 \quad (37)$$

h_0 ... tloušťka akustického materiálu v nezatíženém stavu [m]

h_0' ... tloušťka akustického materiálu v ustáleném stavu po odtížení [m]

h_n ... tloušťka akustického materiálu při zatížení 2 kPa [m]

Dle hodnot stlačitelnosti a pružnosti se určí typ podložky dle následujících tabulek, které jsou uvedeny v ČSN 73 0532.

Tab. 8 Pružnost při zatížení 2 kPa [36]

Typ podložky	ε [%]
Pružná	$\leq 90 \%$
Polopružná	$50 \% \leq \varepsilon < 90 \%$
Nepružná	$\varepsilon < 50 \%$

Tab. 9 Stlačitelnost při zatížení 2 kPa [36]

Typ podložky	K [%]
Měkká	$K \geq 20 \%$
Polotuhá	$5 \% \leq K < 20 \%$
Tuhá	$K < 5 \%$

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1. Metodika práce

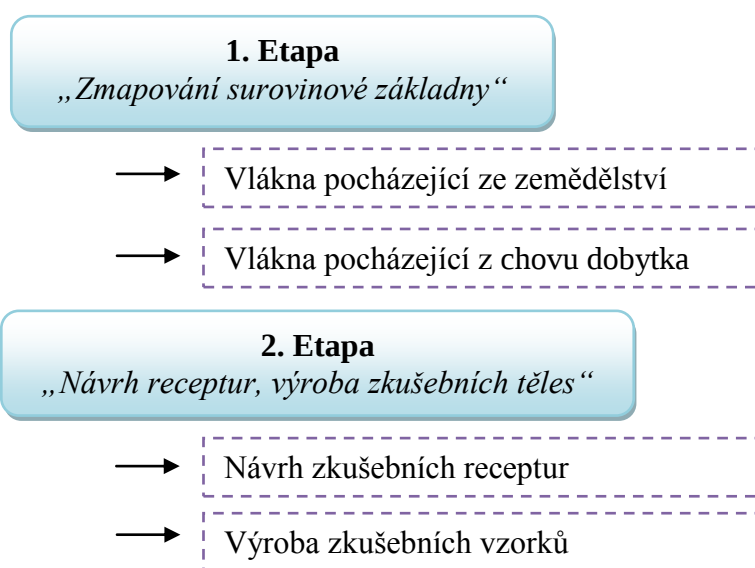
Cílem disertační práce je vývoj a výzkum vlastností environmentálně úsporných izolačních materiálů na bázi alternativních surovinových zdrojů, zejména přírodních, snadno obnovitelných zdrojů či odpadních materiálů z průmyslové produkce, které by našly uplatnění ve stavebnictví. Tyto materiály by měly disponovat dobrými fyzikálními, akustickými, případně i mechanickými vlastnostmi, přičemž jejich tepelné technické vlastnosti by měly být srovnatelné s vlastnostmi klasických tepelně izolačních materiálů běžně používaných ve stavebnictví.

Hlavní náplní disertační práce je studium tepelně vlhkostních charakteristik vyvinutých izolačních materiálů, což je největším přínosem této práce. Získané poznatky slouží jako podklady pro provedení výpočtových simulací, na základě jejichž výsledků je možné provést návrh možného uplatnění vyvinutých izolačních materiálů v novodobých konstrukcích.

Disertační práce byla rozčleněna do pěti navazujících etap.

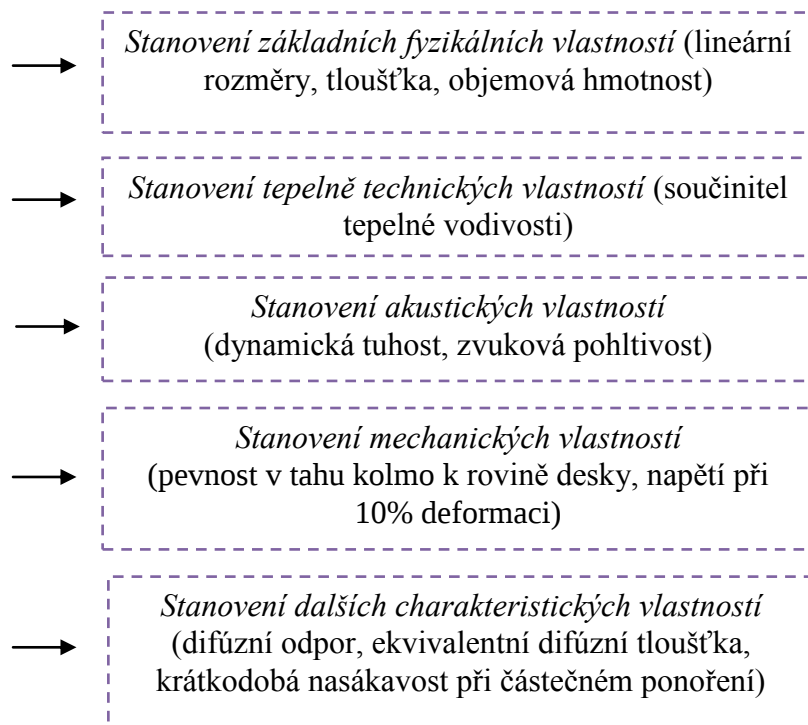
1. V rámci první etapy bylo provedeno **zmapování dostupných surovinových zdrojů** využitelných pro výrobu izolačních materiálů na přírodní bázi. Průzkum dostupných surovinových zdrojů byl zaměřen nejen na území České republiky, ale i na ostatní země v rámci EU. Na základě zjištěných dat byla provedena optimalizace výběru vhodných vstupních surovin, mezi základní kritéria patřily zejména jejich užitné vlastnosti a ekonomické aspekty.
2. Na základě provedeného průzkumu v první etapě byl proveden v druhé etapě **návrh receptur zkušebních vzorků** z vytipovaných vstupních surovin. Při návrhu kompozice zkušebních vzorků byl brán zřetel na jejich předpokládané využití. Byla vyrobena zkušební tělesa o daném složení a definovaných rozměrech pro následná laboratorní testování. Výroba zkušebních vzorků proběhla na výrobní lince umožňující zpracování vláknitých materiálů, kterou vlastní firma CANABEST, s. r. o. v Břeclavi-Poštorné (technologie termického pojení).
3. Náplní třetí etapy bylo **provedení základních laboratorních měření** klíčových vlastností (fyzikální, mechanické, tepelné a akusticko izolační vlastnosti) na vyrobených zkušebních vzorcích. Jednalo se o provedení stanovení: tloušťky a

- lineárních rozměrů, objemové hmotnosti, součinitele tepelné vodivosti, faktoru difúzního odporu, ekvivalentní difúzní tloušťky, napětí při 10% deformaci, pevnosti v tahu kolmo k rovině desky, dynamické tuhosti, činitele zvukové pohltivosti a krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření.
4. Čtvrtá etapa byla věnována studiu **tepelně vlhkostního chování** zkušebních vzorků z vyvinutých izolačních materiálů za účelem získání dalších podkladních dat pro výpočtové posouzení jejich chování po zabudování do stavební konstrukce. Bylo provedeno stanovení sorpčních vlastností vyvinutých materiálů a studium závislosti součinitele tepelné vodivosti na nejvýznamnějších faktorech, tj. teplotě, vlhkosti a objemové hmotnosti. Poté byl proveden optimalizační výpočet za účelem výběru vhodných zkušebních receptur pro dané aplikace v konstrukci. Na základě naměřených dat a výsledků optimalizačního výpočtu byly provedeny výpočtové simulace reálného chování vyvíjených materiálů ve stavební konstrukci po zabudování (pro výpočty byly využity programy WUFI®2D a Therm). V závěru etapy bylo provedeno celkové zhodnocení možnosti použití vyvinutých materiálů pro plánované aplikace v reálných stavebních konstrukcích.
 5. Závěrečná pátá etapa byla věnována celkovému **vyhodnocení jednotlivých dílčích etap** a zhodnocení vlastností vyvinutých přírodních materiálů na bázi přírodních vláken. Získané charakteristiky u nově vyvinutých přírodních izolací byly porovnány s dnes běžně dostupnými izolačními materiály na trhu. Byl proveden návrh možné aplikace materiálů v reálných konstrukcích.



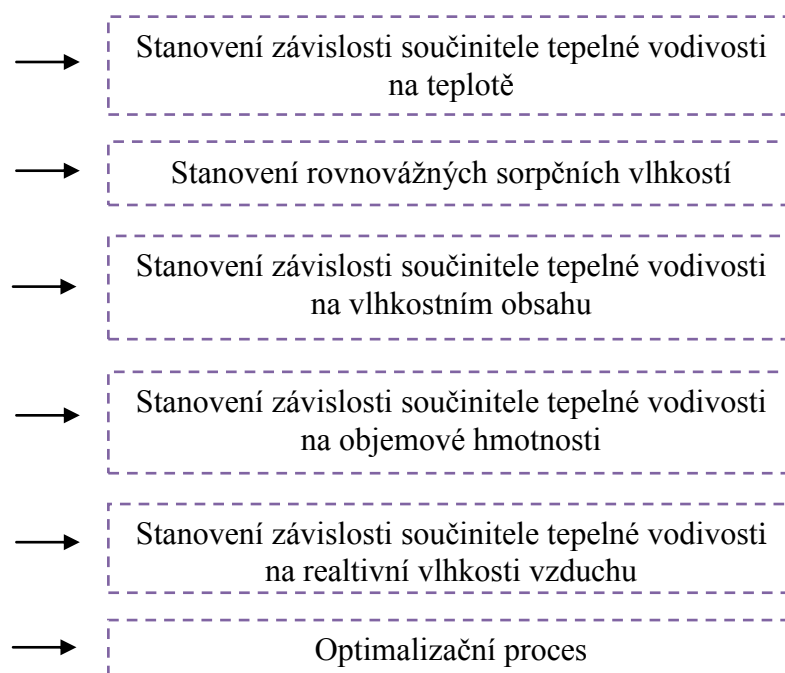
3. Etapa

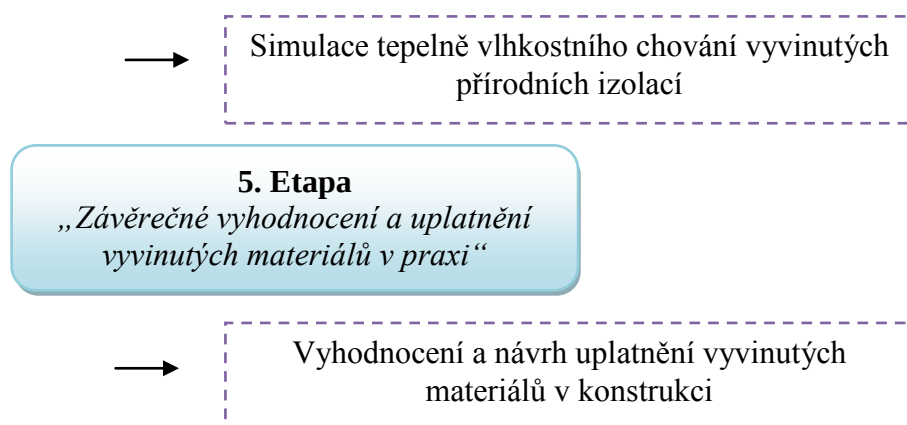
„Laboratorní měření“



4. Etapa

„Stanovení sorpčních charakteristik a simulace chování vyvinutých materiálů v praxi“





Obr. 21 Schéma jednotlivých etap disertační práce

2. Metodika prováděných zkoušek

Jelikož se jedná o vývoj izolačních materiálů, jak tepelně izolačních, tak i akusticko izolačních, bylo provedeno stanovení níže uvedených klíčových vlastností v souladu s platnými normovými postupy z řady norem pro tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví a z oblasti akustiky.

Provedeny byly následující zkoušky:

- Stanovení tloušťky a lineárních rozměrů vzorků,
- Stanovení objemové hmotnosti,
- Stanovení součinitele tepelné vodivosti,
- Stanovení faktoru difúzního odporu (ekvivalentní difúzní tloušťky),
- Stanovení napětí při 10% deformaci,
- Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky,
- Stanovení dynamické tuhosti,
- Stanovení činitele zvukové pohltivosti,
- Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření,
- Stanovení sorpčních vlastností,
- Stanovení tloušťky vláken.

Jednotlivé zkušební postupy jsou podrobně popsány v textu níže.

2.1 Stanovení tloušťky a lineárních rozměrů vzorků

Na základě požadavků a postupů uvedených v normách ČSN EN 822, ČSN EN 823, ČSN EN 12085 bylo provedeno stanovení tloušťky a lineárních rozměrů zkušebních těles. [38, 39, 40, 41]

Tloušťky jednotlivých zkušebních těles byly určeny pomocí zkušebního zařízení sestávajícího z tuhého rámu, tuhé rovinné základní desky, přitlačné čtvercové desky s přitlakem 50 Pa a číselníkového úchylkoměru. Pomocí úchylkoměru byla měřena vzdálenost základní desky a přitlačné čtvercové desky, mezi nimiž bylo umístěno zkušební těleso.

Lineární rozměry byly stanoveny tak, že zkušební vzorky byly umístěny na pevnou rovinnou plochu a kovovým pravítkem dle výše uvedených normových postupů byly určeny lineární rozměry zkušebních těles.



Obr. 22 Zkušební aparatura pro stanovení tloušťky dle ČSN EN 823

2.2 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno dle ČSN EN 1602, zjištěním hmotnosti materiálu v dané objemové jednotce dle výpočtového vzorce:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (38)$$

m ... hmotnost zkušební vzorku [kg]

V ... objem zkušební tělesa [m^3]

Objem zkušební tělesa byl získán výpočtově ze stanovených lineárních rozměrů a tloušťky zkušební tělesa, součinem délky, šířky a tloušťky zkušební tělesa (stanovení viz výše). [42]

2.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno stacionární metodou desky (metoda měřidla tepelného toku) dle ČSN 72 7012-3, ČSN EN 12667 a ISO 8301. [43, 44, 45] Podstatou této metody je navození ustáleného teplotního stavu ve zkoušeném vzorku. Jelikož při běžných podmínkách není možné dosáhnout stacionárního stavu, je za tento

stav považována změna teploty za daný časový úsek menší než smluvně definovaná teplotní změna dle normy. Pro měření byl použit přístroj Lambda 2300, Holometrix Micromet Inc., USA.

Stanovení součinitele tepelné vodivosti u zkušebních těles bylo provedeno při dané střední teplotě a teplotním spádu 10 K.



Obr. 23 Zkušební zařízení Holometrix Lambda 2300 pro stanovení součinitele tepelné vodivosti

2.4 Stanovení faktoru difúzního odporu (ekvivalentní difúzní tloušťky)

Faktor difúzního odporu byl stanoven dle ČSN EN 12086. [46] Podstatou této zkoušky bylo stanovit hustotu difúzního toku vodní páry na základě měření, kdy byly vzorky kruhového tvaru utěsněny do nerezových misek s nasyceným roztokem a takto byly umístěny do klimatizační komory s regulovatelnou teplotou a vlhkostí. Na základě rozdílných parciálních tlaků uvnitř klimatizační komory a v kovových miskách proniká vodní pára skrz zkušebním tělesem. Zkušební tělesa s miskami se váží až do ustálení jejich hmotnosti.

Stanovení hodnoty faktoru difúzního odporu probíhá dle následujících výpočtových vzorců:

$$G_{1,2} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad g = \frac{G}{A} \quad W = \frac{G}{A * \Delta p} \quad Z = \frac{1}{W} \quad \delta = W * d$$

$$\mu = \frac{\delta_v}{\delta} \quad (39)$$

G ... změna hmotnosti za daný vybraný časový interval [mg]

m_1 ... hmotnost zkušební sestavy v čase t_1 [mg]

m_2 ... hmotnost zkušební sestavy v čase t_2 [mg]

t_1 a t_2 ... následné časy vážení [hod]

g ... hustota difúzního toku [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$]

A ... vystavená plocha zkušebního vzorku [m^2]

W ... difúzní propustnost [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$]

Δp ... rozdíl parciálních tlaků vodní páry [Pa], dle zkušebních podmínek

Z ... difúzní odpor [$\text{m}^2 \cdot \text{hod} \cdot \text{Pa} \cdot \text{mg}^{-1}$]

δ ... součinitel difúzní vodivosti [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hod}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$]

d ... tloušťka zkušebního tělesa [m]

μ ... faktor difúzního odporu pro vodní páru [-]

δ_v ... součinitel difúzní vodivosti pro vodní páru ve vzduchu [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hod}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$]



Obr. 24 Zkušební miska se zkušebním tělesem

Stanovení hodnoty ekvivalentní difúzní tloušťky s_d [-] bylo určeno dle výpočtového vzorce:

$$s_d = \mu * d \quad (40)$$

2.5 Stanovení napětí při 10% deformaci

Zkouška tlakem je popsána v normě ČSN EN 826. [47] Podstatou zkoušky je působení tlakové síly o předepsané rychlosti kolmo na větší rovnoběžné povrchy kvádrového zkušební tělesa, při počátečním zatížení zkušebních těles počátečním tlakem 250 ± 10 Pa, v případě výrazné deformace pouze 50 Pa.

Při této zkoušce bylo zkušební těleso o tloušťce d centricky umístěno mezi pevné rovnoběžné desky zkušební lisu a zatíženo počátečním tlakem 50 Pa, kdy byla odečtena tloušťka d_0 . Poté byl zkušební vzorek postupně stlačován rychlosti $0,1 \text{ d.min}^{-1}$. V případě, že nebylo zjištěno žádné porušení před dosažením 10% deformace, bylo vypočteno napětí v tlaku při 10% deformaci a jeho hodnota uvedena jako napětí v tlaku při 10% deformaci. Pokud však hodnota maximální síly odpovídala deformaci menší jak 10 %, byla označena jako pevnost v tlaku a s udáním příslušné deformace. Při stanovení pevnosti v tlaku byl vždy prováděn záznam pracovního diagramu sloužící k vyhodnocení mechanických vlastností zkušebních těles, včetně určení poměrného stlačení ε_m .

Stanovení napětí při 10% deformaci se určuje dle následujících výpočtových vzorců:

$$\sigma_m = \frac{10^3 \cdot F_m}{A_0} \quad \varepsilon_m = \left(\frac{X_m}{d_0} \right) \cdot 100 \quad \sigma_{10} = \frac{10^3 \cdot F_{10}}{A_0} \quad (41)$$

F_m ... je největší síla [N]

A_0 ... počáteční průřez zkušební vzorku [mm^2]

X_m ... je přetvoření deformace při maximální síle [mm]

d_0 ... počáteční tloušťka zkušební vzorku [mm]

F_{10} ... je síla odpovídající 10% poměrnému stlačení [N]

A_0 ... počáteční průřez zkušební vzorku [mm^2]



Obr. 25 Vzorek při testování napětí při 10% deformaci

2.6 Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky

Pevnost v tahu kolmo k rovině desky byla stanovena dle normy ČSN EN 1607, ve které je pevnost v tahu kolmo k rovině desky definována jako podíl největší zaznamenané tahové síly v kolmém směru k povrchu zkušebního tělesa, a plochy průřezu zkušebního tělesa. [48]

Zkušební těleso bylo pevně umístěno (přilepeno) mezi dvě tuhé desky, které byly upevněny do zkušební lisu. Během zkoušky byla zvyšována tahová síla se stálou rychlostí posuvu až do porušení, byla stanovena maximální síla a způsob porušení materiálu nebo povrchové vrstvy. Pokud došlo k porušení zcela nebo částečně v přilepení zkušební vzorku k tuhým deskám, blokům, tyto vzorky byly ze zkoušky vyloučeny. Maximální tahová síla byla podkladem pro výpočet samotné pevnosti v tahu, jejíž vztah je uveden níže.

Pevnost v tahu kolmo k povrchu σ_{mt} v kPa se určí dle vztahu:

$$\sigma_{mt} = \frac{F_m}{A} = \frac{F_m}{l \cdot b} \quad (42)$$

F_m ... největší tahová síla [kN]

A ... průřezová plocha zkušební vzorku [m²]

l, b ... délka, šířka zkušební vzorku [m]



Obr. 26 Vzorek upevněný v lisu před zkouškou pevnosti v tahu kolmo k rovině desky

2.7 Stanovení dynamické tuhosti

Dynamická tuhost byla stanovena rezonanční metodou dle ČSN ISO 9052-1. [49] Podstatou stanovení dynamické tuhosti je zjištění rezonančního kmitočtu soustavy f_r ,

měřený vzorek – zatěžovací těleso, kmitající ve svislém směru. Rezonanční kmitočet se stanoví pomocí sinusového signálu o konstantní amplitudě, který je generovaný soustavou, frekvenční generátor – elektromagnet.

Zkušební těleso bylo umístěno mezi dvě vodorovné plochy, základnu a zatěžovací těleso, kterým byla ocelová deska o rozměrech $(200 \pm 3) \text{ mm} \times (200 \pm 3) \text{ mm}$. Buzení se uskutečňovalo pomocí elektromagnetu na zatěžovací desce a permanentního magnetu, umístěného nad elektromagnetem. Postupným zvyšováním frekvence na budícím generátoru byla hledána rezonanční frekvence, při které se projevila na analyzátoru maximální výchylka.

Vztahy pro určení dynamické tuhosti jsou následující:

Při vyhodnocení experimentu je nejprve nutné vypočítat hodnotu zdánlivé dynamické tuhosti na jednotku plochy s'_t , která je dána vztahem:

$$s'_t = 4 \cdot \pi^2 \cdot m'_t \cdot f_r^2 \quad (43)$$

m'_t ... celková plošná hmotnost zatěžovacího tělesa při zkoušce [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$]

f_r ... extrapolovaná hodnota rezonančního kmitočtu [Hz]

Dynamická tuhost pružného materiálu je závislá na hodnotě stejnosměrného odporu proti proudění v příčném směru dle ISO 9053. [50]

- a) Pro materiál s vysokým odporem proti proudění ($r_{ss} > 100 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$) je dynamická tuhost zkoušeného materiálu rovna hodnotě dynamické tuhosti zdánlivé:

$$s' = s'_t \quad (44)$$

- b) Pro materiál se středním odporem proti proudění je hodnota dynamické tuhosti s' dána vztahem:

$$s' = s'_t + s'_a \quad (45)$$

s'_a ... dynamická tuhost vzduchu [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]

s'_t ... dynamická tuhost vzorku zdánlivá [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]

Dynamická tuhost vzduchu ve struktuře vzorku na jednotku plochy s'_a se vypočítá ze vztahu:

$$s'_a = \frac{E_{air}}{d \cdot \varepsilon} \quad (46)$$

d ... tloušťka vzorku [m]

E_{air} ... dynamický modul pružnosti vzduchu [Pa]

ε ... pórovitost vzorku [-]

- c) Pro materiály s nízkým odporem proti proudění ($r_{ss} < 10 \text{ kPa.s.m}^{-2}$) a je-li současně dynamická tuhost vzduchu ve struktuře materiálu stanovena dle vztahu níže, zanedbatelná ve vztahu k dynamické tuhosti zkušebního vzorku, platí:

$$s'_a = \frac{E_{air}}{d \cdot \varepsilon} \quad (47)$$

Vztah lze pro $E_{air} = 0,1 \text{ MPa}$ a $\varepsilon = 0,9$ zjednodušit:

$$s'_a = \frac{111000}{d} \quad (48)$$

d ... tloušťka vzorku [m]

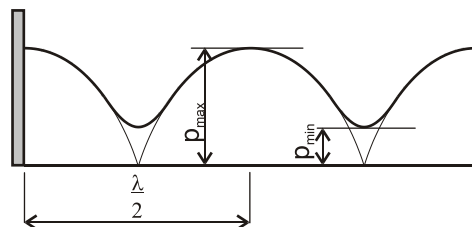
$$s' = s'_t \quad (49)$$



Obr. 27 Zkušební aparatura pro zkoušku dynamické tuhosti

2.8 Stanovení činitele zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti u zkušebních těles byl stanoven dle ČSN ISO 10534-1. [51] Metoda spočívá ve vytvoření stojatého vlnění v trubici, na jejímž konci je vzorek. Z naměřeného maxima a minima akustického tlaku stojaté vlny se pak numericky vypočte činitel zvukové pohltivosti.



Obr. 28 Interference přímé a odražené stojaté akustické vlny v interferometru

Pro vlnění v interferenční trubici platí:

$$\begin{aligned} p_{\max} &= p_1 + p_2 \\ p_{\min} &= p_1 - p_2 \end{aligned} \quad (50)$$

p_1 ... akustický tlak přímé vlny [Pa]

p_2 ... akustický tlak odražené vlny [Pa]

Pro stanovení hodnoty činitele odrazu zvukové vlny r [-] platí vztah:

$$r = \frac{p_2}{p_1} \quad (51)$$

Hodnota činitele zvukové pohltivosti α [-] se stanoví jako:

$$\alpha = 1 - r^2 = 1 - \frac{p_2^2}{p_1^2} \quad (52)$$

Pokud poměr maxima a minima akustického tlaku označíme s [-]:

$$s = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{p_1 + p_2}{p_1 - p_2} \quad (53)$$

odtud vyplývá vztah:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{s-1}{s+1} \right)^2 = \frac{4s}{(s+1)^2} \quad (54)$$

Dle ČSN ISO 10534 je možné při měření činitele zvukové pohltivosti vycházet z akustického tlaku v logaritmické závislosti, tedy z hladiny akustického tlaku. Měřením

v akustickém interferometru se stanoví hodnota maximální hladiny akustického tlaku L_{max} [dB] a minima L_{min} [dB] a rozdíl hladin akustických tlaků ΔL [dB].

$$\Delta L = L_{max} - L_{min} \quad (55)$$

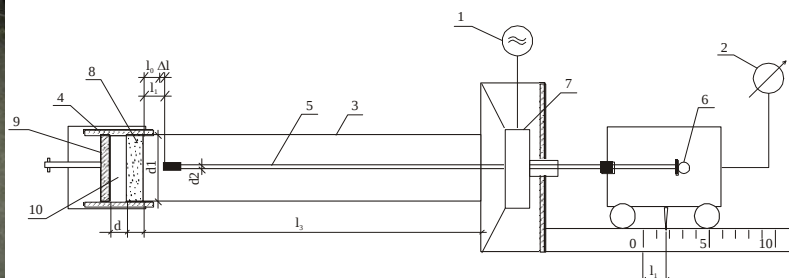
Poměr stojaté vlny s potom nabývá tvaru:

$$s = 10^{\frac{\Delta L}{20}} \quad (56)$$

Hodnota činitele zvukové pohltivosti se vyjádří dle vztahu:

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\frac{\Delta L}{20}}}{\left(10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1\right)^2} \quad (57)$$

Vzorek zkušební tělesa kruhového tvaru byl vložen do držáku Kuntovy trubice bez deformací tak, aby rubová strana přiléhala na píst (dno) držáku a lícová strana souhlasila s rovinou konce trubice. Po zapnutí zkušební aparatury byl na generátoru nastaven požadovaný kmitočet. Posuny akustickou sondou do vzorku se stanoví akustický tlak v nejbližší kmitně a uzlu stojaté vlny. Nejdříve byla nalezena kmitna akustického tlaku a při odpovídajícím zesílení bylo na analyzátoru nastaveno výstupní napětí U_{max} na maximální možnou výchylku voltmetru. Poté byl pohybem sondy směrem ke vzorku nalezen uzel akustického tlaku. V uzlu bylo odečteno napětí na voltmetru U_{min} . V případě, že blíže ke vzorku byla kmitna, byla sonda posunována v opačném směru. Měření bylo prováděno na kmitočtech třetinooktávové řady v rozsahu 100–3150 Hz.



Obr. 29 Kuntova trubice: (1 - generátor; 2 - analyzátor; 3 - trubice; 4 – držák vzorku; 5 - sonda; 6 - mikrofon; 7 - reproduktor; 8 – vzorek; 9 – píst (dno) držáku; 10 – vzduchový polštář) [37]

Z naměřených hodnot činitele zvukové pohltivosti byla následně stanovena hodnota váženého činitele zvukové pohltivosti α_w [-], což je kmitočtově nezávislá, jednočíselná hodnota, rovná hodnotě směrné křivky na 500 Hz po jejím posuvu. Postup jeho stanovení je uveden v ČSN EN ISO 11654. Tato veličina byla použita pro vzájemné zhodnocení akustických vlastností jednotlivých zkušebních vzorků. [52]

2.9 Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření

Krátkodobá nasákavost při částečném ponoření byla stanovena dle normy ČSN EN 1609. [53] Podstatou zkoušky je stanovení hmotnostní změny zkušební vzorku umístěného po dobu 24 hodin spodní stranou ve vodě. Přebytečná neabsorbovaná voda, která ulpí na povrchu vzorku, se odstraňuje pomocí 2 normově popsanych metod, buď metodou odkapání či metodou odečtení počátečního navlhčení. Volba metody závisí na počátečním navlhčení zkušební vzorku.

Zkušební vzorky čtvercového příčného řezu o straně 200 ± 1 mm byly testovány dle metody A, tj. metoda odkapání přebytečné vody, vzhledem k charakteru pórovitosti přírodních materiálů a s tím úzce související nasákavosti vzorků. Nejprve byla určena počáteční hmotnost zkušební tělesa m_0 . Poté bylo zkušební těleso vloženo do prázdné nádoby a zatíženo tak, aby po doplnění vodou zůstalo částečně ponořeno. Spodní část tělesa musela zůstat po celou dobu zkoušky ponořena 10 ± 2 mm pod hladinou vody. Po 24 h bylo zkušební těleso vyjmuto, umístěno vertikálně na síť se sklonem 45° a ponecháno po dobu $10 \pm 0,5$ min k okapání. Na konci bylo zkušební těleso zváženo a byla tak stanovena jeho hmotnost m_{24} .

Krátkodobá nasákavost vody při částečném ponoření W_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$] se určuje dle výpočtového vzorce:

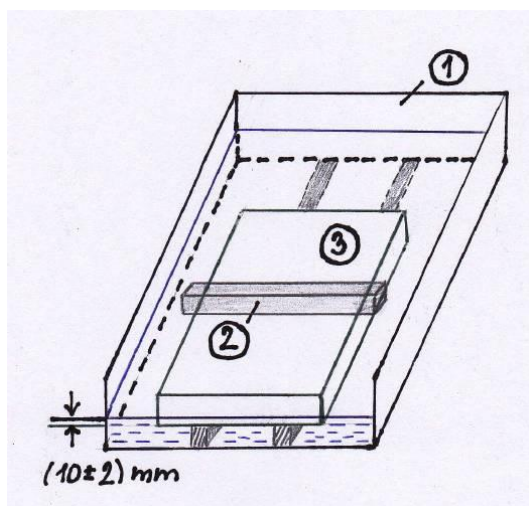
$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad (58)$$

W_p ... krátkodobá nasákavost vody při částečném ponoření [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]

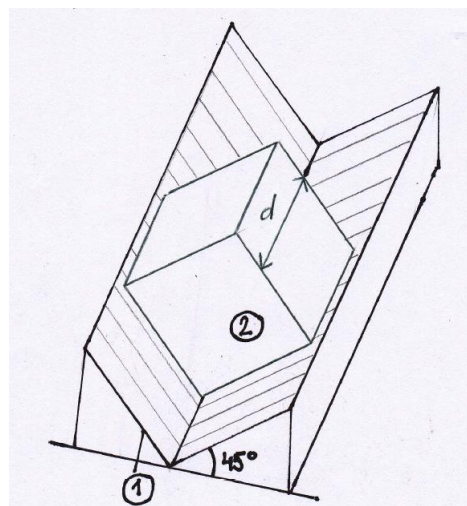
m_0 ... je počáteční hmotnost zkušební vzorku určená dle metody A [kg]

m_{24} ... hmotnost zkušební vzorku po částečném ponoření po dobu 24 h [kg]

A_p ... plocha spodního povrchu zkušební vzorku [m^2]



Obr. 30 Zařízení pro částečné ponoření (1- vodní nádržka, 2- zatížení pro udržení polohy zkušební vzorku, 3- zkušební vzorek) [53]



Obr. 31 Metoda A – Odkapání přebytečné vody (1- síť z nerezové oceli či perforovaný nerezový plech, 2- zkušební vzorek) [53]

2.10 Stanovení sorpčních vlastností

Stanovení sorpčních vlastností vyvinutých izolačních materiálů bylo provedeno dle ČSN EN ISO 12571, metodou užití klimatizační komory za konstantní teploty prostředí $23 \pm 0,5$ °C, při relativních vlhkostech prostředí v rozmezí od 0 % do 80 %. Zkušební tělesa byla umístěna při výše uvedené teplotě do klimatizované komory při definované relativní vlhkosti a poté byla sledována jejich hmotnost až do ustálení. Tato hodnota byla zaznamenána a přiřazena k dané relativní vlhkosti prostředí. Na základě zjištěných dat byly pro jednotlivé zkušební sady sestaveny sorpční charakteristiky, stěžejní pro výpočtové simulace. [54]

Vlhkost $u_{23,x}$ [hm. %] se určuje dle výpočtového vzorce:

$$u_{23,x} = \frac{m_{23,x} - m_{23,0}}{m_{23,0}} \quad (59)$$

$u_{23,x}$... vlhkost zkušební vzorku při teplotě 23 °C a dané relativní vlhkosti x [hm. %]

$m_{23,0}$... hmotnost zkušební vzorku ve vysušeném stavu při teplotě 23 °C [kg]

$m_{23,x}$... hmotnost zkušební vzorku při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti x [kg]

2.11 Stanovení tloušťky vláken

Tloušťka vláken byla určena pomocí mikroskopu s příslušenstvím okulárového mikrometru (dělená stupnice s konstantní vzdáleností dílků vyrytá v optické soustavě okuláru), který sloužil k odečtení rozměru pozorovaného objektu v mikroskopu. Vzdálenost dílků na pozorovaném objektu závisí na nastaveném zvětšení objektu mikroskopu. Aby bylo tedy možné odečítat skutečné rozměry pozorovaného objektu v zorném poli mikroskopu při daném zvětšení objektivu, bylo nezbytné provést kalibrační srovnání s objektem, u něhož byly známy skutečné rozměry. K tomuto srovnání bylo použito cejchovní podložní sklíčko s vyrytou úsečkou o přesné délce 1 mm, která byla dělena na 100 dílků.



Obr. 32 Mikroskop pro určení tloušťky vláken

2.12 Výpočtové simulace

V současné době je používána pro stanovení vlhkostní bilance ve stavebních konstrukcích nejčastěji Glaserova metoda z roku 1958, která je popsána v normách ČSN 730540-4 a ČSN EN ISO 13788. Tato metoda při výpočtech uvažuje difúzi vodní páry ve stacionárním stavu za zjednodušených okrajových podmínek, nezohledňuje však transport vlhkosti v kapilárním systému struktury materiálů ani sorpční vlastnosti materiálu. Glaserova metoda nedokáže postihnout krátkodobé zatížení vlhkostí stavební konstrukce, např. déšť, sluneční záření, povětrnostní vlivy. Proto lze tedy konstatovat, že tato metoda určuje přibližné, tepelně vlhkostní chování stavební konstrukce, které ale neodpovídá

reálnému teplotnímu a vlhkostnímu transportu v konstrukci, která je vystavená reálným klimatickým podmínkám, charakteristickým pro danou oblast. [55, 56]

Obsahem normy ČSN EN ISO 13788 je několik jednoduchých výpočtových metod, avšak nevylučuje se možnost využití jiných, příznivějších výpočtových metod pro daný, řešený konstrukční detail. Jednou z možností, která se nabízí, je využití Kieβlových modelů, které zohledňují kapilární a sorpční vlastnosti stavebních materiálů. Tyto modely jsou využívány ve výpočtových softwarech vyvinutých a používaných v zahraničí (např. Delphin, WUFI), zejména v Německu (TU Dresden, Fraunhofer IBP, TU Berlin) a v Rakousku (TU Wien). Pro řešení disertační práce byl zvolen výpočtový program WUFI[®] 2D, vyvinutý v německém institutu Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), umožňující reálný výpočet dynamického jednorozměrného či dvourozměrného šíření tepla a vlhkosti ve vícevrstvých stavebních konstrukcích vystavených podmínkám prostředí. [55, 56]

Výpočtové simulace vychází zejména z nejnovějších poznatků výzkumu transportu tepla, vodní páry, kapalně vlhkosti ve stavebních materiálech a byl verifikován širokou řadou srovnávacích měření in situ i v laboratořích IBP v Německu. Unikátní použití diferenciálních rovnic v [57, 58, 59] umožňuje na rozdíl od zastaralých výpočetních postupů zahrnout při modelování šíření tepla a vlhkosti konstrukcí následující fyzikální jevy: orientaci stavební konstrukce vůči světovým stranám, sklon konstrukce vůči horizontální rovině, vliv barvy vnějšího povrchu stavební konstrukce na šíření tepla, akumulaci tepla v konstrukci, závislost součinitele tepelné vodivosti materiálu na množství vlhkosti v materiálu, akumulaci vlhkosti v konstrukci, závislost faktoru difúzního odporu na množství vlhkosti v materiálu, šíření kapalně vlhkosti v porézních materiálech, absorpci hnaného deště na vnější povrch stavební konstrukce. Díky těmto faktorům je umožněno získat při simulacích reálnější, tepelně vlhkostní obraz o chování stavební konstrukce vystavené vnějším i vnitřním vlivům. Software WUFI[®] je tedy vhodný například pro stanovení tepelně vlhkostního chování střešních a obvodových plášťů při neočekávaném použití či při použití v odlišných klimatických podmínkách, pro stanovení doby pro vysušení zdiva, pro zjištění možností degradace konstrukce vlivem kondenzace vlhkosti či plísní, dále pak zjištění vlivu deště a větru na obvodovou konstrukci apod. Je to i vhodný nástroj pro vývoj nových, stavebních materiálů a konstrukcí. [55, 56]

Pro modelování dvourozměrného šíření tepla byl dále zvolen také program Therm, který byl vyvinut v národní laboratoři Lawrence Berkeley v Kalifornii. Výpočtové simulace šíření tepla ve stavebních konstrukcích jsou založeny na metodě konečných prvků.

3. Postup prací v jednotlivých etapách

3.1 Etapa I: Zmapování surovinové základny

Vzhledem k tomu, že práce byla zaměřena na vývoj environmentálně úsporných izolačních materiálů z alternativních surovinových zdrojů, jejichž vlastnosti budou srovnatelné s běžně používanými izolačními materiály na stavebním trhu, byla provedena analýza možného využití přírodních vláken (ze snadno obnovitelných surovinových zdrojů) pro výrobu zkušebních těles. Nejprve byl proveden průzkum v oblasti již využívaných přírodních zdrojů na základě dostupných literárních podkladů, dále pak byly vyhledány další možné alternativní surovinové zdroje, kde stěžejní podmínkou byla navíc snadná dostupnost pro vědecké účely. Poté byla provedena klasifikace jednotlivých vláknitých surovinových zdrojů a určena jejich kvalita pro využití ve stavebním průmyslu. Tato část etapy byla dále zaměřena na provedení základních měření u získaných vláknitých surovinových zdrojů, konkrétně se jednalo o stanovení tloušťky vláken a součinitele tepelné vodivosti. Na základě zjištěných vlastností pak byl proveden výběr vhodných vstupních surovin, mezi základní kritéria patřily nejenom užité vlastnosti, ale také ekonomické aspekty jednotlivých vstupních složek.

Jako základní surovinový zdroj pro získání přírodních izolačních materiálů byla zvolena vlákna technického konopí, která byla porovnávána s dalšími vybranými přírodními vlákny, jednalo se o vlákna ze lnu setého, juty a odpadní vlákna ovčí vlny. K těmto přírodním vláknům byla zvolena klasická pojiva, dnes nejčastěji používaná polyesterová bikomponentní vlákna.

3.2 Etapa II: Návrh receptur, výroba zkušebních těles

Na základě provedeného výběru vhodných vstupních surovinových komponent pro vývoj a výrobu přírodních izolačních materiálů v rámci první etapy byl proveden návrh skladby jednotlivých zkušebních těles. Při samotném návrhu možných receptur byl brán zřetel na předpokládanou oblast využití získaných přírodních izolačních produktů.

Jednalo se o vývoj izolačních materiálů, které by mohly být používány v následujících oblastech jako:

- Izolace lehkých přiček;

Cílem vývoje materiálů uplatnitelných jako izolace lehkých příček bylo připravit zkušební sady s objemovou hmotností 25–60 kg.m⁻³, nízkým součinitelem tepelné vodivosti ve vysušeném stavu $\lambda \leq 0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. U svislých stavebních konstrukcí příček byla rozhodujícím akusticko izolačním parametrem hodnota činitele zvukové pohltivosti, dále v případě vnitřních dělicích příček, díky absenci parotěsné vrstvy, pozitivní, hygroskopické vlastnosti z pohledu vlhkostní akumulace a stabilizace vlhkostního mikroklimatu uvnitř staveb.

- Izolace šikmých střech;

Cílem vývoje materiálů uplatnitelných jako izolace šikmých střech bylo připravit zkušební receptury s objemovou hmotností 25–40 kg.m⁻³, součinitelem tepelné vodivosti ve vysušeném stavu $\lambda \leq 0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a nízkým difúzním odporem. Tyto izolace by bylo možné umístit především mezi krokve či kombinovaně mezi a pod krokve. Nejvhodnější aplikace těchto izolací by byla v případě kombinace skládané střešní krytiny a větrané vzduchové dutiny, která zajistí odvod difundující vodní páry do vnějšího prostředí.

- Izolace lehkých obvodových plášťů;

Cílem vývoje materiálů uplatnitelných jako izolace lehkých obvodových plášťů bylo připravit zkušební receptury s objemovou hmotností 35–60 kg.m⁻³, s nízkým součinitelem tepelné vodivosti ve vysušeném stavu $\lambda \leq 0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Tyto izolace by měly být vhodné pro aplikace sendvičových konstrukcí, zejména u dřevostaveb. Izolační desky by byly vkládány do nosného roštu a oboustranně překryty konstrukčními deskami, např. dřevovláknitými či dřevocementovými deskami. Tyto desky by měly vykazovat dobré tepelně izolační a akustické vlastnosti a dále také dobré tepelně akumulační vlastnosti pro zajištění celkové tepelné pohody v interiéru stavební konstrukce.

- Izolace podlahových konstrukcí;

Cílem vývoje materiálů, které by našly uplatnění při izolacích podlahových konstrukcí, bylo připravit zkušební receptury s vyšší objemovou hmotností, v intervalu 80–120 kg.m⁻³, s nízkým součinitelem tepelné vodivosti ve vysušeném stavu $\lambda \leq 0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Rozhodujícím parametrem pro tyto materiály je kročejová neprůzvučnost. Je

nutné vyvinout pružný materiál, který utlumí dynamické kmity. Charakteristickou veličinou, která popisuje tuto vlastnost, je dynamická tuhost s požadavkem max. 20 MPa.m^{-1} , tedy dynamicky měkké materiály. Dále důležitým faktorem je nízký součinitel tepelné vodivosti, obzvláště v případech, kdy materiál plní v konstrukci také funkci tepelně izolační.

V následující tabulce je uveden souhrn požadovaných vlastností na vyvíjené izolační materiály dle jejich umístění a funkce ve stavební konstrukci.

Tab. 10 Požadavky na vyvíjené materiály dle jejich aplikace v konstrukci

Vlastnost/ Aplikace	Příčky	Střechy	Lehké obvodové pláště	Podlahy
$\rho [\text{kg.m}^{-3}]$	25–60	25–40	35–60	80–120
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	$\lambda \leq 0,045$	$\lambda \leq 0,045$	$\lambda \leq 0,045$	$\lambda \leq 0,045$
$\mu [-]$	< 3	< 3	< 3	< 5
$\sigma_{mt} [\text{kPa}]$	≥ 20	≥ 5	≥ 20	-
$\sigma_{10} [\text{kPa}]$	-	≥ 15	-	≥ 30
$s' [\text{MPa.m}^{-1}]$	-	-	-	< 20
$\alpha_w [-]$	$\geq 0,80$	$\geq 0,70$	$\geq 0,70$	$\geq 0,70$

Záměrem této etapy bylo optimalizovat poměr přírodních vláken, pazdeří a pojiva pro dosažení optimálních tepelně izolačních vlastností, popřípadě vlastností akustických.

Dále se jednalo o návrh optimálních objemových hmotností z pohledu předpokládaného uplatnění vyvíjených izolantů (viz výše). Hodnoty objemové hmotnosti byly zajištěny při výrobním procesu, který umožňuje volbu objemové hmotnosti na základě vyvíjeného tlaku při zpracování vstupních surovin do podoby izolačních rohoží. Z přírodních vláken byla zvolena na základě výsledků Etapy I zejména vlákna technického konopí, jež byla z pohledu environmentálního, ekonomického a možné dostupnosti vybrána pro následný vývoj a výzkum jako nejvhodnější. Pouze pro porovnání byly navrženy 2 receptury s jutovými a lněnými vlákny. Jako pojiva byla použita polyesterová bikomponentní vlákna, která jsou charakteristická jejich skladbou. Jedná se o vlákna tvořená 2 složkami, jádro tvoří vrstva vysokoteplotního polyesteru, který odolává teplotám $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$, obal vlákna je tvořen nízkoteplotním polyesterem, který díky této vlastnosti dokáže při výrobě za zvýšené teploty spojit jednotlivá přírodní vlákna. Jako přísada proti hoření byla zvolena soda Na_2CO_3 .

V následující tabulce je uveden přehled hmotnostního zastoupení jednotlivých vstupních komponent vyvíjených izolací v procentech bez ohledu na jejich finální objemovou hmotnost, přehled zkušebních sad je uveden v textu dále, v tabulce 18.

Tab. 11 *Přehled zastoupení jednotlivých vstupních složek pro výrobu izolačních materiálů*

Hmotnostní procentuální podíl jednotlivých vstupních komponent [%]				
Přírodní vlákna			Pojivová vlákna	Pazdeří
Juta	Len	Konopí		
68	-	-	20	12
-	68	-	20	12
-	-	48	20	32
-	-	68	20	12
-	-	64	20	16
-	-	49	10	41

V souladu s výsledky jednotlivých, výše uvedených etap, tj. výběru vhodných surovin, pojiv a návrh kompozice zkušebních těles, proběhla jejich výroba na lince společnosti CANABEST s.r.o. v Břeclavi. Jednotlivé zkušební vzorky deskového tvaru byly vyrobeny formou omezené prototypové výroby. Z těchto desek byla připravena zkušební tělesa definovaných rozměrů pro účely provedení následných laboratorních měření v následující Etapě III.

3.3 Etapa III: Laboratorní měření

Vyrobené izolační desky o rozměrech 1200 x 600 mm byly nařezány na požadované rozměry.

Na připravených zkušebních tělesech normových rozměrů byla v níže uvedeném sledu provedena následující laboratorní měření charakteristických vlastností izolačních materiálů, zejména stanovení tepelně izolačních, akustických, fyzikálních a mechanických vlastností, dle normativní legislativy:

- stanovení základních fyzikálních vlastností (stanovení tloušťky a lineárních rozměrů, stanovení objemové hmotnosti),
- stanovení tepelně technických vlastností (stanovení součinitele tepelné vodivosti),
- stanovení akustických vlastností (stanovení činitele zvukové pohltivosti, stanovení dynamické tuhosti),
- stanovení mechanických vlastností (stanovení napětí při 10% deformaci, stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky),

- stanovení dalších vlastností (stanovení faktoru difúzního odporu, ekvivalentní difúzní tloušťky a krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření).

3.4 Etapa IV: Stanovení sorpčních charakteristik a simulace chování vyvinutých materiálů ve stavebních konstrukcích

V rámci čtvrté etapy bylo cílem stanovit sorpční vlastnosti vyvinutých izolačních materiálů. Vzhledem k tomu, že se jedná o přírodní materiály s otevřenou pórovitostí, bylo nezbytně nutné provést také studium chování vyvíjených materiálů v závislosti na vlhkosti a teplotě prostředí. Je obecně známo, že právě tyto podmínky (vlhkost, teplota) mají významný vliv na charakteristické vlastnosti izolačních materiálů.

Na zkušebních tělesech byla provedena následující stanovení:

- závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě,
- závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním obsahu,
- závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti vzduchu
- závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti,
- stanovení sorpčních vlastností.

Získaná data byla podkladem pro provedení simulací chování vyvíjených materiálů v reálných konstrukcích ve výpočtovém programu WUFI®2D, který umožňuje realistický výpočet dynamického chování tepla a vlhkosti ve vícevrstvých stavebních konstrukcích vystavených vnějším přírodním podmínkám, a dále v programu Therm, pro vyobrazení šíření tepla ve sledovaných konstrukčních detailech s využitím vyvinutých materiálů.

3.5 Etapa V: Závěrečné vyhodnocení a uplatnění vyvinutých materiálů v praxi

Cílem závěrečné etapy bylo shrnout veškerá data získaná během vývoje a studia přírodních izolačních materiálů za účelem přímého porovnání s klasickými, dnes běžně užívanými, izolačními materiály, jakými jsou například minerální vlna, EPS, PUR apod.

Navíc studium tepelně vlhkostních charakteristik vyvinutých izolačních materiálů bylo podkladem pro návrh možných aplikací a využití v novodobých stavebních konstrukcích na stavebním trhu v rámci České republiky, případně dalších zemí EU, což by bylo přínosem pro vědní obor a dnešní moderní společnost.

4. Výsledky experimentálních prací v rámci jednotlivých etap

4.1 Vyhodnocení etapy I „Zmapování surovinové základny“ a diskuze výsledků

Nejprve byla provedena rešerše z dostupných odborných příspěvků, které byly uveřejněny v odborných zahraničních databázích (Thomson Reuters, Scopus). Příspěvky byly podkladem pro vytvoření přehledu možných surovinových zdrojů pro vývoj izolačních materiálů z environmentálních surovinových zdrojů. Jednalo se o následující odborné články:

- Natural Building Materials in Mainstream Construction: Lessons from the U. K. (MacDougall, Colin) [60]
- Evaluation of Structure Influence on Thermal Conductivity of Thermal Insulating Materials from Renewable Resources. (Vejeliene, Jolanta; Gailius, Albinas; Vejelis, Sigitas; et al.) [61]
- Arable crop materials for insulation in buildings (Murphy, D. P. L.; Behring, H.) [62]
- Natural fibre composites: Where can flax compete with glass? (Brouwer, W. D.) [63]
- Development of Green Insulation Boards From Kenaf Fibres Part 2: Characterizations of Thermal and Water Absorption. Fracture and strength of solids VII, Part 1 and 2, Book Series: Key Engineering Materials. (Ibraheem, S. A.; Ali, Aidy; Khalina, A.) [64]
- Development of Green Insulation Boards From Kenaf Fibres Part 1: Development and characterizations of Mechanical Properties. Fracture and strength of solids VII, Part 1 and 2, Book Series: Key Engineering Materials. (Ibraheem, S. A.; Ali, Aidy; Khalina, A.) [65]
- Coir Fiber for Heat Insulation. (Mukhopadhyay, S.; Annamalai, D.; Srikanta, R.) [66]
- Development of Green Insulation Boards from Kenaf Fibres and Polyurethane. (Ibraheem, S. A.; Ali, Aidy; Khalina, A.) [67]
- The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. (Ashour, Taha; Wieland, Hansjoerg; Georg, Heiko; et al.) [68]

-
- Multi-Scale Structures of Natural Fibres and Their Applications in Making Automobile Parts. (Li, Y.; Luo, Y.; Han, S.) [69]
 - Fibre boards and composites from wet preserved hemp. (Pecenka, Ralf; Fuerll, Christian; Idler, Christine; et al.) [70]
 - Structural Analysis of Fibrous Thermo Insulation Materials. (Janulaitis, T.; Paulauskas, L.) [71]
 - What Characteristics Define Ecological Building Materials. (Bica, Smaranda; Rosiu, Liliana; Radoslav, Radu) [72]
 - Straw as a Building Material. (Glasnovic, Zvonimir; Horvat, Jasna; Omahic, Dino) [73]
 - Measurement of sound absorption properties of industrial organic waste material. (Yilmaz, Oe.; Ersoy, S.) [74]
 - Experimental analysis of usage of thermo insulation materials from technological refuse. (Paulauskas, L.; Janulaitis, T.) [75]
 - Thermal characterisation of bio-based building materials. (Costanzo, S.; Cusumano, A.; Giaconia, C.; et al.) [76]
 - Thermotechnical and technological aspects of insulation and building materials from renewable raw materials. (Wieland, Hansjoerg; Moeller, Frank; Bockisch, Franz-Josef) [77]
 - Engineered bamboo as a building material. Modern bamboo structures. (Paudel, S. K.) [78]

Na základě zmapování dostupné materiálové základny byly vybrány následující skupiny materiálů:

- *Vlákna pocházející ze zemědělství*

V daném případě byla vytipována konopná, lněná a jutová vlákna. Technické konopí a len lze v daném případě označit za lokálně dostupné a snadno obnovitelné surovinové zdroje v zemích EU. Tato vlákna byla zajištěna firmou Canabest, s.r.o. Produkce těchto plodin je závislá na okamžité poptávce na trhu a je možné ji též v rámci jednoho roku velice účinně regulovat. Pro srovnání bylo do výzkumu zařazeno i vlákno jutové, které se do České republiky dováží z Asie. Význam jutového vlákna spočívá především v jeho garantované kvalitě a dlouhodobé dostupnosti na světovém trhu. Dovážené jutové

vlákno představuje alternativu za lokální konopné nebo lněné vlákno v případě poklesu produkce na trhu v České republice. V následující tabulce jsou uvedeny vybrané fyzikální vlastnosti výše jmenovaných vláken v rámci výzkumu přírodních vláken v Německu [10].

Tab. 12 Přehled fyzikálních vlastností přírodních vláken [10]

<i>Druh vláken</i>	<i>Měrná hmotnost [g.cm⁻³]</i>	<i>Navlhavost při 65% rel. vlhkosti [%]</i>	<i>Houževnatost [Pa]</i>	<i>Tuhost [kN.mm⁻³]</i>	<i>Průtažnost [%]</i>
Konopná vlákna	1,50	8,0	550–900	70	1,6
Lněná vlákna	1,54	7,0	800–1500	60–80	1,2–1,6
Jutová vlákna	1,50	12,5	400–800	10–30	1,8

– *Materiály pocházející z chovu dobytka*

V daném případě byla zvolena odpadní vlákna z ovčí vlny z Nejdecké česárny vlny a.s. Ovčí vlna je jako tepelně izolační materiál využívána již velmi dlouhou dobu. Jako izolační materiál byla ovčí vlna dříve typická pro horské oblasti, kde se většinou provozuje chov ovcí. V současné době představuje ovčí vlna velmi ceněnou surovinu, která nachází své hlavní uplatnění v textilním průmyslu. Masovému využití ve stavebnictví brání především její poměrně vysoká cena. Při zpracování vlny na vlněné vlákno a při následné výrobě tkanin vzniká odpadní vlákno, které je vzhledem ke své malé délce jen velmi špatně dále využitelné v textilním průmyslu.

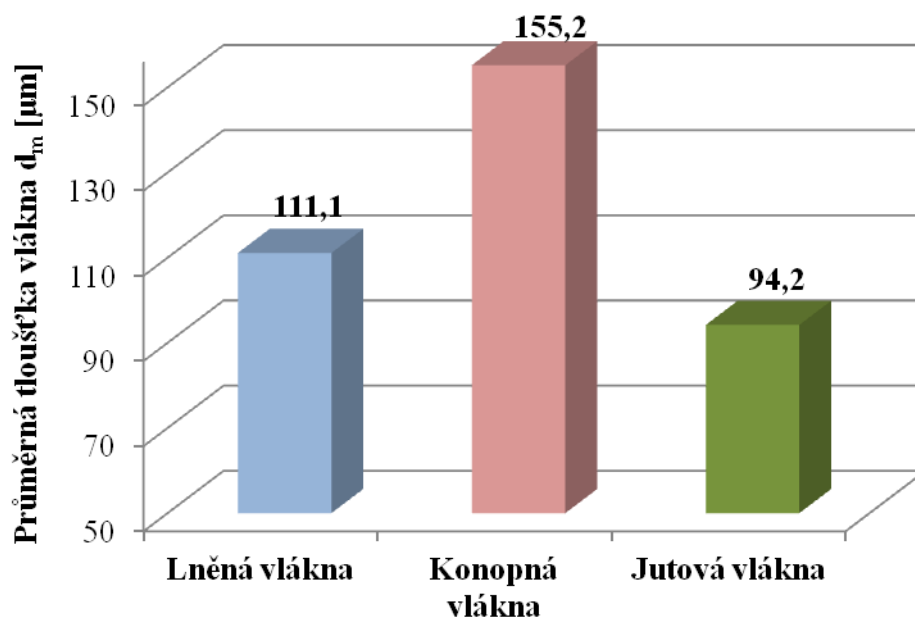
Výše uvedené skupiny přírodních surovinových zdrojů, zejména konopná vlákna, lněná vlákna a vlákna z ovčí vlny, byly v minulosti hojně využívány ve stavebnictví, zejména pro izolaci staveb, avšak vzhledem k modernizaci a vývoji moderních kompozitních a plastických hmot byly postupně jimi vytlačeny a nahrazeny. Proto byly zvoleny právě tyto „historické“ materiály, které je vhodné dále vyvíjet, zejména z důvodu jejich snadné dostupnosti, recyklovatelnosti a ekologičnosti.

4.1.1 Materiály pocházející ze zemědělství- konopí, len, juta

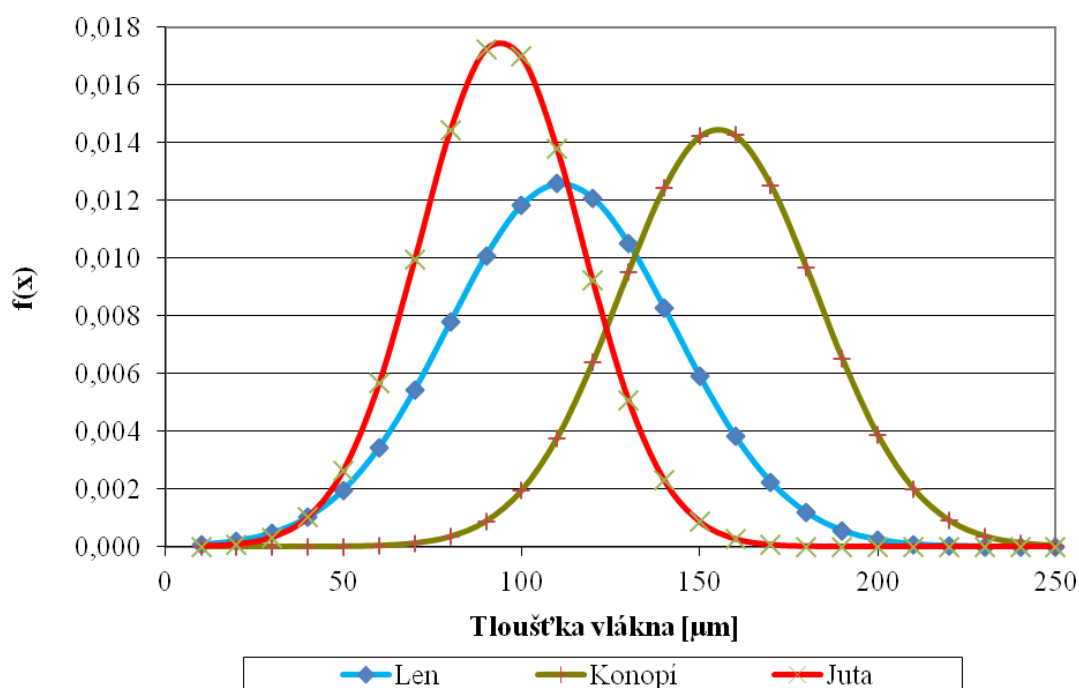
Na vzorcích lněného, konopného a jutového vlákna byl proveden mikroskopický rozbor, přičemž na reprezentativním vzorku 30 vláken byla stanovena průměrná tloušťka a distribuce tloušťky vláken. Na každém vlákně byla provedena tři měření, výsledky jsou statisticky vyhodnoceny, viz níže obr. 33, 34 a 35. V daných případech bylo vypočteno

normální rozdělení tloušťky vláken u základního souboru naměřených hodnot a byla výpočtově stanovena:

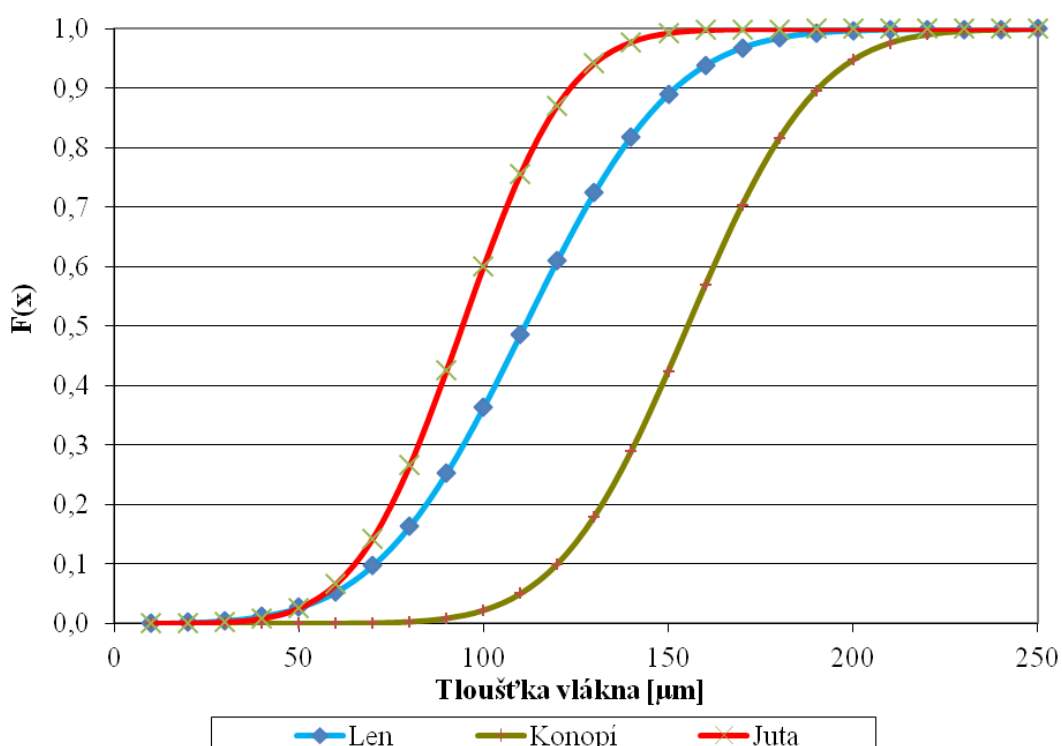
- průměrná tloušťka vlákna,
- hustota pravděpodobnosti pro tloušťku vlákna (normální rozdělení),
- distribuční funkce pro tloušťku vlákna (normální rozdělení).



Obr. 33 Grafický přehled průměrných hodnot tloušťek přírodních vláken ze zemědělství v μm



Obr. 34 Hustota pravděpodobnosti $f(d_x)$ tloušťek vláken u lnu, konopí a juty



Obr. 35 Distribuční funkce $F(d_x)$ tloušťek vláken u lnu, konopí a juty

Dále bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti na vrstvě vláken uložených za laboratorních podmínek (teplota 23 °C, relativní vlhkosti 50 %), která byla zhutněna na objemovou hmotnost 25 kg.m⁻³, přičemž převažující orientace vláken byla kolmo na směr tepelného toku.

Měření bylo provedeno v ustáleném stavu při střední teplotě +10 °C a teplotním spádu 10 K u vzorku lněného, konopného a jutového, přičemž naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti byly následující.

Tab. 13 Přehled hodnot součinitele tepelné vodivosti v ustáleném stavu u konopných, lněných a jutových vláken při objemové hmotnosti 25 kg.m⁻³

Součinitel tepelné vodivosti λ_{10} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		
Konopná vlákna	Lněná vlákna	Jutová vlákna
0,0620	0,0650	0,0580

Největší průměrná tloušťka vláken byla zaznamenána u vláken z technického konopí, 155,2 μm. U lněných vláken byla průměrná tloušťka 111,1 μm. Nejmenší tloušťka,

94,2 μm , byla stanovena u vláken juty. Z pohledu tepelně izolačních vlastností přírodních vláken bylo nejpříznivější hodnoty součinitele tepelné vodivosti dosaženo u jutových vláken, $0,0580 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, u konopných vláken byl stanoven součinitel tepelné vodivosti $0,0620 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a u lněných vláken $0,0650 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

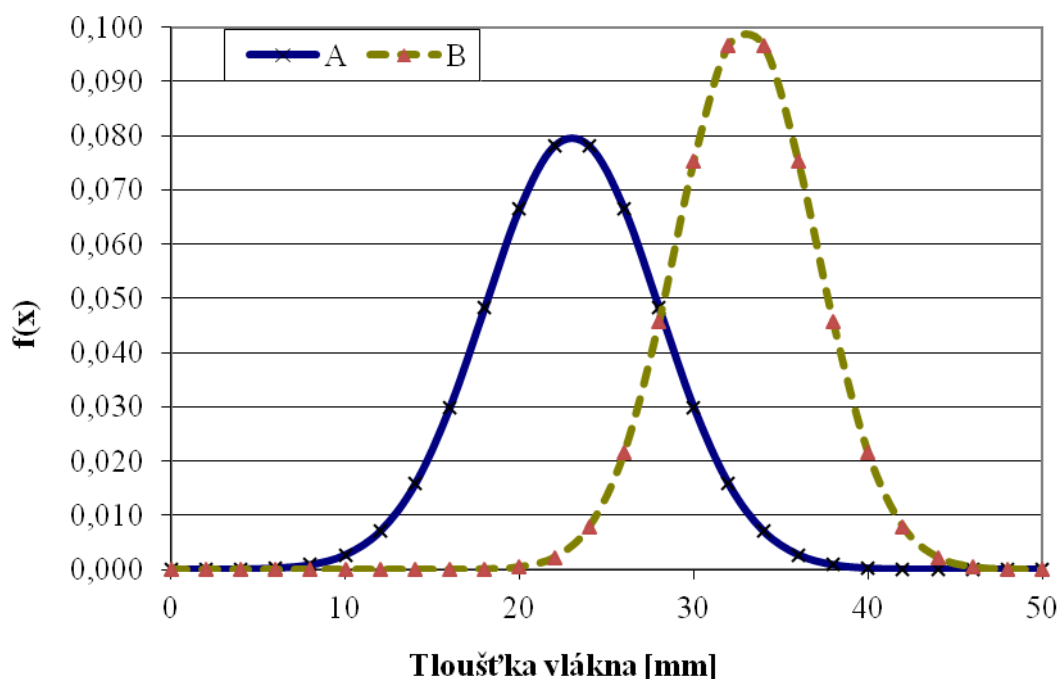
4.1.2 Materiály pocházející z chovu dobytka

V daném případě byly provedeny rozborů a měření na dvou typech odpadních vláken z ovčí vlny (dále jsou označeny v textu jako typ A a typ B), která se odlišovala tloušťkou. Jednalo se o odpadní vlákna zajištěná z výroby Nejdecká česárna vlny a.s. Tato vlákna vznikají při zpracování vlny na vlákno a následných operacích s vlákny jako odpad. Tato vlákna nejsou již vhodná pro další použití v textilní výrobě, nicméně se jedná o čistá vlněná vlákna bez organického znečištění (vyčištěná vlna), která by mohla najít potenciální uplatnění při výrobě technických a stavebních izolací. Mikroskopický rozbor byl proveden na reprezentativním vzorku 30 vláken, přičemž byla stanovena průměrná tloušťka a distribuce tloušťky vláken. Na každém vlákně byla provedena tři měření, výsledky jsou statisticky vyhodnoceny. V daných případech bylo ověřeno normální rozdělení tloušťky vláken u základního souboru naměřených hodnot a byla výpočtově stanovena:

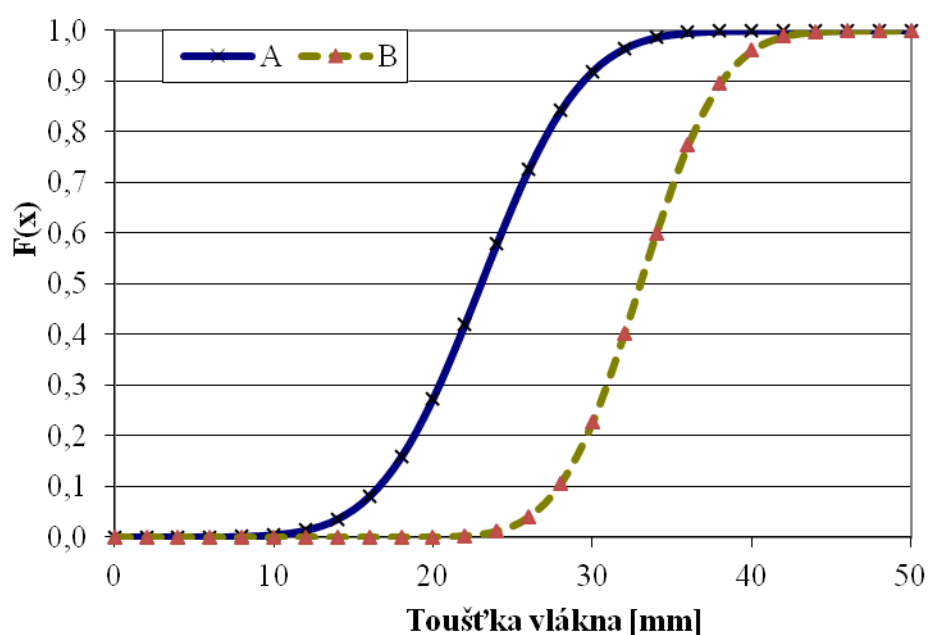
- průměrná tloušťka vlákna,
- hustota pravděpodobnosti pro tloušťku vlákna (normální rozdělení),
- distribuční funkce pro tloušťku vlákna (normální rozdělení).

Tab. 14 Přehled stanovených tloušťek vláken u vzorků ovčí vlny

Druh vlákna	Průměrná tloušťka vlákna d_m [μm]
A	23,2
B	33,1



Obr. 36 Hustota pravděpodobnosti $f(d_x)$ tloušťek vlněných vláken



Obr. 37 Distribuční funkce $F(d_x)$ tloušťek vlněných vláken

V dalším kroku bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti na vrstvě vláken uložených za laboratorních podmínek (teplota 23 °C, relativní vlhkosti 50 %), která byla

zhutněna na objemovou hmotnost 25 kg.m^{-3} , přičemž převažující orientace vláken byla kolmo na směr tepelného toku.

Měření bylo provedeno v ustáleném stavu při střední teplotě $+10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotním spádu 10 K u vzorků vlněných vláken, přičemž naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti byly následující.

Tab. 15 Přehled hodnot součinitele tepelné vodivosti v ustáleném stavu u ovčí vlny

Součinitel tepelné vodivosti λ_{10} $[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	
Ovčí vlna – typ A	Ovčí vlna – typ B
0,0410	0,0450

Jak lze vidět z tab. 15, součinitel tepelné vodivosti u vláken ovčí vlny byl výrazně nižší v porovnání s přírodními vlákny produkovanými v zemědělství.

4.1.3 Diskuze dílčích výsledků

Na základě počátečních měření charakteristik vláken v rámci první etapy, viz tab. 16, zjištěných informací v rámci rešeršní činnosti, týkajících se zejména základních fyzikálních vlastností u přírodních vláken, viz tab. 12, a zjištění aktuálních cen na obchodním trhu v rámci zemí EU, viz tab. 17, byl proveden výběr nejvhodnějšího surovinového zdroje pro další vývoj přírodních izolačních materiálů.

Tab. 16 Souhrnný přehled vlastností přírodních vláken

Druh vláken	Průměrná tloušťka vláken $d_m [\mu\text{m}]$	Součinitel tepelné vodivosti v ustáleném stavu $\lambda_{10} [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
Konopná vlákna	155,2	0,0620
Lněná vlákna	111,1	0,0650
Jutová vlákna	94,2	0,0580
Ovčí vlna – typ A	23,2	0,0410
Ovčí vlna – typ B	33,1	0,0450

Tab. 17 *Souhrnný přehled současných cen přírodních vláken*

Druh vláken	Průměrná cena za 1 kg vláken [Euro]
Konopná vlákna	0,36–0,60
Lněná vlákna	1,60
Jutová vlákna	0,30
Ovčí vlna	1,00

Na základě zjištěných skutečností lze konstatovat, že v současné době existuje v ČR široká škála potenciálních surovinových zdrojů, které mohou být využity při výrobě přírodních izolačních materiálů s použitím ve stavebním průmyslu. Tyto ekologické, vstupní suroviny představují vysoký potenciál pro možné zpracování do podoby měkkých izolačních rohoží.

Avšak je nutné uvažovat možnost zpracování těchto materiálů do podoby izolačních rohoží. Vzhledem k této problematice výroby a zpracování těchto vstupních surovin byla z dalšího vývoje materiálů vyloučena ovčí vlna, přestože vykazovala velmi dobré tepelně izolační vlastnosti. Cena čisté vstupní suroviny je velmi vysoká, okolo 3,00 Eur za 1 kg vláken. Pokud by byla pro výrobu použita odpadní vlněná vlákna vznikající při zpracování ovčí vlny na vlákno/předivo, lze očekávat, že by cena byla podstatně nižší, cca 1 Euro za 1 kg vláken. Nicméně tato druhotná surovina je vázána na jeden konkrétní zdroj, který z dlouhodobého hlediska nezaručuje dostatečnou a flexibilní dodávku vstupní suroviny, která by byla potřebná pro velkoobjemovou výrobu stavebních izolací.

Samotná cena jutových vláken, která jsou jako druhá nejčastěji produkována na světě, po vláknech bavlny, není vysoká, avšak z důvodu exportu těchto vláken až z Asie byla jutová vlákna zajištěna pouze v omezeném množství, ze kterých byla získána zkušební tělesa pro počáteční porovnání základních fyzikálních vlastností s ostatními vyvíjenými přírodními izolacemi. Z důvodu komplikovanosti poptávky, s ohledem na využití zejména blízkých evropských surovinových zdrojů, nebyl předpokládán jejich další vývoj.

Jako stěžejní pro výzkumnou činnost a vývoj přírodních izolačních materiálů se na základě výsledků jeví konopná a lněná vlákna.

4.2 Vyhodnocení etapy II „Návrh receptur, výroba zkušebních těles“ a diskuze výsledků

Na tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů má obecně vliv řada faktorů, které je nutné brát v úvahu při jejich výrobě i následném použití ve stavební konstrukci. Z pohledu samotné výroby tepelně izolačních vláknitých materiálů se jedná především

o vliv: druhu a tloušťky vláken, objemové hmotnosti a množství použitého pojiva (v případě termického pojení bikomponentních pojivových vláken).

Na základě těchto parametrů se mění jak tepelně technické, tak i mechanické vlastnosti výsledného produktu a také jeho cena. Při návrhu optimálního složení stavebních materiálů je obecně snaha o maximalizaci jeho užitných vlastností, při zachování přijatelné ceny.

Návrh jednotlivých zkušebních receptur řešených v rámci disertační práce byl proveden na základě získaných informací z literárních rešerší z předchozí etapy I, s ohledem na předpokládané využití izolačních rohoží ve stavební konstrukci. Právě z tohoto hlediska bylo nutné optimalizovat nejen složení zkušebních těles, ale i jejich objemovou hmotnost, která hraje důležitou roli z hlediska využití těchto produktů ve stavební konstrukci.

Složení jednotlivých zkušebních sad je uvedeno v následující tabulce 18, viz níže. Z přírodních vláken byla zvolena na základě zjištění v etapě první, vlákna technického konopí, lnu a pro porovnání také vlákna jutová. Zkušební sady 1, 2 a 4 byly navrženy s totožnými podíly jednotlivých složek (přírodní vlákna, pojivová vlákna a pazdeří). Tyto 3 směsi sloužily k porovnání účinnosti a efektivity jednotlivých, tří navržených vláknitých přírodních surovinových zdrojů pro vývoj ekologických izolačních materiálů. Vzhledem k snadné a cenově výhodné dostupnosti zdrojů vláken technického konopí byla navržena dále řada zkušebních receptur na bázi konopných vláken, odlišujících se navzájem rozdílným složením vstupních složek či objemovou hmotností zkušebních těles. Zde je nutné podotknout, že tato fyzikální vlastnost je závislá na nastavení výrobního procesu (na mocnosti vytvořeného rouna a na následném dotlaku pásů v zapékací peci), který je popsán níže.

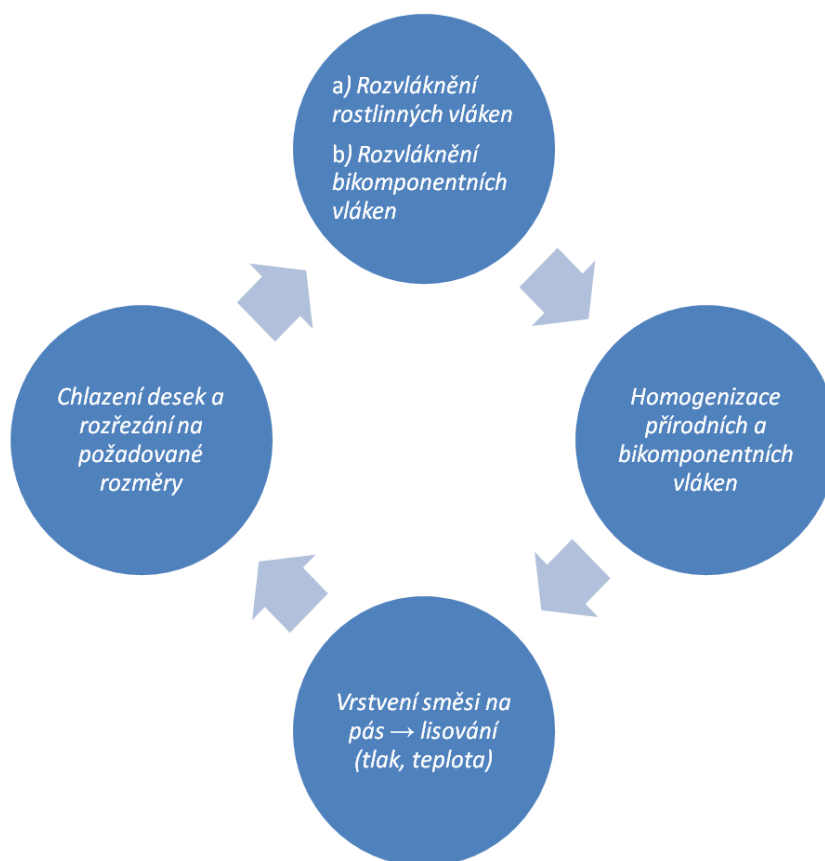
Tab. 18 Zkušební sady a zastoupení jednotlivých vstupních komponent

Označení zkušební sady	Typ vlákna	Hmotnostní procentuální podíl jednotlivých vstupních komponent [%]		
		Přírodní vlákna	Pojivová vlákna	Pazdeří
1	Juta	68	20	12
2	Len	68	20	12
3	Konopí	48	20	32
4	Konopí	68	20	12
5	Konopí	48	20	32
6	Konopí	48	20	32
7	Konopí	48	20	32
8	Konopí	64	20	16
9	Konopí	49	10	41

Zkušební tělesa z přírodních vláken (technické konopí, len a juta) s pazdeřím (odpad při zpracování konopných vláken) byla vyrobena v rámci poloprovozu na speciální výrobní lince společnosti CANABEST s.r.o. v Břeclavi, zpracovávající vláknité suroviny do podoby izolačních rohoží pomocí technologie termického pojení. Jako pojivo byla použita polyesterová bikomponentní vlákna firmy ALTEX Textil-Recycling. Tato technologie výroby je čistě bezodpadová, veškeré vzniklé odpadní zbytky se vrací zpět do výroby.

Výroba izolačních rohoží z technického konopí probíhala následujícím způsobem. Balíky dodaných přírodních vláken (technické konopí, len, juta) byly nejprve mechanicky a poté pneumaticky rozvlákněny, dále byla na vlákna aplikována přísada proti hoření a biologickým škůdcům (soda). Takto upravená přírodní vlákna byla částečně vysušena (na vlhkost cca 6 %). V druhé části výrobní linky byly rozvlákněny balíky bikomponentních polyesterových vláken, viz obr. 39. Poté byla přírodní a bikomponentní vlákna pneumaticky a poté mechanicky smíšena. V této fázi výrobního procesu byly navíc při mísení vláken vraceny ke směsi také rozvlákněné zbytky vznikající během výroby. Po důkladné homogenizaci směsi vláken a pazdeří následovalo vytváření desek izolačních rohoží (pomocí rounotvořiče). Připravená směs byla na linkovém pásu zapékána za zvýšeného tlaku a teploty, dle požadované tloušťky a objemové hmotnosti zkušebních těles, viz obr. 40. Po vychlazení byly izolační rohože nařezány pomocí podélné kotoučové řezačky a příčné gilotiny do požadovaných deskových formátů 1200 x 600 mm, viz obr. 41.

Takto připravená zkušební tělesa pak byla zabalena do fólií a připravena pro další výzkum fyzikálních, tepelně izolačních, akustických a mechanických vlastností, který byl proveden v rámci disertační práce na Stavební fakultě Vysokého učení technického v Brně.



Obr. 38 Princip výroby izolačních rohoží na přírodní bázi



Obr. 39 Fotografie přípravy vstupních vláken na výrobní lince firmy CANABEST – rozvláknování balíků vláken (vlevo technické konopí, vpravo bikomponentní vlákna)



Obr. 40 Vytváření izolačních rohoží na výrobní lince



Obr. 41 Finále výroby izolačních rohoží na výrobní lince

U vybraných zkušebních těles byly provedeny snímky povrchové struktury, viz obrázky níže, na kterých jsou vzorky složeny z 68 % přírodních vláken, 20 % bikomponentních vláken a 12 % pazdeří.

**Obr. 42** Detail struktury – juta (68-20-12)**Obr. 43** Detail struktury – len (68-20-12)**Obr. 44** Detail struktury – konopí (68-20-12)

4.3 Vyhodnocení etapy III „Laboratorní měření“ a diskuze výsledků

Jednotlivá laboratorní měření byla prováděna v laboratořích Ústavu technologie stavebních hmot a dílců na Stavební fakultě Vysokého učení technického v Brně. Připravená zkušební tělesa, o rozměrech odpovídajících požadavkům daných zkušebními normami (viz výše), byla podrobena testování charakteristických vlastností, uvedených v kapitole 3.3. Jednalo se zejména o stanovení základních fyzikálních, tepelně izolačních, akustických a mechanických vlastností.

4.3.1 Stanovení základních fyzikálních vlastností

Mezi sledované základní fyzikální vlastnosti patřily lineární rozměry a tloušťka u jednotlivých zkušebních těles a jejich objemové hmotnosti. Vlastnosti byly stanoveny dle požadavků a postupů uvedených v normách ČSN EN 822, ČSN EN 823, ČSN EN 12085 a ČSN EN 12431. Metodiky zkoušení výše uvedených charakteristik jsou uvedeny

v kapitolách 2.1 Stanovení tloušťky a lineárních rozměrů vzorků a 2.2 Stanovení objemové hmotnosti.

Na 10 zkušebních tělesech z každé z 9 testovaných zkušebních sad vyvíjených přírodních izolací, kondiciovaných v laboratorních podmínkách (23 °C, při relativní vlhkosti vzduchu 50 %), bylo provedeno stanovení lineárních rozměrů a tloušťky pro následné určení objemové hmotnosti. Vzhledem k lineárním rozměrům zkušebních těles menších jak 600 mm, byla na každém zkušebním vzorku provedena 2 měření tloušťky. U stanovení lineárních rozměrů bylo provedeno na každém zkušebním vzorku 1 měření délky a 1 měření šířky, s ohledem na velikost lineárních rozměrů zkušebních těles, které byly menší jak 1500 mm. Ze všech naměřených dat byly určeny průměrné hodnoty, které jsou uvedeny v přehledu naměřených hodnot v tabulkách 19, 20 níže.

Tab. 19 Přehled stanovených průměrných hodnot tloušťek zkušebních těles jednotlivých zkušebních sad

Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d ₁ [mm]	80,78	77,34	77,87	79,72	66,87	30,11	9,36	39,94	38,42
d ₂ [mm]	81,64	77,51	77,93	79,54	67,12	30,54	9,48	40,37	38,46
Průměrná tloušťka d [mm]	81,2	77,4	77,9	79,6	67,0	30,3	9,4	40,2	38,4

Tab. 20 Přehled stanovených průměrných hodnot lineárních rozměrů zkušebních těles od jednotlivých zkušebních sad

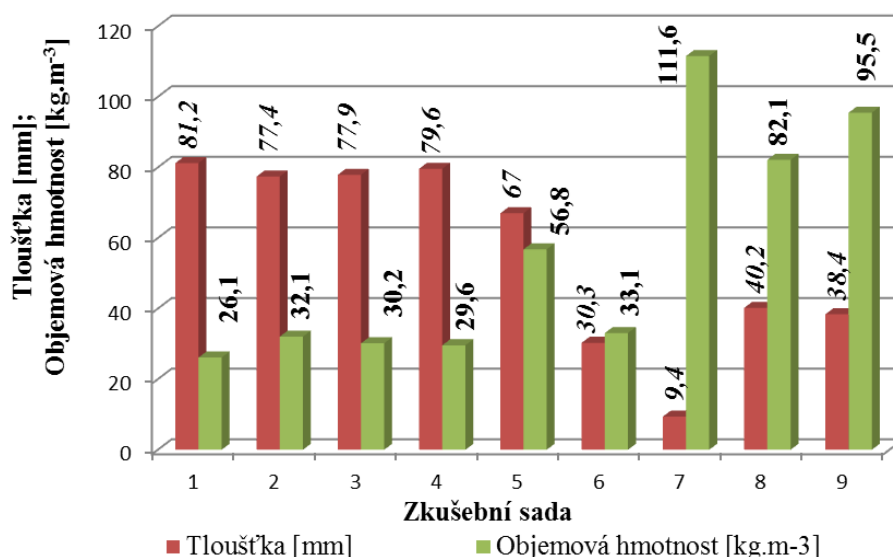
Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a [mm]	203,8	201,8	202,0	200,7	201,2	201,9	200,8	201,4	200,3
b [mm]	199,5	200,9	201,2	199,6	199,6	199,3	200,4	200,1	200,1
Průměrné hodnoty lineárních rozměrů zkušebních těles dle ČSN EN 822									
a [mm]	204	202	202	201	201	202	201	201	200
b [mm]	200	201	201	200	200	199	200	200	200

Dále byla zkušební tělesa zvážena, výpočtově vyjádřen jejich objem a určena jejich objemová hmotnost dle ČSN EN 1602. Ze získaných dat byla určena průměrná hodnota objemové hmotnosti u zkušebních těles kondiciovaných za laboratorních podmínek (23 °C, při relativní vlhkosti vzduchu 50 %).

Tab. 21 Přehled stanovených průměrných hodnot objemových hmotností u zkušebních těles jednotlivých zkušebních sad

Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m [kg]	0,0862	0,1006	0,0955	0,0944	0,1528	0,0403	0,0422	0,1331	0,1470
V [m ³]	0,0033	0,0031	0,0032	0,0032	0,0027	0,0012	0,0004	0,0016	0,0015
ρ [kg.m ⁻³]	26,1	32,1	30,2	29,6	56,8	33,1	111,6	82,1	95,5

Na základě výše uvedených naměřených veličin lze sledovat, že tloušťky zkušebních těles se pohybovaly v rozmezí od 9,4 mm do 81,2 mm. Objemová hmotnost izolačních materiálů byla v intervalu $<26,1; 111,6>$ kg.m⁻³.

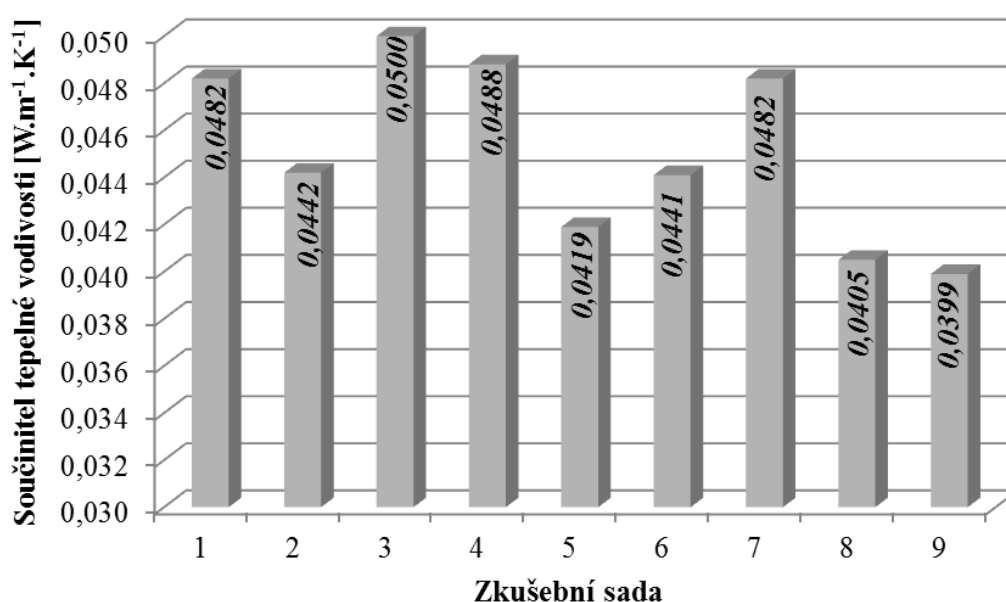
**Obr. 45** Grafické vyobrazení základních fyzikálních vlastností u testovaných zkušebních sad

4.3.2 Stanovení tepelně technických vlastností

V rámci stanovení tepelně technických vlastností bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti vždy na 3 zkušebních vzorcích z každé zkušební sady stacionární metodou desky dle ČSN 72 7012-3, ČSN EN 12667 a ISO 8301-3 při střední teplotě 10 °C a teplotním spádu 10 K. Měření bylo provedeno na zkušebních tělesech o rozměrech 300 x 300 mm, kondiciovaných za laboratorních podmínek (23 °C, při relativní vlhkosti vzduchu 50 %), v přístroji Lambda 2300, Holometrix Micromet Inc. Následující tabulka 22 a obrázek 46 uvádějí přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti u jednotlivých zkušebních sad.

Tab. 22 Přehled stanovených průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti stanovených u zkušebních těles jednotlivých zkušebních sad za laboratorních podmínek

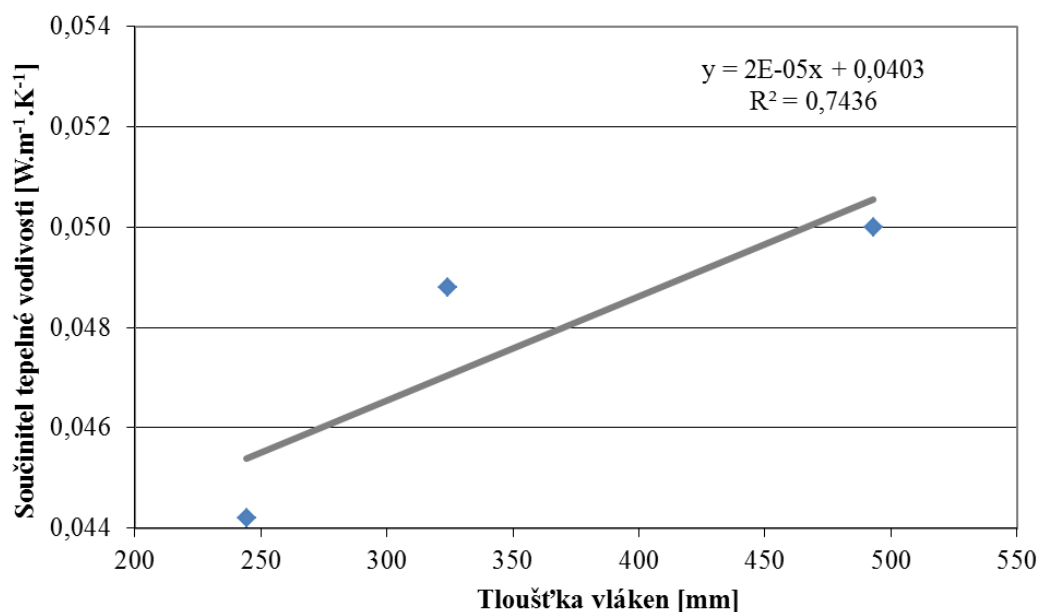
Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ [kg.m ⁻³]	26,1	32,1	30,2	29,6	56,8	33,1	112	82,1	95,5
λ_1 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0481	0,0444	0,0503	0,0488	0,0419	0,0444	0,0486	0,0401	0,0402
λ_2 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0480	0,0439	0,0501	0,0491	0,0420	0,0440	0,0480	0,0406	0,0395
λ_3 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0484	0,0443	0,0497	0,0485	0,0418	0,0440	0,0479	0,0407	0,0399
Průměrná hodnota λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0482	0,0442	0,0500	0,0488	0,0419	0,0441	0,0482	0,0405	0,0399

**Obr. 46** Grafické vyobrazení hodnot součinitele tepelné vodivosti u testovaných zkušebních sad

Na základě výše uvedených hodnot součinitele tepelné vodivosti u vzorků uložených v laboratorních podmínkách lze konstatovat, že vzorky přírodních izolací vykazují tepelně izolační vlastnosti srovnatelné s vlastnostmi dnes běžně užívaných izolačních materiálů (minerální vlna, EPS). Lze pozorovat vliv složení a objemové hmotnosti na výslednou hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Obecně je známo, že součinitel tepelné vodivosti je veličina, jejíž hodnota je závislá na mnoha faktorech, např. na objemové hmotnosti, vlhkosti, pórovitosti, teplotě materiálu a dalších materiálových vlastnostech a podmínkách prostředí. Tyto závislosti jsou podrobně rozvedeny v následující kapitole 4.4 řešené v rámci etapy IV.

Dalším důležitým ukazatelem u vláknitých tepelně izolačních materiálů je tloušťka vláken. U minerálně vláknitých izolací dochází při snižování tloušťky vlákna ke zlepšování tepelně izolačních vlastností. V případě izolací z organických vláken je situace poněkud odlišná, neboť organická přírodní vlákna vykazují přirozenou pórovitost, která závisí nejen na konkrétním druhu vlákna, ale částečně i na způsobu jeho přípravy. Při hledání závislosti mezi tloušťkou vláken bylo zjištěno, že vzhledem k tomu, že vliv objemové hmotnosti je dominantnější než vliv tloušťky vláken, je možné danou závislost stanovit pouze pro vzorky srovnatelné objemové hmotnosti. Závislost součinitele tepelné vodivosti na tloušťce vlákna byla tedy stanovena pro vzorky o objemové hmotnosti okolo 30 kg.m^{-3} , přičemž pro srovnání byly použity přepočítané tloušťky vláken, ve kterých byl zahrnut i podíl částic pazdeří (průměrná tloušťka vláken pazdeří byla 1 mm).

Jak lze z uvedeného grafu na obr. 47 sledovat, v daném případě byl potvrzen obecný předpoklad. Tedy v případě organických vláken ze zemědělských plodin dochází se zvyšující se tloušťkou vláken k degradaci tepelně izolačních vlastností materiálu, při zachování konstantní objemové hmotnosti.



Obr. 47 Závislost součinitele tepelné vodivosti na tloušťce vláken

4.3.3 Stanovení akustických vlastností

V rámci experimentální části disertační práce byly stanoveny dvě klíčové akustické vlastnosti izolačních materiálů, a to činitel zvukové pohltivosti a dynamická tuhost.

Dynamická tuhost byla stanovena vždy na 3 zkušebních tělesech z každé zkušební sady o rozměrech 200 x 200 mm rezonanční metodou dle ČSN ISO 9052-1. Nejprve byla na

zkušebních tělesech, umístěných ve zkušební aparatuře, určena tloušťka po zatížení zatěžovací deskou o plošné hmotnosti $206,5 \text{ kg.m}^{-2}$, poté byla určena rezonanční frekvence f_r . Dále byla numericky určena zdánlivá dynamická tuhost zkušebního tělesa s'_t a dynamická tuhost vzduchu s'_a , jejichž součtem byla získána dynamická tuhost zkušebního vzorku s' . Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 23 níže.

Tab. 23 Přehled stanovených průměrných hodnot dynamické tuhosti u zkušebních těles jednotlivých zkušebních sad

Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d_1 [mm]	60,59	53,53	61,89	55,30	61,31	22,26	6,41	35,14	33,85
d_2 [mm]	61,41	54,38	61,38	56,20	61,10	23,49	6,86	36,47	33,57
d_3 [mm]	60,56	54,41	59,51	56,93	60,61	24,18	7,36	36,51	33,43
d_4 [mm]	59,27	53,22	59,39	55,67	60,58	22,73	6,51	35,13	33,40
d_ϕ [mm]	60,46	53,88	60,54	56,02	60,90	23,17	6,79	35,81	33,56
f_1 [Hz]	12,7	13,5	11,7	11,7	16,7	16,8	22,7	23,0	25,0
f_2 [Hz]	12,0	13,5	12,3	11,7	16,3	17,2	22,3	23,0	26,0
f_3 [Hz]	12,7	14	11,3	11,3	16,3	17,2	24,2	22,7	25,0
f_ϕ [Hz]	12,4	13,7	11,8	11,6	16,4	17,1	23,1	22,9	25,3
s'_t [MPa.m ⁻¹]	1,26	1,52	1,13	1,09	2,20	2,37	4,42	4,27	5,23
s'_a [MPa.m ⁻¹]	1,84	2,06	1,84	1,98	1,82	4,80	16,40	3,10	3,31
s' [MPa.m ⁻¹]	3,1	3,6	3,0	3,1	4,0	7,2	20,8	7,4	8,5

Hodnoty dynamických tuhostí vyvíjených přírodních izolací se pohybovaly v rozmezí od 3,0 do 20,8 MPa.m⁻¹. Dle ČSN 73 0532 lze zařadit všechny vzorky do I. kategorie podložek, jelikož u všech byla stanovena dynamická tuhost menší jak 30 MPa.m⁻¹.

Činitel zvukové pohltivosti byl stanoven dle ČSN ISO 10534-1 na kruhových vzorcích o průměru 100 mm (frekvence 125–1000 Hz) a 30 mm (frekvence 1000–3150 Hz). Vyhodnocení váženého činitele zvukové pohltivosti bylo provedeno dle ČSN EN ISO 11654, která rozlišuje 5 tříd zvukové pohltivosti, viz tabulka 24 níže.

Tab. 24 Třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654

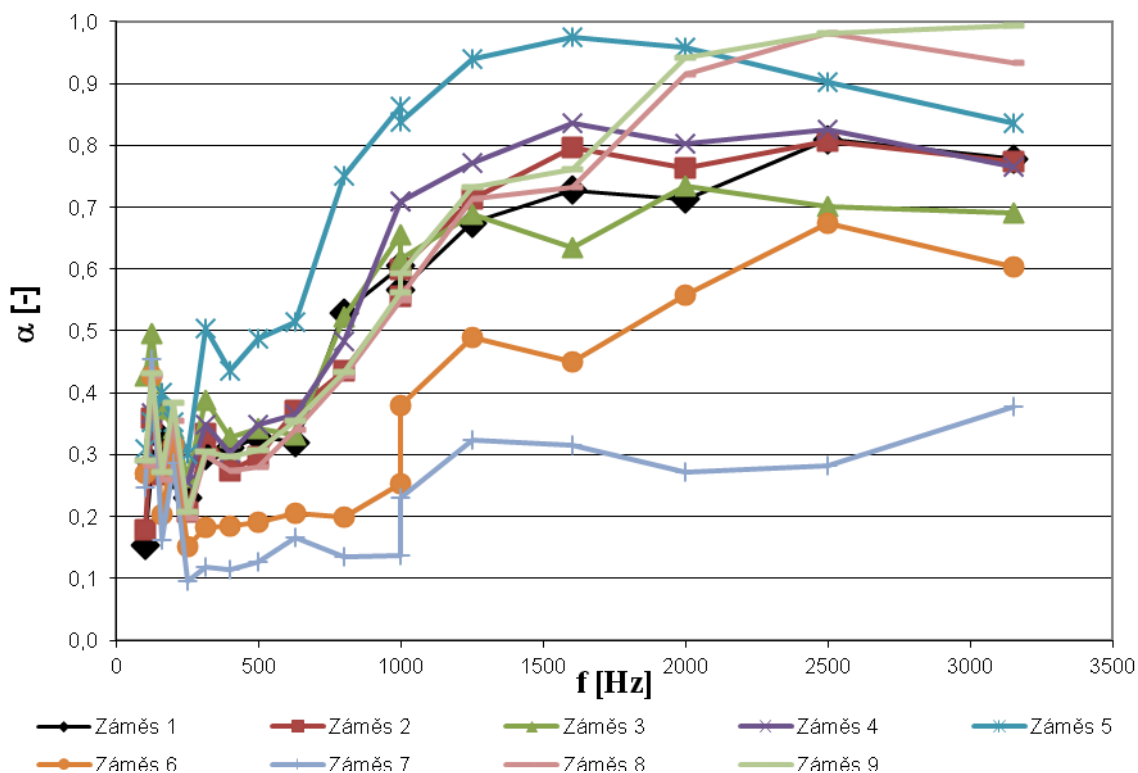
Třída zvukové pohltivosti	α_w [-]
A	0,90; 0,95; 1,0
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,15; 0,20; 0,25
Nerozlišeno	0; 0,05; 0,10

Na základě naměřených napětí U_{max} a U_{min} byly určeny činitele zvukové pohltivosti pro jednotlivé frekvence. Přehled naměřených hodnot činitele zvukové pohltivosti je uveden v tabulce 25. Na níže uvedeném obrázku 48 je uvedena závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci.

Tab. 25 Přehled průměrných hodnot činitelů zvukové pohltivosti zkušebních vzorků

Vzorek č. 1								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,154	0,287	0,325	0,267	0,230	0,299	0,311	0,328
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,320	0,530	0,605	0,675	0,728	0,714	0,809	0,779
Vzorek č. 2								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,179	0,358	0,268	0,304	0,207	0,335	0,274	0,296
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,372	0,436	0,599	0,714	0,797	0,764	0,806	0,773
Vzorek č. 3								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,428	0,496	0,374	0,342	0,264	0,389	0,328	0,343
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,332	0,523	0,617	0,689	0,634	0,734	0,701	0,692
Vzorek č. 4								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,276	0,366	0,284	0,284	0,255	0,348	0,303	0,348
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,364	0,483	0,710	0,772	0,836	0,803	0,825	0,766
Vzorek č. 5								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,310	0,352	0,401	0,352	0,301	0,505	0,436	0,487
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,514	0,751	0,838	0,941	0,975	0,958	0,903	0,836
Vzorek č. 6								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,269	0,427	0,202	0,316	0,152	0,183	0,184	0,191
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,205	0,200	0,379	0,490	0,450	0,557	0,675	0,604

Vzorek č. 7								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,248	0,455	0,162	0,286	0,096	0,119	0,115	0,126
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,166	0,134	0,230	0,323	0,316	0,272	0,281	0,378
Vzorek č. 8								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,282	0,427	0,258	0,355	0,198	0,298	0,274	0,280
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,339	0,428	0,556	0,714	0,732	0,915	0,981	0,934
Vzorek č. 9								
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
α [-]	0,291	0,432	0,271	0,383	0,207	0,305	0,296	0,308
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
α [-]	0,355	0,434	0,594	0,732	0,761	0,941	0,981	0,994



Obr. 48 Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci

Poté bylo provedeno zatřídění jednotlivých zkušebních záměsů do jednotlivých tříd dle ČSN EN ISO 11654, viz tab. 26.

Tab. 26 Třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654 u jednotlivých zkušebních receptur

Zkušební záměs	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_w [-]	0,40 (M)	0,40 (M)	0,45 (M)	0,40 (M)	0,55 (M)	0,25 (M)	0,15 (M)	0,35 (M)	0,40 (M)
Třída zvukové pohltivosti	D	D	D	D	D	E	E	D	D

Z pohledu vážených činitelů zvukové pohltivosti α_w byla většina zkušebních receptur zaříděna do třídy D, pouze sady 6 a 7 byly zaříděny do třídy E.

4.3.4 Stanovení mechanických vlastností

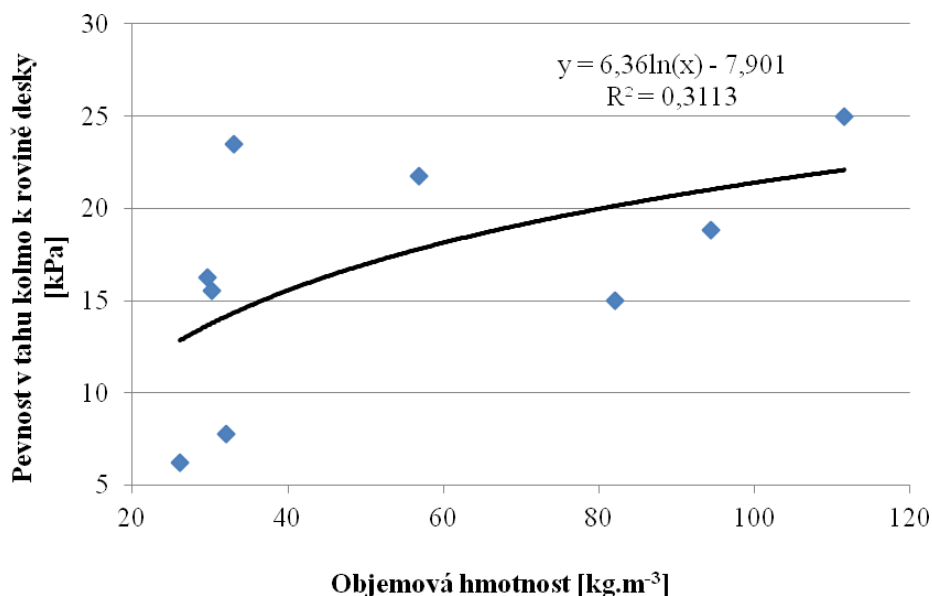
V rámci disertační práce byly testovány mechanické vlastnosti vyvíjených přírodních izolačních materiálů, mezi které patřily napětí při 10% deformaci (pevnost v tlaku) a pevnost v tahu kolmo k rovině desky.

Pevnost v tahu kolmo k rovině desky byla testována na 3 kusech zkušebních těles o rozměrech 200 x 200 mm z každé zkušební sady dle normy ČSN EN 1607. Před samotným měřením byly vzorky nejprve pevně přichyceny lepidlem Sikadur mezi dvě tuhé, dřevěné, čtvercové desky (200 x 200 mm), poté byly podrobeny tahovému namáhání. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 27 níže.

Tab. 27 Průměrné hodnoty pevností v tahu kolmo k rovině desky u jednotlivých zkušebních sad

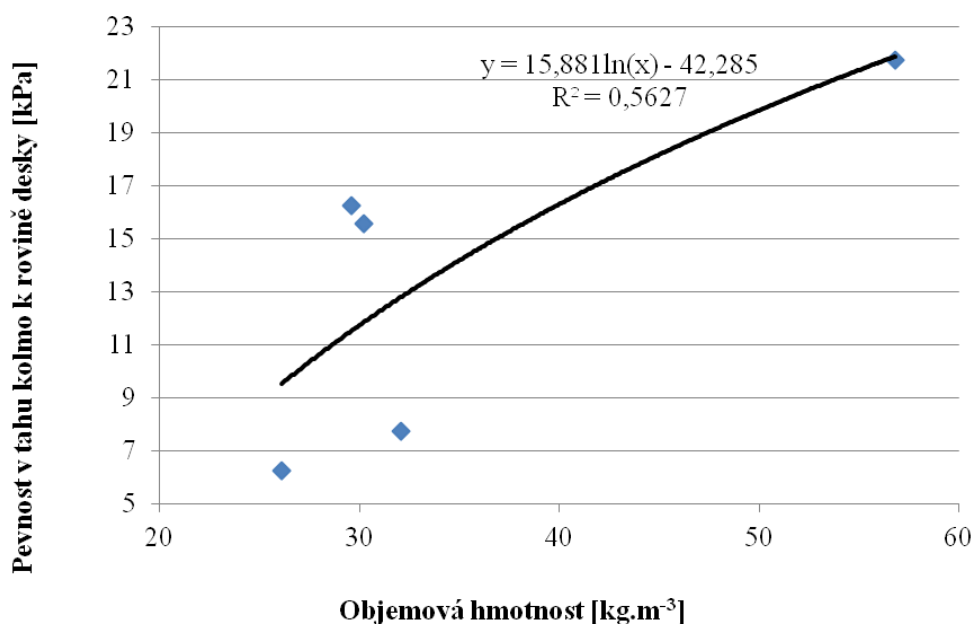
Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ [kg.m ⁻³]	26,1	32,1	30,2	29,6	56,8	33,1	112	82,1	95,5
F [kN]	0,25	0,31	0,62	0,65	0,87	0,94	1,0	0,98	1,07
σ_{mt} [kPa]	6,25	7,75	15,56	16,23	21,75	23,47	25,00	15,00	18,80

Z výše uvedené tabulky lze usuzovat, že vzorky s vyšší objemovou hmotností vykazují nejvyšší pevnosti v tahu kolmo k rovině desky. Zkušební tělesa z jutových a lněných vláken vykazovala výrazně nižších hodnot v porovnání se vzorky z vláken technického konopí. Důvodem je především rozdílná tloušťka vstupních vláken a jejich čistota. Byla sestavena i grafická závislost pevnosti v tahu na objemové hmotnosti zkušebních receptur.



Obr. 49 Závislost pevnosti v tahu kolmo k rovině desky na objemové hmotnosti u jednotlivých zkušebních sad

Z důvodu nízkého koeficientu korelace (viz obr. 49), byla sestavena stejná grafická závislost, ale pouze pro zkušební sady 1 až 5 (tloušťka zkušebních vzorků v intervalu <67,0;81,2> mm), kdy došlo ke zvýšení koeficientu korelace (viz obr. 50).

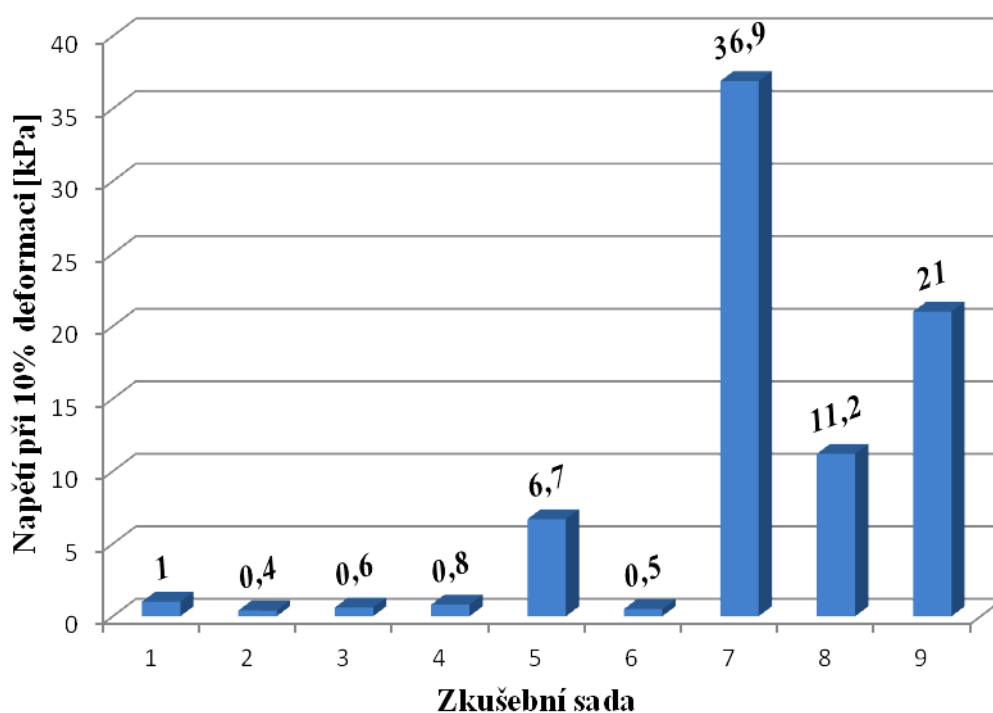


Obr. 50 Závislost pevnosti v tahu kolmo k rovině desky na objemové hmotnosti u zkušebních sad 1-5

Dále bylo provedeno stanovení napětí při 10% deformaci. Postup měření a vyhodnocení byl proveden dle normy EN 826. Tři zkušební tělesa, o rozměrech 200 x 200 mm a dané tloušťce d , od každé zkušební sady, byla umístěna mezi dvě pevné desky a zatížena počátečním tlakem 50 Pa, kdy byla opět odečtena tloušťka d_0 . Poté byla zkušební tělesa stlačována předepsanou rychlostí. Pro vyhodnocení bylo nutné sestavit pracovní diagramy, ze kterých byla zjištěna příslušná napětí při 10% deformaci zkušebních těles.

Tab. 28 Průměrná napětí při 10% deformaci u jednotlivých zkušebních sad

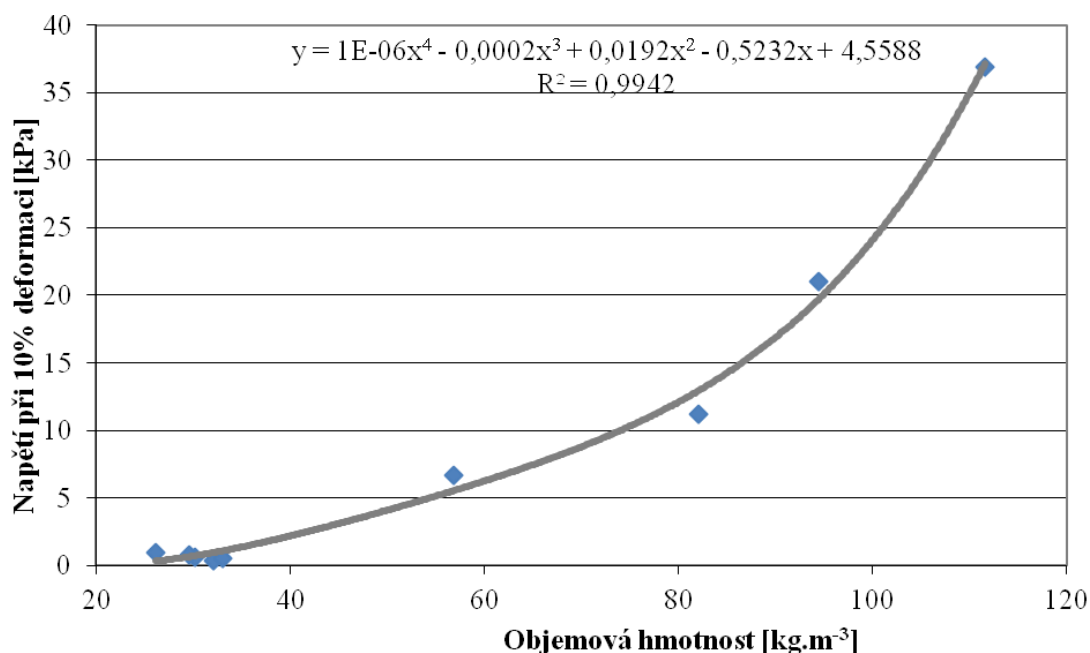
Zkušební záměs	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ [kg.m ⁻³]	26,1	32,1	30,2	29,6	56,8	33,1	112	82,1	95,5
F [N]	40	16	24	32	268	20	1476	448	840
σ_{10} [kPa]	1,0	0,4	0,6	0,8	6,7	0,5	36,9	11,2	21,0



Obr. 51 Napětí při 10% deformaci u jednotlivých zkušebních sad

Nejvyšších hodnot v případě napětí při 10% deformaci bylo dosaženo u zkušební záměsi č. 7 s nejvyšší objemovou hmotností. Naopak nejnižších hodnot bylo dosaženo u zkušebních těles na bázi lněných vláken.

Obecně tedy mechanické vlastnosti vyvíjených přírodních materiálů byly dostačující v případech s vyšší objemovou hmotností. Avšak význam těchto mechanických vlastností je závislý na oblasti umístění izolací v konstrukci. Na následujícím obrázku 52 je prezentována závislost napětí při 10% deformaci na objemové hmotnosti.



Obr. 52 Závislost napětí při 10% deformaci na objemové hmotnosti u jednotlivých zkušebních sad

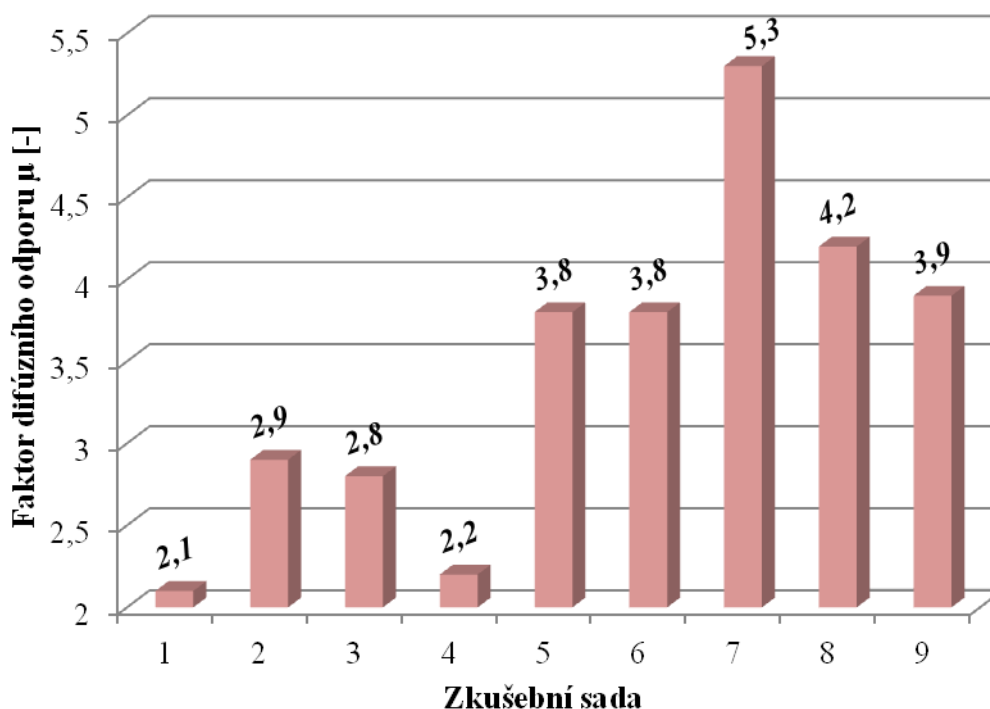
4.3.5 Stanovení dalších charakteristických vlastností pro izolační materiály

Mezi další sledované charakteristické vlastnosti vyvíjených izolačních materiálů patřily faktor difúzního odporu, ekvivalentní difúzní tloušťka a krátkodobá nasákavost při částečném ponoření.

Faktor difúzního odporu byl stanoven dle ČSN EN 12086 vždy na třech zkušebních tělesech kruhového průřezu o průměru 100 mm z každé zkušební sady. Zkušební tělesa byla pevně umístěna do misek s roztokem dihydrogenfosforečnanu amonného $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ vykazujícím 93 % relativní vlhkost a takto byla vložena do klimatizační komory za podmínek 23 °C a 50 % relativní vlhkosti. Až do ustálení hmotnosti byly zaznamenávány v pravidelných časových intervalech hmotnostní změny. Přehled naměřených průměrných hodnot faktorů difúzního odporu u jednotlivých zkušebních receptur jsou graficky zobrazeny na obr. 53, a v tabulce 29 níže. Z naměřených hodnot difúzních odporů byla výpočtově určena ekvivalentní difúzní tloušťka s_d [-].

Tab. 29 Průměrné hodnoty difúzních odporů a ekvivalentních difúzních tloušťek u jednotlivých zkušebních sad

Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s_d [m]	0,17	0,22	0,22	0,18	0,25	0,12	0,05	0,17	0,15
μ [-]	2,1	2,9	2,8	2,2	3,8	3,8	5,3	4,2	3,9

**Obr. 53** Faktor difúzního odporu u jednotlivých zkušebních sad

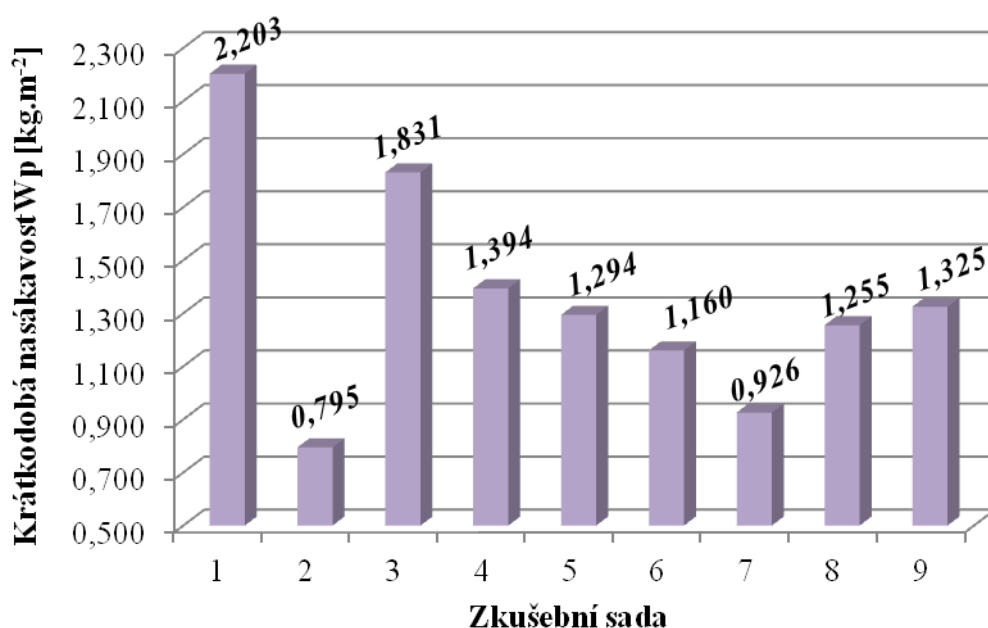
Všechny zkušební sady vykazovaly velmi nízký faktor difúzního odporu, nejnižší hodnota byla zjištěna u zkušební sady č. 1, tedy u sady na bázi jutových vláken, naopak nejvyšší hodnota byla stanovena u zkušební sady č. 7, z konopných vláken s nejvyšší objemovou hmotností.

Krátkodobá nasákavost při částečném ponoření byla stanovena v souladu s ČSN EN 1609 na třech zkušebních tělesech z každé zkušební sady o rozměrech 200 x 200 mm. V daném případě byla zvolena metoda A, metoda odkapání přebytečné vody. Na počátku byla určena počáteční hmotnost zkušebních těles, které pak byla umístěna do nádoby s vodou, výška ponoření vzorků ve vodě byla 10 ± 2 mm. Po 24 hodinách byla zkušební tělesa vyjmuta z nádoby a umístěna po dobu 10 minut na odkapávací rošt. Nakonec byla

zkušební tělesa zvážena a výpočtově zjištěny hodnoty krátkodobé nasákavosti u jednotlivých zkušebních sad, viz obr. 54.

Tab. 30 Průměrné hodnoty krátkodobých nasákavostí při částečném ponoření u jednotlivých zkušebních sad

Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d [mm]	81	77	77	80	67	30	9	40	38
m_0 [g]	80,83	97,16	95,29	86,43	136,86	41,20	39,87	119,48	120,41
m_{24} [g]	168,95	128,94	168,51	140,37	188,63	87,59	76,89	169,67	173,39
W_p [kg.m ⁻²]	2,203	0,795	1,831	1,394	1,294	1,160	0,926	1,255	1,325



Obr. 54 Krátkodobá nasákavost u jednotlivých zkušebních sad

Jak lze vypořádat z grafického zobrazení krátkodobých nasákavostí při částečném ponoření u jednotlivých zkušebních sad, nejnižších hodnot dosáhly sady 2 a 7. Avšak u receptury č. 7 je nutné uvést fakt, že tloušťka zkušební vzorku byla pouhých 9 mm, tedy zkouška byla provedena s ohledem na tento fakt. Hladina vody byla nastavena do výšky 6 mm. Naopak nejvyšší hodnoty byly zjištěny u zkušebních sad 1 a 3. Je nutné však poznamenat, že tato zkušební tělesa nebyla nikterak upravována přísadami zamezujícími nasákavosti a porovnání výsledných hodnot není zcela optimální z hlediska rozdílných tloušťek jednotlivých zkušebních receptur.

4.4 Vyhodnocení etapy IV „Stanovení sorpčních charakteristik a simulace chování vyvinutých materiálů ve stavebních konstrukcích“ a diskuze výsledků

Podmínky prostředí (teplota, relativní vlhkost) výrazně ovlivňují finální vlastnosti stavebních materiálů (především tepelně izolační). Z tohoto důvodu bylo cílem čtvrté etapy posoudit míru vlivu podmínek prostředí na tepelně izolační vlastnosti vyvinutých materiálů, především vlivu teploty a vlhkosti na součinitel tepelné vodivosti při reálných či extrémních podmínkách, tj. při zvýšené vlhkosti, vyšší teplotě prostředí. V daném případě bylo provedeno stanovení sorpčních charakteristik a studium závislosti:

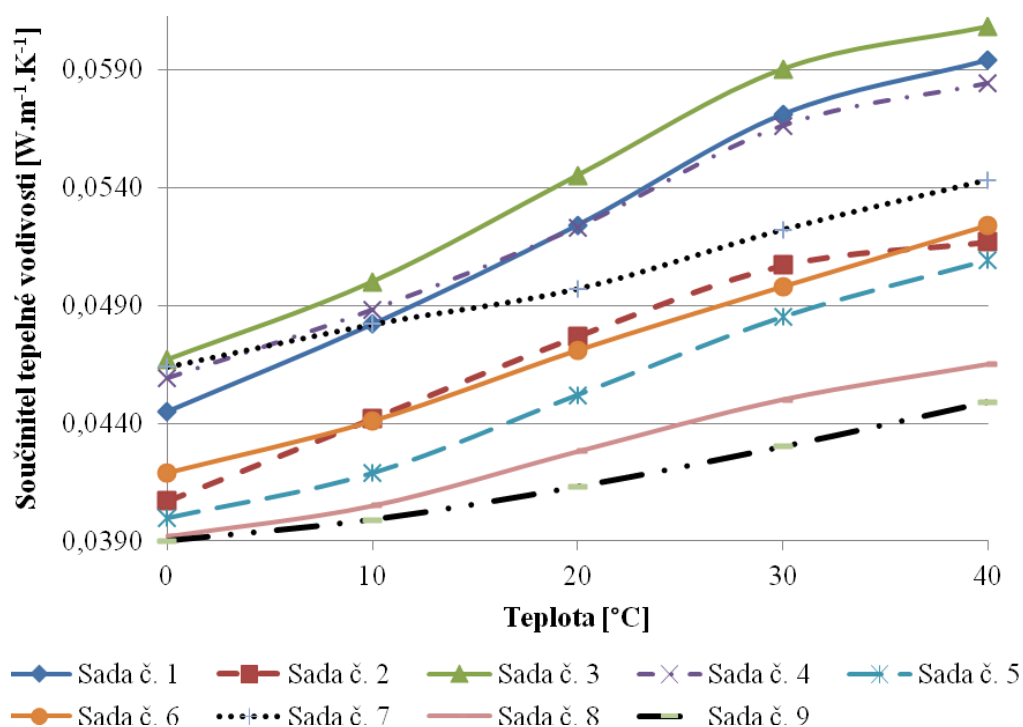
- součinitele tepelné vodivosti na teplotě,
- součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti,
- součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti,
- součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti.

4.4.1 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na teplotě

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno stacionární metodou desky dle ČSN 72 7012-3 a ČSN EN 12667 na přístroji Lambda 2300, Holometrix Micromet Inc., USA. Stanovení součinitele tepelné vodivosti u zkušebních těles o rozměrech 300 x 300 mm bylo provedeno při středních teplotách 0 °C, +10 °C, +20 °C, +30 °C, +40 °C a teplotním spádu 10 K.

Tab. 31 Přehled průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$] při teplotním zatížení u jednotlivých zkušebních sad

<i>Zkušební sada/Teplota</i>	<i>0 °C</i>	<i>10 °C</i>	<i>20 °C</i>	<i>30 °C</i>	<i>40 °C</i>
1	0,0445	0,0482	0,0524	0,0571	0,0594
2	0,0407	0,0442	0,0477	0,0507	0,0517
3	0,0467	0,0500	0,0545	0,0590	0,0608
4	0,0459	0,0488	0,0523	0,0566	0,0584
5	0,0400	0,0419	0,0452	0,0485	0,0509
6	0,0419	0,0441	0,0471	0,0498	0,0524
7	0,0464	0,0482	0,0497	0,0522	0,0543
8	0,0392	0,0405	0,0428	0,0450	0,0465
9	0,0390	0,0399	0,0413	0,0430	0,0449



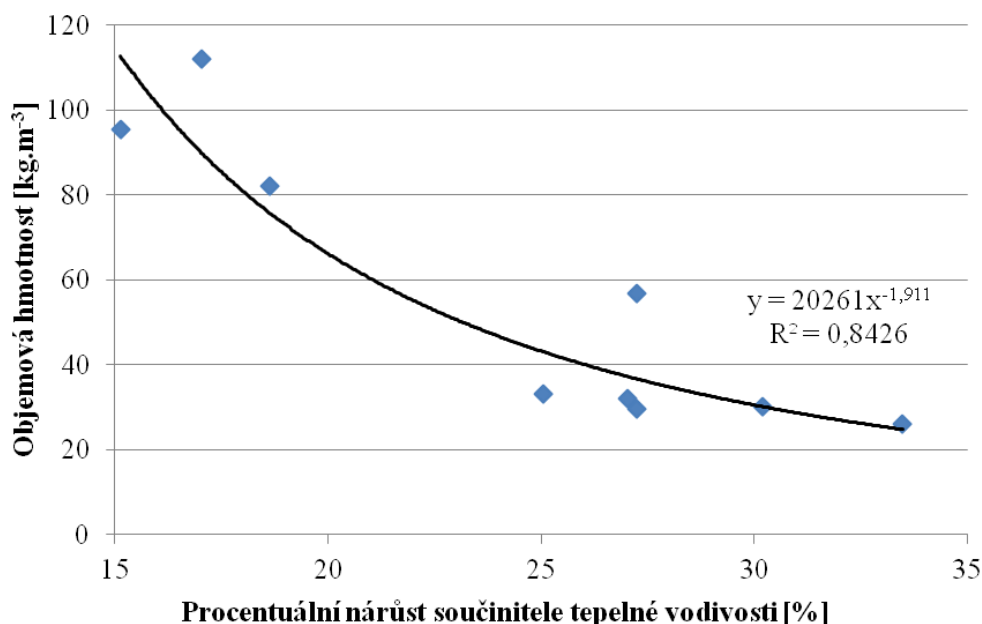
Obr. 55 Závislost součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě

Z grafického vyobrazení lze konstatovat, že nejnižší teplotní citlivost vykazovala zkušební sada č. 9, kde došlo ke zvýšení hodnoty součinitele tepelné vodivosti o 15,13 %. Naopak nejvyšší procentuální nárůst hodnot součinitele tepelné vodivosti byl zaznamenán u zkušební sady č. 1, 33,48 %. V níže uvedené tabulce je přehled procentuálního navýšení součinitele tepelné vodivosti u jednotlivých zkušebních sad.

Tab. 32 Procentuální nárůst součinitele tepelné vodivosti u zkušebních těles

Zkušební sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ [kg.m^{-3}]	26,1	32,1	30,2	29,6	56,8	33,1	112	82,1	95,5
Nárůst hodnoty součinitele tepelné vodivosti [%]	33,48	27,03	30,19	27,23	27,25	25,06	17,03	18,62	15,13

Na následujícím grafu je vyobrazena závislost vlivu objemové hmotnosti na změny součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě.



Obr. 56 Závislost objemové hmotnosti na nárůstu součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě

Z výše uvedené grafické závislosti vlivu objemové hmotnosti zkušebních sad na nárůst součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě lze konstatovat, že zkušební sady s vyšší objemovou hmotností vykazovaly nižší procentuální změnu součinitele tepelné vodivosti (při 0 °C a 40 °C) v porovnání se zkušebními sadami s nižší objemovou hmotností.

Dle níže uvedených tabulek 33 a 34 s vypočtenými návrhovými hodnotami součinitelů tepelné vodivosti při teplotách 10 °C, 20 °C a 30 °C dle ČS EN ISO 10456 a přepočtenými převodními teplotními součiniteli f_T lze konstatovat, že zkušební vzorky byly teplotně citlivější. Při přepočtu součinitele tepelné vodivosti dle teploty byl uvažován materiál „volná buničitá vlákna“, kdy pro objemovou hmotnost menší jak 40 kg.m⁻³ je $f_T = 0,0040$ 1/K, pro objemovou hmotnost větší či rovno jak 40 kg.m⁻³ činí $f_T = 0,0035$ 1/K. V tabulce 34 jsou uvedeny převodní součinitele teploty pro experimentálně zjištěné hodnoty součinitelů tepelné vodivosti, kdy byla uvažována aproximace křivky laboratorních dat součinitelů tepelné vodivosti s hodnotami normovými. Z těchto výsledků lze usuzovat, že u zkušební sady číslo 9 bylo dosaženo ještě nižšího koeficientu, než jaký je uveden v ČSN EN ISO 10456, tzn. je méně teplotně citlivá. Dobrých hodnot f_T bylo dosaženo také u receptur 7 a 8.

Tab. 33 Přehled návrhových hodnot součinitele tepelné vodivosti λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] dle ČSN EN ISO 10456

Zkušební sada/Teplota	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
1	0,0445	0,0463	0,0482	0,0502
2	0,0407	0,0424	0,0441	0,0459
3	0,0467	0,0486	0,0506	0,0527
4	0,0459	0,0478	0,0497	0,0518
5	0,0400	0,0414	0,0429	0,0444
6	0,0419	0,0436	0,0454	0,0472
7	0,0464	0,0481	0,0498	0,0515
8	0,0392	0,0406	0,0420	0,0435
9	0,0390	0,0404	0,0418	0,0433

Tab. 34 Přehled převodních činitelů f_T

Sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_T [1/K]	0,0083	0,0075	0,0077	0,0068	0,0062	0,0057	0,0038	0,0045	0,0031
f_T^* [1/K]	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0035	0,0040	0,0035	0,0035	0,0035

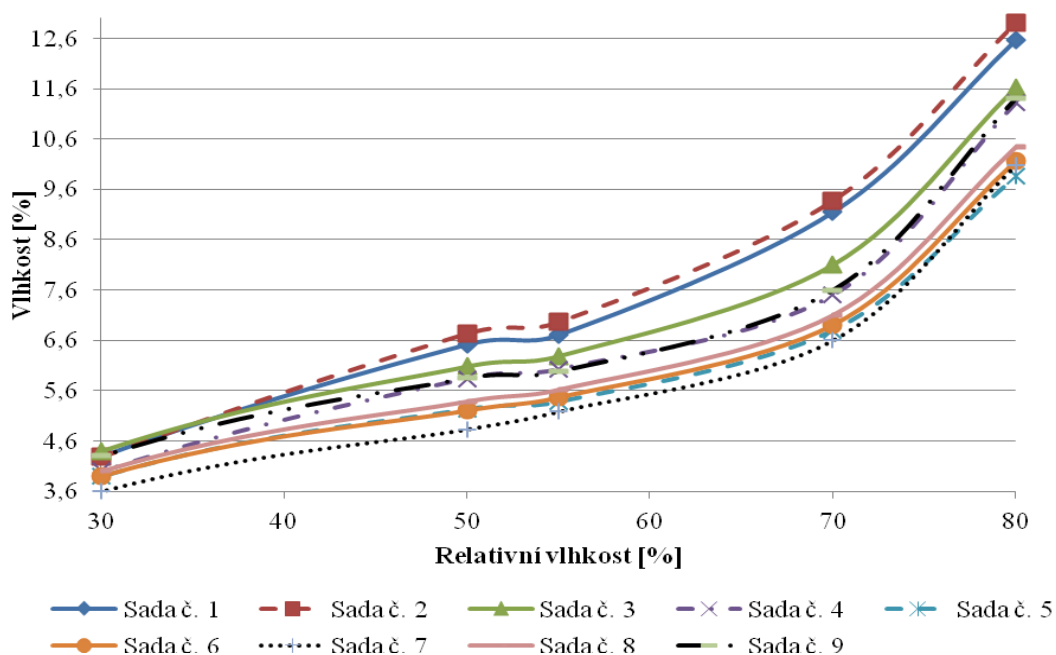
 $f_T^* \dots$ dle ČSN EN ISO 10456

4.4.2 Stanovení rovnovážných sorpčních vlhkostí

Znalost sorpčních vlastností je klíčová pro stanovení vlhkostního obsahu v materiálu po jeho zabudování do konstrukce. Na zkušebních vzorcích bylo provedeno stanovení rovnovážné sorpční vlhkosti při teplotě okolí $23 \pm 0,5$ °C pro relativní vlhkosti 0, 30, 50, 55, 70 a 80 % v souladu s ČSN EN ISO 12571 „Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností“. Vlastní měření bylo vzhledem k velikosti zkušebních těles upraveno. Zkušební tělesa byla uložena v klimatizační komoře o předepsané relativní vlhkosti a teplotě +23 °C. Tato tělesa byla pravidelně vážena při dané relativní vlhkosti prostředí až do ustálení hmotnosti, poté byla relativní vlhkost změněna a měření probíhalo stejným postupem jak v předešlém popisu měření. Z naměřených hodnot, uvedených v tabulce 35, byly sestaveny sorpční izotermy, které jsou znázorněny níže na obr. 57.

Tab. 35 Přehled průměrných hodnot materiálových vlhkostí v % u zkušebních těles při daných relativních vlhkostech vzduchu a teplotě +23°C

Zkušební sada/Relativní vlhkost	0 %	30 %	50 %	55 %	70 %	80 %
1	0	4,30	6,52	6,71	9,15	12,57
2	0	4,28	6,73	6,96	9,37	12,90
3	0	4,40	6,08	6,28	8,10	11,62
4	0	4,00	5,84	6,03	7,50	11,32
5	0	3,90	5,23	5,38	6,80	9,86
6	0	3,90	5,20	5,46	6,90	10,15
7	0	3,60	4,83	5,18	6,60	10,08
8	0	4,00	5,38	5,61	7,10	10,44
9	0	4,30	5,85	5,98	7,60	11,41



Obr. 57 Vyobrazení průběhů ustálených rovnovážných sorpčních vlhkostí u jednotlivých zkušebních vzorků při teplotě 23°C

Na výsledcích měření je patrné, že tepelně izolační materiály z přírodních surovinových zdrojů jsou citlivé na vlhkost prostředí, ve kterém jsou zabudovány. Nicméně v porovnání s ostatními přírodními materiály (dřevo, ovčí vlna, ...) je vlhkostní citlivost izolací

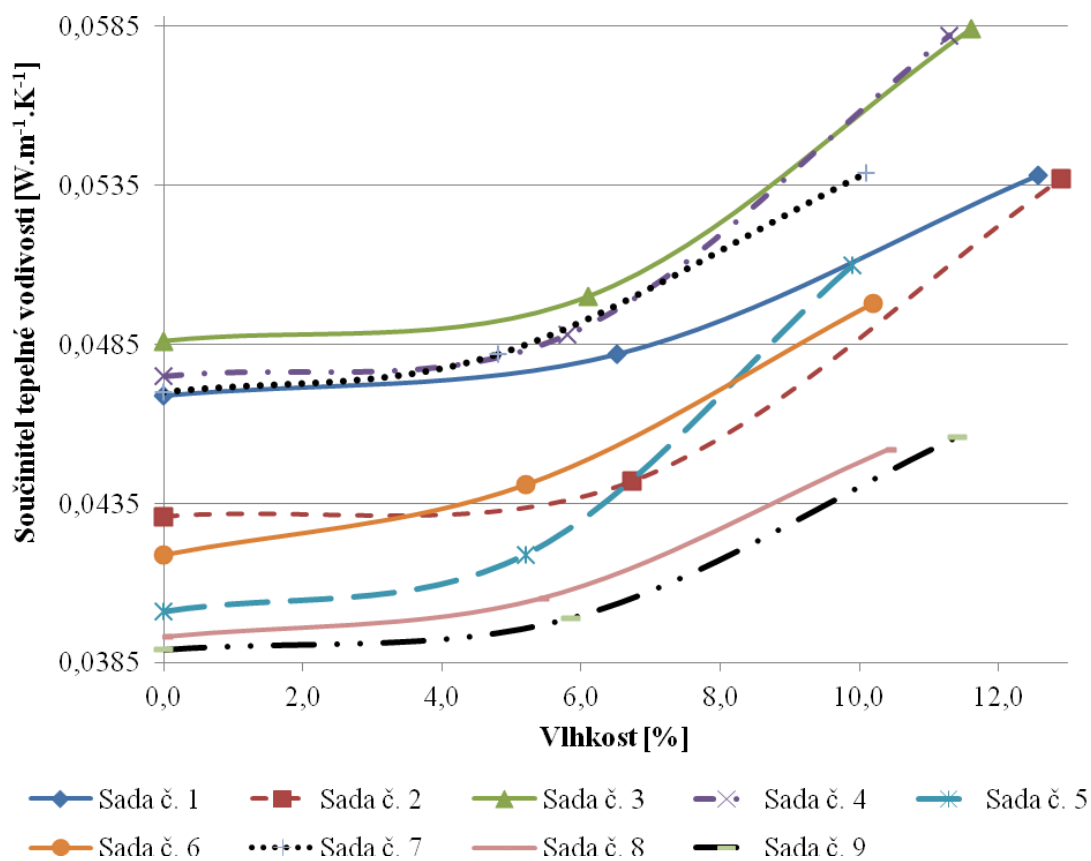
z technického konopí nižší. Nejvyšší citlivost na vlhkost prostředí byla u sady vzorků č. 2 a 1 (zkušební sada vzorků ze lnu a juty), naopak nejmenší citlivost byla zaznamenána u sady vzorků č. 5.

4.4.3 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním obsahu

Pro zjištění závislosti hodnot součinitele tepelné vodivosti u jednotlivých zkušebních těles na vlhkosti byla provedena měření na zkušebních tělesech s různým vlhkostním obsahem v rozsahu příslušných zjištěných sorpčních vlhkostí (viz výše). Zkušební tělesa byla uložena v klimatizační komoře o předepsané relativní vlhkosti a teplotě +23 °C. Tato tělesa byla pravidelně vážena při dané relativní vlhkosti prostředí, až do ustálení hmotnosti. Vlhkost zkušebního tělesa byla výpočtově zjištěna podílem přírůstku hmotnosti zkušebního tělesa a hmotnosti zkušebního tělesa ve vysušeném stavu. Poté bylo zkušební těleso o rozměrech 300 x 300 mm vloženo do přístroje Lambda 2300, Holometrix Micromet Inc., USA, aby bylo provedeno měření součinitele tepelné vodivosti. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce a grafu.

Tab. 36 Přehled průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti u zkušebních těles s danou materiálovou vlhkostí

Sada / Relativní vlhkost		0 %	50 %	80 %
1	w [%]	0,0	6,5	12,6
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0469	0,0482	0,0538
2	w [%]	0,0	6,7	12,9
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0431	0,0442	0,0537
3	w [%]	0,0	6,1	11,6
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0486	0,0500	0,0584
4	w [%]	0,0	5,8	11,3
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0475	0,0488	0,0582
5	w [%]	0,0	5,2	9,9
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0401	0,0419	0,0510
6	w [%]	0,0	5,2	10,2
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0419	0,0441	0,0498
7	w [%]	0,0	4,8	10,1
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0470	0,0482	0,0539
8	w [%]	0,0	5,4	10,4
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0393	0,0405	0,0452
9	w [%]	0	5,85	11,41
	$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	0,0389	0,0399	0,0456



Obr. 58 Závislost součinitele tepelné vodivosti na materiálové vlhkosti u jednotlivých zkušebních sad

Jak je patrné z výše uvedených průběhů součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti, jako nejméně vlhkostně citlivé se jeví zkušební sady 9, 8 a 6, kdy hodnoty součinitele tepelné vodivosti při 80% relativní vlhkosti byly nižší jak $0,050 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Procentuálně vyjádřené změny součinitele tepelné vodivosti v prostředí, kdy byla relativní vlhkost 50 %, se pohybovaly v intervale $<2,55; 5,25> \%$. V případě relativní vlhkosti 80 % byly zjištěny změny součinitele tepelné vodivosti v porovnání s hodnotou součinitele tepelné vodivosti ve vysušeném stavu v intervale $<14,71 \%, 24,59> \%$.

Tyto hodnoty byly porovnány s hodnotami návrhovými dle ČSN EN ISO 10456. Ve výpočtu byl uvažován materiál: Volná buničitá vlákna s převodním součinitelem $f_u = 0,5$, dále hmotnostní obsah vlhkosti při 23 °C a 50 % relativní vlhkosti činil $u = 0,11 \text{ kg.kg}^{-1}$ a hmotnostní obsah vlhkosti při 23 °C a 80 % relativní vlhkosti činil $u = 0,18 \text{ kg.kg}^{-1}$.

Tab. 37 Návrhové hodnoty součinitele tepelné vodivosti dle ČSN EN ISO 10456

<i>Sada / Relativní vlhkost</i>	50 %	80 %
1	0,0496	0,0513
2	0,0455	0,0472
3	0,0513	0,0532
4	0,0502	0,0520
5	0,0424	0,0439
6	0,0443	0,0458
7	0,0497	0,0514
8	0,0415	0,0430
9	0,0411	0,0426

Na základě výše uvedených hodnot lze konstatovat, že experimentálně získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti v případě 50% relativní vlhkosti při teplotě 23 °C byly nižší než hodnoty návrhové. V případě podmínek 80 % relativní vlhkost, teplota 23 °C byly naměřené hodnoty vyšší v porovnání s hodnotami návrhovými. Z toho lze usuzovat, že vyvinuté materiály jsou při relativní vlhkosti 80 % vlhkostně citlivější, což má pak negativní vliv na jejich tepelně izolační funkci. Výše uvedené poznatky potvrzuje i následující tabulka, ve které jsou uvedeny převodní součinitelé vlhkosti.

Tab. 38 Přehled převodních činitelů f_u

<i>Sada</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_u [-]	0,964	1,471	1,376	1,565	2,148	1,567	1,221	1,196	1,218
f_u^* [-]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

f_u^* ... dle ČSN EN ISO 10456

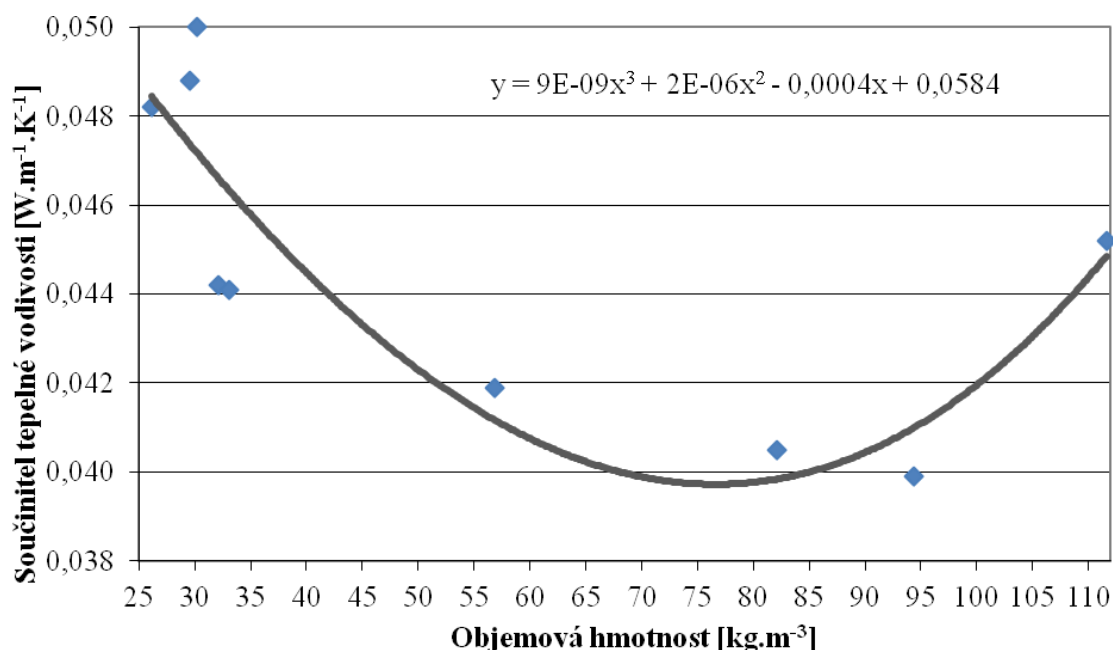
4.4.4 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti

Základním ukazatelem vlastností tepelně izolačních materiálů je jejich objemová hmotnost. Tepelně izolační vlastnosti vláknitých izolačních materiálů jsou závislé na objemové hmotnosti. Tato závislost bohužel není aproximovatelná jednoduchou lineární funkcí a neplatí jednotně pro všechny typy izolantů.

Na základě zjištěných hodnot součinitele tepelné vodivosti za laboratorních podmínek (23 °C, relativní vlhkost 50 %) u jednotlivých 9 zkušebních sad o daných objemových

hmotnostech byla sestavena závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti u izolačních materiálů na bázi přírodních vláken.

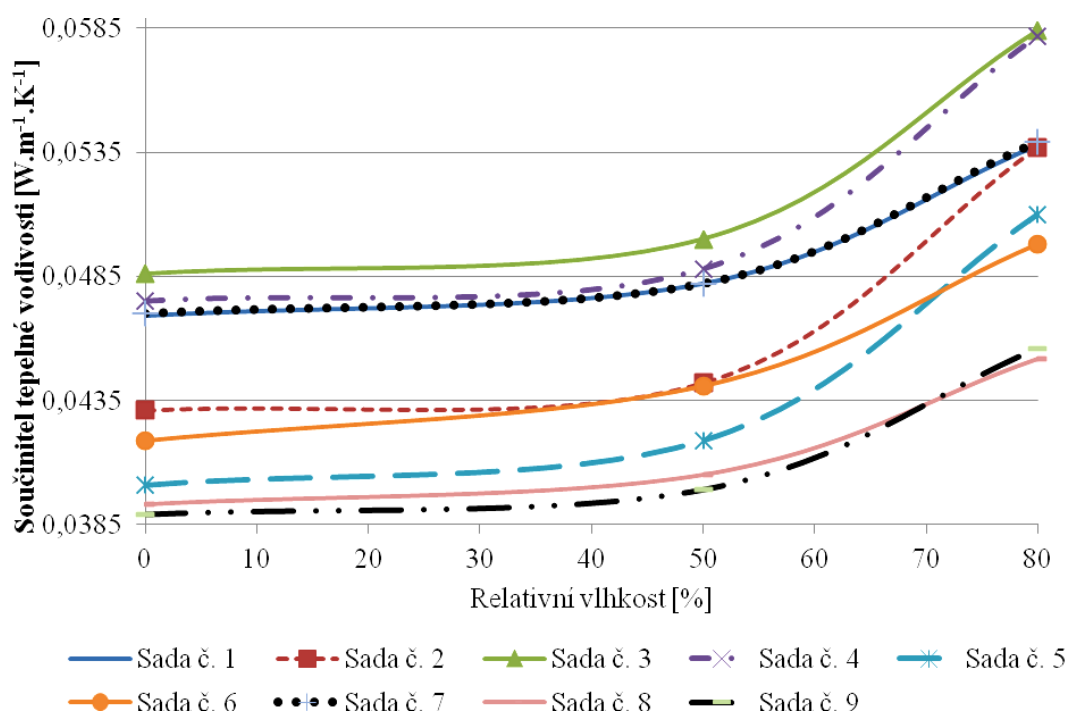
Jak je z grafu na obr. 59 patrné, nejnižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti by mělo být teoreticky dosaženo při objemové hmotnosti 77 kg.m^{-3} . Optimální hodnota objemové hmotnosti, z pohledu tepelně izolačních vlastností, by měla ležet v intervalu od 50 až do 100 kg.m^{-3} .



Obr. 59 Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti zkušebních těles

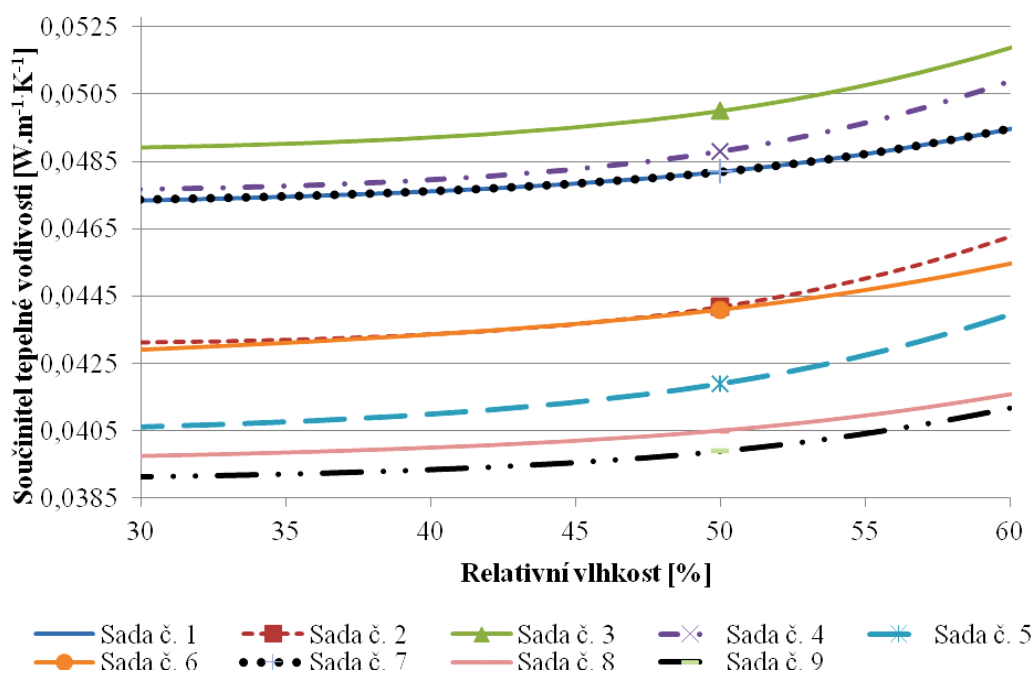
4.4.5 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti vzduchu

Na základě stanovených křivek sorpčních vlhkostí a závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti zkušebních vzorků, byly sestaveny závislosti součinitele tepelné vodivosti u jednotlivých zkušebních těles na relativní vlhkosti prostředí při teplotě $+23^{\circ}\text{C}$. Z grafu na obr. 60 je patrné, že v oblasti nízké a střední relativní vlhkosti vykazují zkušební vzorky nižší citlivost. V oblasti vyšší relativní vlhkosti ($\text{RH} > 60 \%$) se postupně citlivost zkušebních vzorků zvyšuje. Jako nejvíce citlivé se jevily sady vzorků č. 2, 3, 4 a 5.



Obr. 60 Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí

V rámci testování bylo potvrzeno, že tepelně izolační materiály na přírodní bázi jsou citlivé na vlhkost prostředí, v němž jsou zabudovány. Jak bylo dále prokázáno, vlhkostní obsah má zásadní vliv na hodnotu součinitele tepelné vodivosti λ . Nicméně, v oblasti normální vlhkosti prostředí, v němž budou materiály zabudovány (v případě vnitřního zateplení), tedy v oblasti vlhkostí 30–60 %, je vlhkostní citlivost materiálů nižší – viz následující graf, na obr. 61.



Obr. 61 Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí (30 %–60 %)

Jak je z grafu patrné, mají všechny průběhy (v rozsahu relativní vlhkosti 30–60 %) přibližně charakter polynomu 2. stupně. Pokud provedeme polynomicou aproximaci průběhů součinitele tepelné vodivosti v závislosti na relativní vlhkost, obdržíme následující funkční vztahy:

Tab. 39 Přehled aproximovaných vztahů pro jednotlivé zkušební sady

Zkušební sada těles č.	Rovnice regrese [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
1	$\lambda = 0,000002 \varphi^2 - 0,00008 \varphi + 0,0469$
2	$\lambda = 0,000002 \varphi^2 - 0,0002 \varphi + 0,0431$
3	$\lambda = 0,000003 \varphi^2 - 0,0001 \varphi + 0,0486$
4	$\lambda = 0,000004 \varphi^2 - 0,0001 \varphi + 0,0475$
5	$\lambda = 0,000003 \varphi^2 - 0,0001 \varphi + 0,0401$
6	$\lambda = 0,000002 \varphi^2 - 0,00005 \varphi + 0,0419$
7	$\lambda = 0,000002 \varphi^2 - 0,00008 \varphi + 0,0470$
8	$\lambda = 0,000002 \varphi^2 - 0,00006 \varphi + 0,0393$
9	$\lambda = 0,000002 \varphi^2 - 0,00009 \varphi + 0,0389$

Na základě výsledků čtvrté etapy řešení experimentální části disertační práce lze konstatovat, že tepelně izolační materiály na přírodní organické bázi jsou aplikovatelné tam, kde nepřichází do přímého kontaktu s kapalnou vodou a nejsou exponovány v prostředí s relativní vlhkostí vyšší než 60 %, kdy u nich nedochází k výraznému zhoršení tepelně izolačních vlastností. Při vhodně zvolených okrajových podmínkách mohou být tyto materiály tedy bezproblémově použity při rekonstrukcích a sanacích historických stavebních konstrukcí či při zateplování stavebních konstrukcí, kde je kladen důraz na zachování klasických způsobů výstavby a použití snadno obnovitelných zdrojů. Případně mohou být do konstrukce zabudovány v rámci systému, kde budou dostatečně dobře chráněny před vlhkostí.

4.4.6 Optimalizační proces

Pro finální vyhodnocení optimálních zkušebních receptur přírodních izolačních materiálů z pohledu jejich použití ve stavební konstrukci (podlahy, příčky, střechy, případně i fasády) jsou klíčové některé fyzikální, akustické a mechanické parametry.

Pro vyhodnocení vlastností přírodních izolačních materiálů, které byly stanoveny v rámci disertační práce na prototypových zkušebních vzorcích, byla zvolena následující kritéria (klíčové vlastnosti): 1. Objemová hmotnost, 2. Součinitel tepelné vodivosti, 3. Faktor difúzního odporu, 4. Napětí při 10% deformaci, 5. Pevnost v tahu kolmo k rovině desky, 6. Dynamická tuhost, 7. Činitel zvukové pohltivosti.

Vyhodnocení bylo provedeno na základě metody multikriteriálního srovnání. Pro výpočet váhy jednotlivých kritérií f_i [-] byla zvolena metoda kvantitativního párového srovnání. Po výběru jednotlivých kritérií byla provedena volba požadavku na jejich optimum (požadavek maximální nebo minimální hodnoty), viz tab. č. 40. Při volbě optimálních hodnot bylo uvažováno jejich použití ve stavebních konstrukcích, tedy:

1. využití při izolaci podlah (mechanicky zatížené konstrukce),
2. využití v oblasti příček a střech (bez mechanického zatížení).

Využití v oblasti fasád nebylo uvažováno z důvodu absence hydrofobizačního ošetření, které je nutné aplikovat pro správnou funkci těchto materiálů v zateplovacím systému.

Tab. 40 Přehled hodnoticích kritérií a požadavků na jejich optimum

Č.	Název kritéria	Optimum (podlahy)	Optimum (příčky, střechy)	Jednotka
1	Objemová hmotnost	MAX	MIN	kg.m ⁻³
2	Součinitel tepelné vodivosti	MIN	MIN	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
3	Faktor difúzního odporu	MIN	MIN	-
4	Napětí při 10% deformaci	MAX	MAX	kPa
5	Pevnost v tahu kolmo k rovině desky	MAX	MAX	kPa
6	Dynamická tuhost	MIN	-	MPa.m ⁻¹
7	Činitel zvukové pohltivosti	MAX	MAX	-

Na základě výše uvedených kritérií byla sestavena rozhodovací matice A_{ij} , viz tab. 41.

Tab. 41 Rozhodovací matice A_{ij} pro optimalizační proces

Sada/ Vlastnost	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ_v [kg.m ⁻³]	26,1	32,1	30,2	29,6	56,8	33,1	111,6	82,1	95,5
λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0482	0,0442	0,0500	0,0488	0,0419	0,0441	0,0482	0,0405	0,0399
μ [-]	2,1	2,9	2,8	2,2	3,8	3,8	5,3	4,2	3,9
F_c [kPa]	1,0	0,4	0,6	0,5	6,7	0,5	36,9	11,2	21,0
F_t [kPa]	6,3	7,8	15,6	16,23	21,8	23,5	25,0	15,0	18,8
s' [MPa.m ⁻¹]	3,1	3,6	3,0	3,1	4,0	7,2	20,8	7,4	8,5
α_w [-]	0,40	0,40	0,45	0,40	0,55	0,25	0,15	0,35	0,40

Kde: ρ_v ... objemová hmotnost, λ ... součinitel tepelné vodivosti, μ ... faktor difúzního odporu, F_c ... napětí při 10% deformaci, F_t ... pevnost v tahu kolmo k rovině desky, s' ... dynamická tuhost, α_w ... vážený činitel zvukové pohltivosti.

Rozhodovací matice byla transformována pomocí následujících vzorců [79]:

$$\text{Pro určení minima: } b_{ij} = \frac{MAX(a_{ij}) - a_{ij}}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})} \quad (60)$$

$$\text{Pro určení maxima: } b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (61)$$

4.4.6.1 Optimalizační proces pro izolační materiály uplatnitelné při izolaci podlah

Nejprve byla transformována rozhodovací matice z pohledu použití při izolaci podlah, kde jsou vyšší požadavky z hlediska mechanických vlastností (napětí při 10% deformaci), dynamické tuhosti apod. Transformovaná matice B_{ij} je uvedena v tab. 42.

Tab. 42 Transformovaná matice B_{ij} pro použití izolace v podlahách

		<i>Sada 1</i>	<i>Sada 2</i>	<i>Sada 3</i>	<i>Sada 4</i>	<i>Sada 5</i>	<i>Sada 6</i>	<i>Sada 7</i>	<i>Sada 8</i>	<i>Sada 9</i>
<i>Vlastnost/Kritérium</i>	1	0,0000	0,0702	0,0480	0,0409	0,3591	0,0819	1,0000	0,6550	0,8117
	2	0,1782	0,5743	0,0000	0,1188	0,8020	0,5842	0,1782	0,9406	1,0000
	3	1,0000	0,7500	0,7813	0,9688	0,4688	0,4688	0,0000	0,3438	0,4375
	4	0,0164	0,0000	0,0055	0,0027	0,1726	0,0027	1,0000	0,2959	0,5644
	5	0,0000	0,0800	0,4965	0,5323	0,8267	0,9184	1,0000	0,4667	0,6693
	6	0,9944	0,9663	1,0000	0,9944	0,9438	0,7640	0,0000	0,7528	0,6910
	7	0,6250	0,6250	0,7500	0,6250	1,0000	0,2500	0,0000	0,5000	0,6250

V dalším kroce byl proveden výpočet váhy kritérií pomocí metody kvantitativního párového srovnání s použitím stupnice 1 až 10, pro vzájemné srovnání preference kritérií. Kritéria seřazená ve sloupci jsou označena jako kritéria i , kritéria v řádku byla označena jako j . Vysvětlivky numerických určení jsou uvedeny níže v tabulce 43.

Tab. 43 Vysvětlivky k porovnání daných kritérií

<i>Číslo</i>	<i>Porovnání kritérií</i>
1	rovnocenná kritéria
3	slabě preferované kritérium i před j
5	silně preferované kritérium i před j
7	velmi silně preferované kritérium i před j
9	absolutní preference kritéria i oproti kritériu j
2, 4, 6, 8	mezistupně

Pomocí metody kvantitativního párového srovnání, byla vypočtena váha jednotlivých kritérií. Pro výpočet byla použita Saatyho matice – viz tab. 44, kde váha i -tého kritéria f_i [-] se stanovuje z hodnot bodového hodnocení jednotlivých kritérií s_{ij} [-] dle následujících vzorců [79]:

$$S_{ij} = \prod_{j=1}^n s_{ij} \quad R_{ij} = (s_{ij})^n \quad f_i = \frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^n R_{ij}} \quad (62)$$

Tab. 44 Saatyho matice pro použití izolace v podlahách

<i>i/j</i>	1	2	3	4	5	6	7	S_i	R_i	f_i
1	1,00	0,33	3,00	0,20	3,00	0,14	3,00	0,2571	0,8236	0,0766
2	3,00	1,00	3,00	0,20	4,00	0,33	5,00	12,0000	1,4262	0,1327
3	0,33	0,33	1,00	0,14	2,00	0,14	2,00	0,0091	0,5108	0,0475
4	5,00	5,00	7,00	1,00	7,00	1,00	7,00	8575,0000	3,6466	0,3393
5	0,33	0,25	0,50	0,14	1,00	0,14	2,00	0,0017	0,4021	0,0374
6	7,00	3,00	7,00	1,00	7,00	1,00	8,00	8232,0000	3,6254	0,3373
7	0,33	0,20	0,50	0,14	0,50	0,13	1,00	0,0003	0,3135	0,0292
Σ									10,7483	1

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že největší váha byla zvolena pro hodnoty napětí při 10% deformaci a dynamické tuhosti. Naopak nejmenší váha byla přiřazena činiteli zvukové pohltivosti, pevnosti v tahu kolmo k rovině desky a difúznímu odporu.

V následujícím postupu byla určena výpočtová matice C_{ij} , viz tab. 45, která byla získána součinem transformované matice B_{ij} s danými váhami u jednotlivých kritérií f_i .

Tab. 45 Výpočtová matice C_{ij} pro použití izolace v podlahách

Vlastnost/Kritérium		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	0,0000	0,0054	0,0037	0,0031	0,0275	0,0063	0,0766	0,0502	0,0622
	2	0,0236	0,0762	0,0000	0,0158	0,1064	0,0775	0,0236	0,1248	0,1327
	3	0,0475	0,0356	0,0371	0,0460	0,0223	0,0223	0,0000	0,0163	0,0208
	4	0,0056	0,0000	0,0019	0,0009	0,0586	0,0009	0,3393	0,1004	0,1915
	5	0,0000	0,0030	0,0186	0,0199	0,0309	0,0344	0,0374	0,0175	0,0250
	6	0,3354	0,3259	0,3373	0,3354	0,3184	0,2577	0,0000	0,2539	0,2331
	7	0,0182	0,0182	0,0219	0,0182	0,0292	0,0073	0,0000	0,0146	0,0182
	Σ	0,4304	0,4644	0,4204	0,4394	0,5932	0,4064	0,4770	0,5777	0,6835
	%	43,04	46,44	42,04	43,94	59,32	40,64	47,70	57,77	68,35

Na základě výpočtové matice C_{ij} byla vyhodnocena jako optimální, zkušební sada č. 9, kdy bylo použito 49 % konopných vláken, 41 % pazdeří a 10 % pojivových bikomponentních vláken. Tato zkušební receptura byla zvolena díky dobrým mechanickým vlastnostem (napětí při 10% deformaci), nízké hodnotě dynamické tuhosti a nízkému

součiniteli tepelné vodivosti. Hodnoty objemové hmotnosti se pohybovaly v požadovaném intervalu pro dané aplikace izolačního materiálu.

4.4.6.2 Optimalizační proces pro izolace uplatnitelné při izolaci střech, příček

Stejný optimalizační výpočtový postup byl proveden také pro izolace využitelné v oblasti izolací střech či stěnových příček. Nejprve byla určena z rozhodovací matice A_{ij} transformovaná matice B_{ij} , viz tab. 46.

Tab. 46 Transformovaná matice B_{ij} pro použití izolace do střech či příček

		Sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4	Sada 5	Sada 6	Sada 7	Sada 8	Sada 9
Vlastnost/Kritérium	1	1,0000	0,9298	0,9520	0,9591	0,6409	0,9181	0,0000	0,3450	0,1883
	2	0,1782	0,5743	0,0000	0,1188	0,8020	0,5842	0,1782	0,9406	1,0000
	3	1,0000	0,7500	0,7813	0,9688	0,4688	0,4688	0,0000	0,3438	0,4375
	4	0,0164	0,0000	0,0055	0,0027	0,1726	0,0027	1,0000	0,2959	0,5644
	5	0,0000	0,0800	0,4965	0,5323	0,8267	0,9184	1,0000	0,4667	0,6693
	7	0,6250	0,6250	0,7500	0,6250	1,0000	0,2500	0,0000	0,5000	0,6250
	7	0,6250	0,6250	0,7500	0,6250	1,0000	0,2500	0,0000	0,5000	0,6250

Poté byla vyhodnocena Saatyho matice, tab. 47, pro izolace uplatnitelné při izolaci příček, střech. Z této matice pak byly určeny váhy f_{ij} u jednotlivých kritérií.

Tab. 47 Saatyho matice pro použití izolace do střech či příček

i/j	1	2	3	4	5	7	S_i	R_i	f_i
1	1,00	0,25	0,33	1,00	2,00	0,33	0,0556	0,6617	0,0913
2	4,00	1,00	6,00	3,00	5,00	2,00	720,0000	2,5597	0,3530
3	3,00	0,17	1,00	0,33	0,50	0,17	0,0139	0,5428	0,0749
4	1,00	0,33	3,00	1,00	2,00	0,33	0,6667	0,9437	0,1302
5	0,50	0,20	2,00	0,50	1,00	0,25	0,0250	0,5904	0,0814
7	3,00	0,50	6,00	3,00	4,00	1,00	108,0000	1,9520	0,2692
Σ								7,2504104	1

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že největší váha byla zvolena pro hodnoty součinitele tepelné vodivosti a činitele zvukové pohltivosti. Naopak nejmenší váha byla přiřazena difúznímu odporu, pevnosti v tahu kolmo k rovině desky.

Následně byla určena výpočtová matice C_{ij} , viz tab. 48.

Tab. 48 Výpočtová matice pro použití izolace do střech či příček

Vlastnost/Kritérium		Sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4	Sada 5	Sada 6	Sada 7	Sada 8	Sada 9
	1	0,0913	0,0849	0,0869	0,0875	0,0585	0,0838	0,0000	0,0315	0,0172
	2	0,0629	0,2027	0,0000	0,0419	0,2831	0,2062	0,0629	0,3321	0,3530
	3	0,0749	0,0562	0,0585	0,0725	0,0351	0,0351	0,0000	0,0257	0,0328
	4	0,0021	0,0000	0,0007	0,0004	0,0225	0,0004	0,1302	0,0385	0,0735
	5	0,0000	0,0065	0,0404	0,0433	0,0673	0,0748	0,0814	0,0380	0,0545
	7	0,1683	0,1683	0,2019	0,1683	0,2692	0,0673	0,0000	0,1346	0,1683
	Σ	0,3995	0,5185	0,3885	0,4140	0,7357	0,4676	0,2745	0,6004	0,6992
	%	39,95	51,85	38,85	41,40	73,57	46,76	27,45	60,04	69,92

Na základě optimalizace izolačního materiálu aplikovatelného jako izolace do střech či příček byla vyhodnocena jako optimální zkušební sada č. 5, která vykazovala na základě provedených laboratorních měření dobré tepelně izolační, mechanické a akustické vlastnosti. Tato zkušební sada sestává ze 48 % konopných vláken, 32 % pazderí a 20 % bikomponentních vláken.

4.4.7 Simulace tepelně vlhkostního chování vyvinutých přírodních izolací

Laboratorně získaná data vlastností, stěžejních pro vybranou skupinu izolačních materiálů na přírodní bázi, včetně vyhodnocených sorpčních křivek, byly podkladem pro provedené výpočtové simulace jejich tepelně vlhkostního chování v reálné konstrukci. V rámci výpočtů bylo provedeno zhodnocení základních vlastností modelových konstrukcí dle ČSN 73 0540-2. Pro výpočty byly využity výpočtové programy WUFI® 2D a Therm.

Tyto materiály, vzhledem k jejich přírodnímu původu, by mohly nalézt uplatnění při provádění izolací, u dnes hojně rozšířené výstavby dřevostaveb. Z tohoto důvodu byly pro další výpočty zvoleny modelové skladby jednotlivých konstrukcí typických pro dřevostavbu. Pro simulace tepelně vlhkostního chování vyvinutých izolací na bázi přírodních vláken byly zvoleny detaily obvodové stěny, dále pak podlahové konstrukce a obvodové stěny s předstěnou.

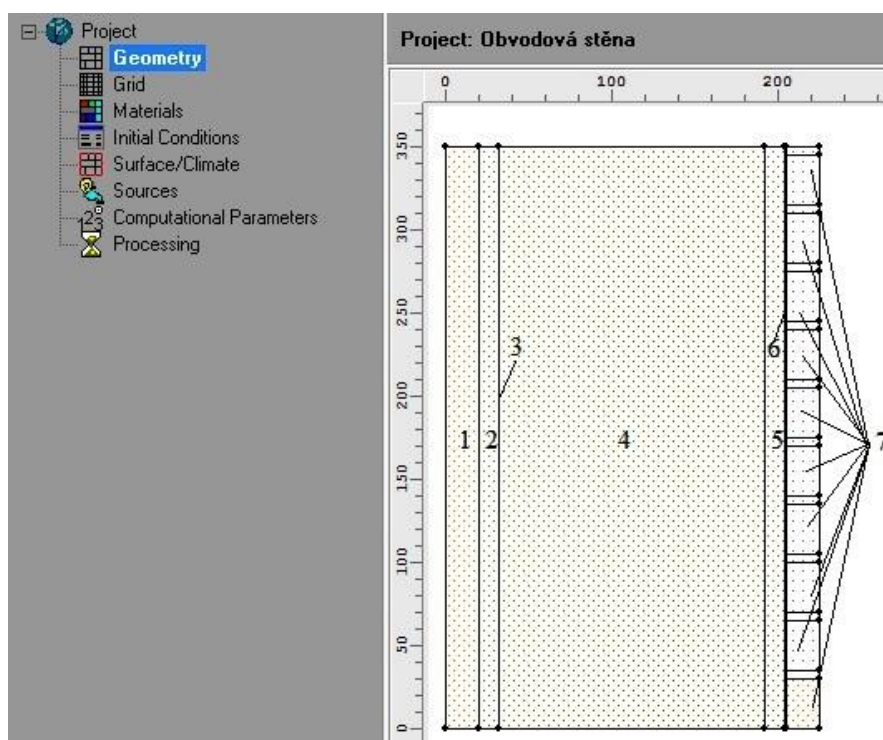
Dále bylo provedeno posouzení skladby stavební konstrukce z hlediska tepelně technického (prostup tepla a vodní páry). Byl vypočten tepelný odpor a součinitel prostupu tepla, dále vnitřní povrchové teploty, pokles dotykové teploty podlahové konstrukce, rozložení teplot a tlaků vodní páry v konstrukci a oblasti možného vzniku kondenzace a

roční bilance zkondenzované vodní páry dle požadavků ČSN 730540-2 a postupů v ČSN 730540-4, ČSN EN ISO 6946 a ČSN EN ISO 13788.

Okrajové podmínky byly zvoleny typicky dle ČSN 73 0540-3 pro Brněnskou oblast a dále byly pro výpočty využity klimatické údaje z databáze programu WUFI pro oblast jižní Moravy (Brno). Z pohledu vnitřního prostředí bylo uvažováno vždy normální užívání konstrukce s návrhovými hodnotami dle ČSN 73 0540-3 a nepřerušované vnitřní vytápění po dobu otopné sezony.

4.4.7.1 Simulace chování obvodové stěny

Pro simulaci tepelně vlhkostního chování v lehké obvodové stěně u dřevostavby byla zvolena zkušební receptura č. 5, tedy zkušební receptura na bázi technického konopí, které bylo v zastoupení 48 hm. %, 32 hm. % tvořil odpad při zpracování konopných stonků označovaný jako pazdeří, zbylých 20 % tvořila pojivová bikomponentní vlákna. Nejprve byl proveden návrh kompozice obvodové stěny u dřevostavby s využitím vyvinuté přírodní izolace, viz detail na následujícím obrázku č. 62 a v tabulce 49. Pro výpočet byl zvolen typický detail konstrukce mimo nosné a výztužné prvky.



Obr. 62 Detail obvodové stěny u dřevostavby ze strany interiéru (1) k exteriéru (7); (1- dubová biodeska; 2- OSB Eurostandard; 3- parotěsná fólie Jutafol Al; 4- konopná izolace; 5- OSB Eurostandard; 6- Fólie Dorken Delta fasade S; 7- dřevěný deskový rošt)

Jednotlivé materiálové vrstvy obvodové stěny byly navrženy o daných tloušťkách, viz tabulka 49.

Tab. 49 Skladba detailu ze strany interiéru

Označení	Materiál	Tloušťka [mm]
1	Dubová biodeska	20
2	OSB Eurostandard	12
3	Parotěsná fólie Jutafol Al	0,3
4	Vyvinutá konopná izolace	160
5	OSB Eurostandard	12
6	Fólie Dorken Delta fasade S (hydroizolace)	1
7	Dřevěný rošt deskový	20

V následující tabulce 50 jsou uvedeny základní charakteristiky pro jednotlivé materiálové konstrukční vrstvy obvodové stěny dřevostavby.

Tab. 50 Vlastnosti jednotlivých vrstev

Označení	Objemová hmotnost [kg.m⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti, návrhová hodnota [W.m⁻¹.K⁻¹]	Faktor difúzního odporu [-]	Pórovitost [%]
1	685	0,180	140	72
2	595	0,130	50	90
3	170	0,390	938600	0,1
4	57	0,051	3,8	95
5	595	0,130	50	90
6	130	0,170	2000	0,1
7	685	0,180	67	72

Jednotlivé vlastnosti byly převzaty z návrhových hodnot vlastností stavebních materiálů v ČSN 73 0540-3 a materiálové databáze programu WUFI, která vychází z materiálových listů výrobců.

Výše uvedený konstrukční detail byl posouzen z hlediska tepelně technického (prostup tepla a vodní páry). Byl vypočten tepelný odpor a součinitel prostupu tepla, dále vnitřní povrchové teploty, rozložení teplot a tlaků vodní páry v konstrukci a oblasti možného vzniku kondenzace a roční bilance zkondenzované vodní páry dle požadavků ČSN 730540-2 a postupů v ČSN 730540-4, ČSN EN ISO 6946 a ČSN EN ISO 13788.

V následující tabulce 51 je uvedeno vyhodnocení tepelně technických vlastností daného konstrukčního detailu.

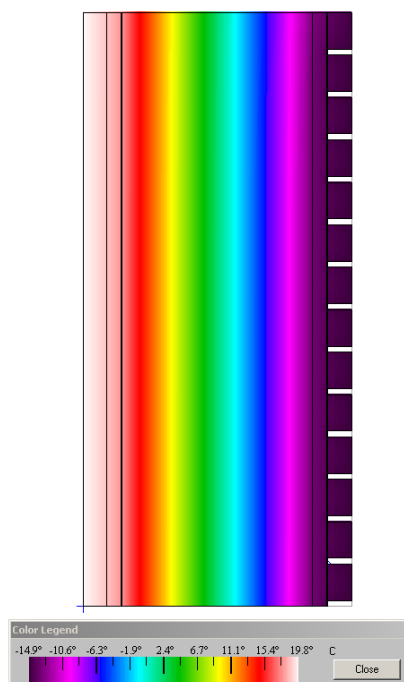
Tab. 51 Tepelně technické vlastnosti konstrukce

Vlastnost	U [W.m ⁻² .K ⁻¹]	R_T [m ² .K ¹ .W ⁻¹]	R [m ² .K ¹ .W ⁻¹]	θ_{sim} [°C]	N_y [-]	P_{si} [hod]
Hodnota	0,2754	3,631	3,466	19,75	34,5	4,7

Kde: U ... součinitel prostupu tepla, R_T ... celkový tepelný odpor, R ... tepelný odpor při přestupu tepla uvnitř konstrukce, θ_{sim} ... minimální povrchová teplota ze strany interiéru, N_y ... teplotní útlum konstrukce, P_{si} ... fázový posun teplotního kmitu.

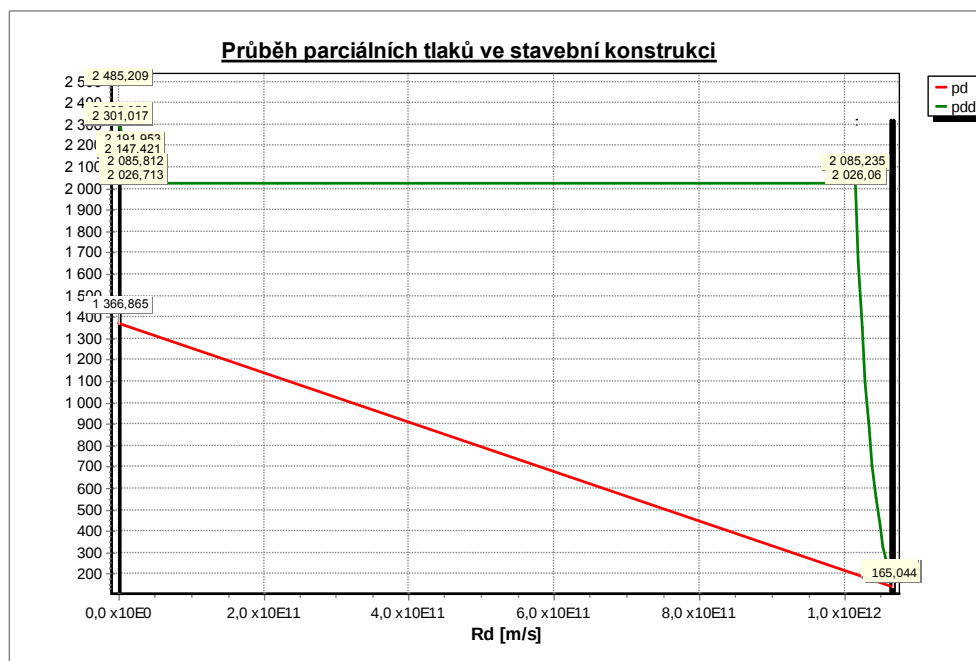
Na níže uvedeném obrázku 63 je zobrazen teplotní průběh v konstrukci při extrémním zatížení. Nejnižší povrchová teplota ze strany interiéru činila 19,75 °C.

Z hodnot uvedených v tabulce č. 51 je patrné, že daná konstrukce vyhovuje požadavkům dle ČSN 73 0540 dle bodů 5.1 a 5.2, tedy z pohledu nejnižší povrchové teploty, a dále z pohledu požadované hodnoty součinitele prostupu tepla (požadovaná nejvyšší hodnota součinitele prostupu tepla $U_{N,20} = 0,30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).



Obr. 63 Teplotní průběh v obvodové stěně při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21$ °C, $\theta_2 = \theta_e = -15$ °C

Na následujícím obrázku 64 je vyobrazen průběh parciálních tlaků vodní páry a nasycené vodní páry v konstrukci v zimním období. Na základě těchto průběhů křivek lze konstatovat, že v konstrukci navržené lehké obvodové stěny nedochází ke kondenzaci vlhkosti a je tedy splněna podmínka ČSN 73 0540-2 dle bodů 6.1 a 6.2.



Obr. 64 Průběh parciálních tlaků v obvodové stěně při okrajových podmínkách:

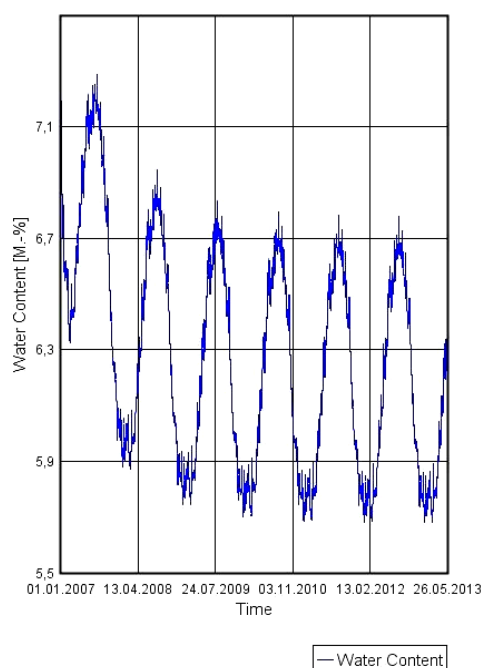
$$\theta_1 = \theta_i = +21 \text{ }^{\circ}\text{C}, \theta_2 = \theta_e = -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Poté byly zadány vstupní a klimatické podmínky pro vlastní simulaci hydrotermálního chování konstrukčního detailu ve výpočtovém programu WUFI. Tepelně vlhkostní chování bylo sledováno pro oblast jižní Moravy (Brno). Při tepelně vlhkostním výpočtu chování konstrukčního detailu bylo započteno jak působení větru, tak i působení dešťových srážek (redukční faktor 0,7). Výpočet ze strany interiéru byl proveden dle ČSN EN 13788, kde byla navržena 2. vlhkostní třída.

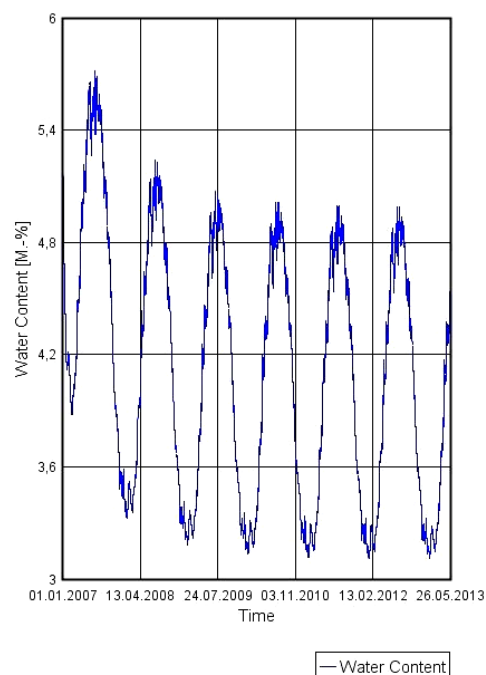
Tepelně vlhkostní chování jak samotné konopné izolace (minerální vlny), tak i celé konstrukce s aplikací konopné izolace (minerální vlny) bylo sledováno pro delší časový úsek, od 1. 1. 2007 do 26. 5. 2013, za účelem zjištění periodicity hydrotermálního chování konstrukčního detailu. Vyhodnocení obsahu vlhkosti v hm. % v celé konstrukci s izolací na bázi konopných vláken celé po sledované období, tj. od 1. 1. 2007 do 26. 5. 2013, je uvedeno na obr. 65. Lze sledovat periodický průběh, kdy se hodnota vlhkosti postupně snižuje a ustaluje se na průměrné hodnotě 6,1 % hm. Průběh vlhkosti ve stejném časovém úseku byl vyhodnocen i pro vyvinutou konopnou izolaci vhodnou pro aplikaci do obvodových stěn, viz obr. 66. Zde byla po ustálení stanovena průměrná vlhkost 3,9 hm. %.

Pro porovnání byla provedena také simulace tepelně vlhkostního chování v současnosti nejčastěji používané vláknité tepelné izolace, minerální vlny ($\rho = 60 \text{ kg.m}^{-3}$, $\lambda = 0,040 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\mu = 1,3$, $P = 95 \text{ } \%$). Také zde lze pozorovat periodický průběh, kdy průměrná hodnota vlhkosti v konstrukčním detailu s využitím minerální vlny po ustálení činila 4,75

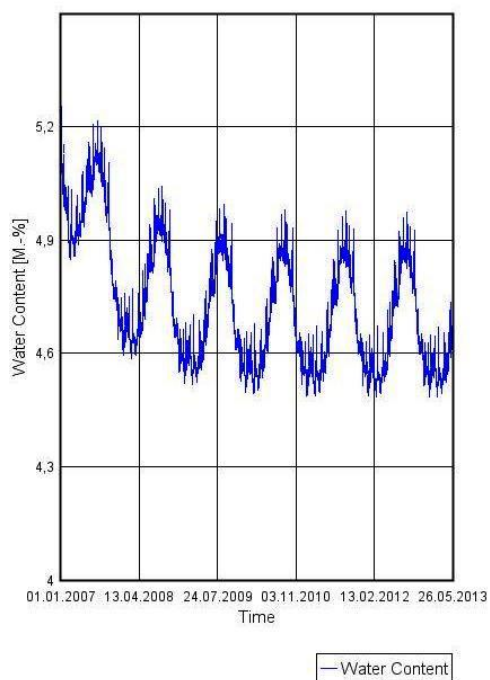
% hm., viz obr. 67. U minerální vlny, zabudované do konstrukce obvodové stěny, byla zjištěna po ustálení průměrná vlhkost 2,0 hm. %, viz obr. 68. Lze však pozorovat menší vlhkostní výkyvy v komparaci z izolací na bázi konopných vláken.



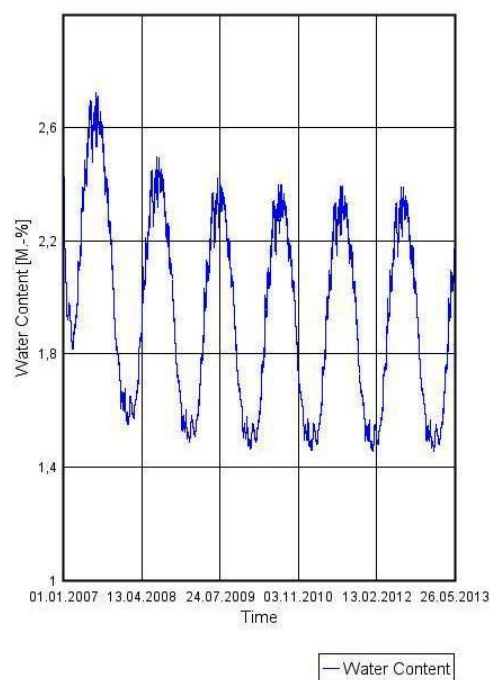
Obr. 65 Obsah vlhkosti v konstrukci s izolací na bázi konopných vláken ve sledovaném období [hm. %]



Obr. 66 Obsah vlhkosti v izolačním materiálu na bázi technického konopí [hm. %]



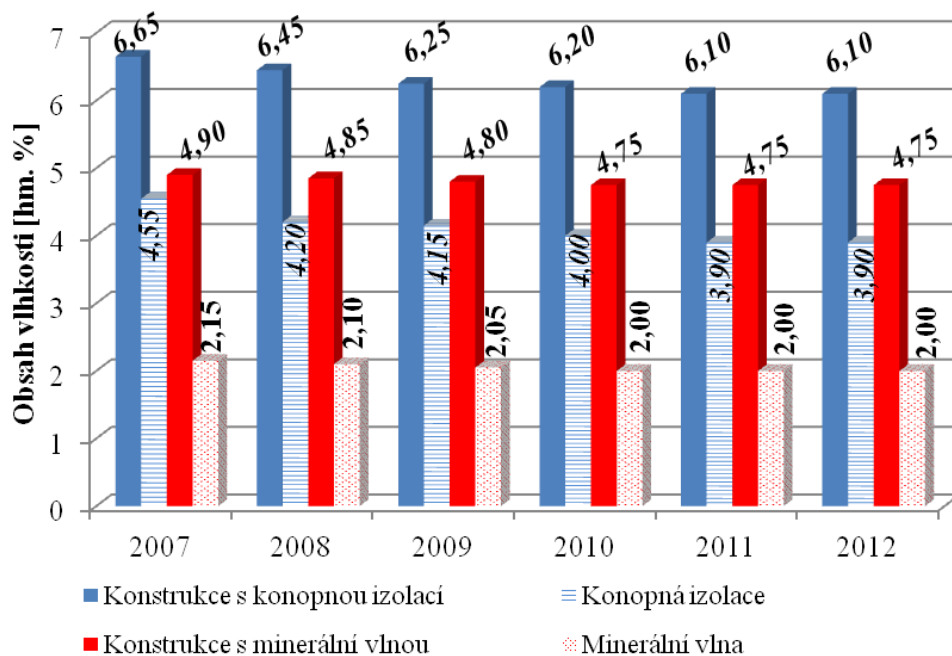
Obr. 67 Obsah vlhkosti v konstrukčním detailu s minerální vlnou [hm. %]



Obr. 68 Obsah vlhkosti v minerální vlně [hm. %]

Vzájemné porovnání průběhu vlhkostí, jak v konstrukci s využitím vybraných izolačních materiálů (konopná izolace, minerální vlna), tak i pouze ve vybraných izolantech, až do ustálení těchto hodnot, je souhrnně uvedeno níže na obrázku 69.

Na základě provedených simulací vlhkostního průběhu v reálné konstrukci s využitím jak nových, vyvinutých přírodních izolačních materiálů na bázi konopných vláken, tak i materiálů klasických (minerální vlna) lze konstatovat, že u izolačního materiálu z technického konopí dochází k větším vlhkostním výkyvům v komparaci s minerální vlnou. Avšak tento vlhkostní průběh vykazuje jistou periodicitu. Z toho průběhu lze vyčíst, že nedochází k navyšování vlhkosti, ať již v samotné konstrukci s aplikací vyvíjeného materiálu, tak i v samotném izolantu na bázi konopných vláken. Navíc po 3 až 4 letech realizace dochází k ustálení průměrné hodnoty vlhkostního obsahu. Při užití minerální vlny do konstrukce dochází k tomuto ustálení dříve, přibližně po 2 letech od realizace. Důvodem rychlejšího vlhkostního ustálení přispívá fakt, že u minerální vlny byl uvažován nižší součinitel difúzního odporu ($\mu = 1,3$) v porovnání se součinitelem difúzního odporu vyvíjené izolace na bázi konopných vláken ($\mu = 3,8$). Zjištěné ustálené hodnoty vlhkostí v hm. % však nikterak nenarušují tepelně izolační schopnosti konstrukčního detailu.

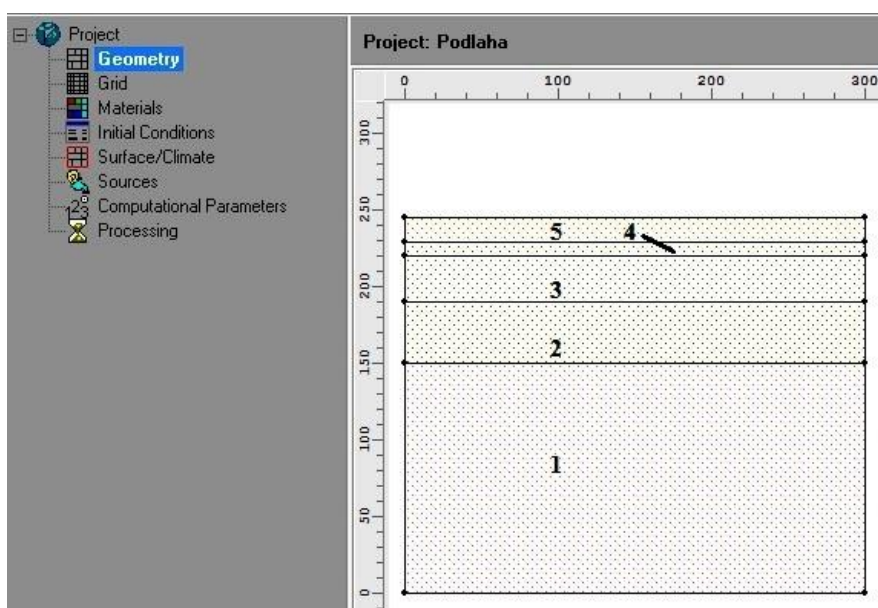


Obr. 69 Porovnání obsahu vlhkosti [hm. %]

4.4.7.2 Simulace chování podlahové konstrukce

Pro simulaci tepelně vlhkostního chování vyvinuté přírodní izolace v podlahové konstrukci byly zvoleny zkušební receptury č. 9 a č. 7. Nejprve byl proveden návrh kompozice podlahy, viz detail na následujícím obrázku č. 70 a v tabulce 52. Tato podlaha byla umístěna mezi dvě místnosti vytápěné na teplotu 20 °C, běžně obývané a větrané.

Jednotlivé materiálové vrstvy podlahové konstrukce byly navrženy o tloušťkách, které jsou uvedeny v následující tabulce 52.



Obr. 70 Detail podlahové konstrukce: 1- železobeton; 2- izolace z technického konopí (receptura č. 9); 3- OSB Eurostandard 4PD; 4- izolace z technického konopí (receptura č. 7); 5- dřevěná plovoucí podlaha

Tab. 52 Skladba podlahové konstrukce

Označení	Materiál	Tloušťka [mm]
5	Dřevěná plovoucí podlaha	16
4	Vyvinutá konopná izolace (receptura 7)	9
3	2 x OSB Eurostandard 4 PD (15 mm)	30
2	Vyvinutá konopná izolace (receptura 9)	40
1	Železobeton	150

Jednotlivé vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce 53, byly převzaty z návrhových hodnot vlastností stavebních materiálů v ČSN 73 0540-3 a materiálové databáze programu WUFI, která vychází z materiálových listů výrobců.

Tab. 53 Vlastnosti jednotlivých vrstev

Označení	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti, návrhová hodnota [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Faktor difúzního odporu [-]	Pórovitost [%]
1	664	1,56	9	67
2	96	0,0456	3,9	95
3	615	0,130	50	90
4	112	0,0539	5,3	95
5	600	0,110	70	50

Výše uvedený konstrukční detail byl posouzen z hlediska tepelně technického. Byl vypočten tepelný odpor, součinitel prostupu tepla, pokles dotykové teploty podlahy, dle požadavků ČSN 730540-2, postupů v ČSN 730540-4, ČSN EN ISO 6946 a ČSN EN ISO 13788. Výpočet vzduchové neprůzvučnosti byl proveden v souladu s ČSN EN ISO 717-1 a ČSN EN 12354-1. Výpočet kročejové neprůzvučnosti byl proveden v souladu s ČSN EN ISO 717-2 a ČSN EN 12354-2.

V následující tabulce 54 je uvedeno vyhodnocení tepelně technických a akustických vlastností daného konstrukčního detailu.

Tab. 54 Tepelně technické a akustické vlastnosti konstrukce

Vlastnost	U [W.m ⁻² .K ⁻¹]	R_T [m ² .K ¹ .W ⁻¹]	R [m ² .K ¹ .W ⁻¹]	$\Delta\theta_{10,N}$ [°C]	L_{nw} [dB]	CI [dB]	R_w [dB]	C [dB]
Hodnota	0,5784	1,729	1,459	2,93	47	2	54	-2

Kde: U ... součinitel prostupu tepla, R_T ... celkový tepelný odpor, R ... tepelný odpor při prostupu tepla vnitřní částí konstrukce, $\Delta\theta_{10,N}$... pokles dotykové teploty podlahy, L_{nw} ... vážená normalizovaná hladina kročejového zvuku, CI ... faktor přizpůsobení spektru, R_w ... vážená vzduchová neprůzvučnost (laboratorní), C ... faktor přizpůsobení spektru.

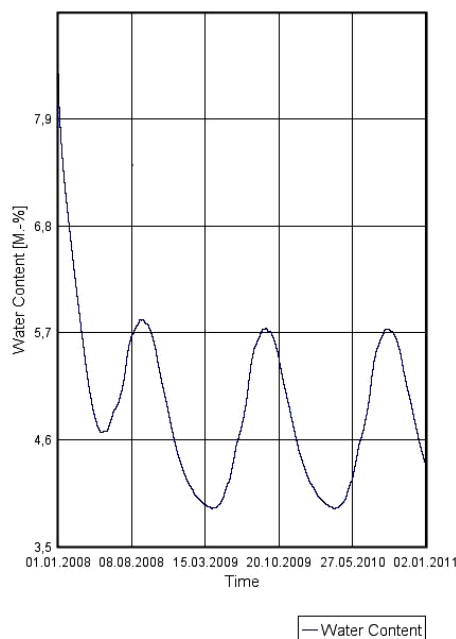
Vzhledem k tomu, že se jedná o dělicí konstrukci mezi dvěma vnitřními prostory vytápěnými na stejnou teplotu, splňuje daná konstrukce požadavky dle ČSN 73 0540 dle bodů 5.1 a 5.2, tedy z pohledu nejnižší povrchové teploty, a dále z pohledu požadované hodnoty součinitele prostupu tepla (požadovaná nejvyšší hodnota součinitele prostupu tepla $U_{N,20} = 1,05 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

Na základě hodnoty poklesu dotykové teploty podlahy, která byla nižší jak 3,8 °C, lze tuto podlahu zařadit dle ČSN 730540-2 do kategorie I., tj. velmi teplé podlahy.

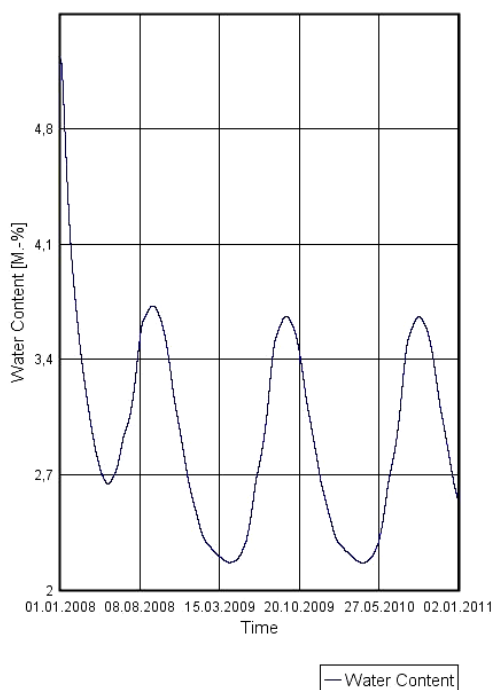
Z pohledu akustických vlastností bylo provedeno zhodnocení konstrukce dle ČSN 73 0532 a lze konstatovat, že konstrukce splňuje požadované hodnoty v oblasti kročejové

i vzduchové neprůzvučnosti (požadovaná maximální hladina akustického tlaku kročejového hluku $L'_{n,w} = 63$ dB a požadovaná minimální hodnota vzduchové neprůzvučnosti $R'_w = 47$ dB)

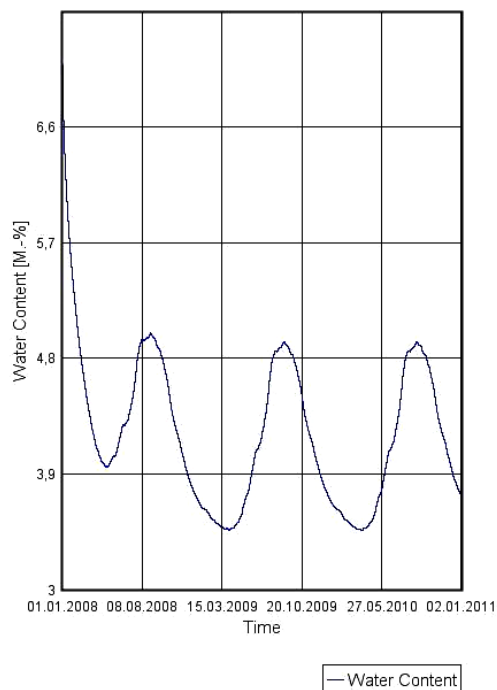
Cílem simulace vlhkostního chování podlahové konstrukce bylo zjištění obsahu vlhkosti v hm. % v celé podlahové konstrukci a ve vyvinutých izolačních materiálech (vrstva 2 a 4) v období od 1. 1. 2008 do 2. 1. 2011, viz obr. 71, 72 a 73.



Obr. 71 Obsah vlhkosti v podlahové konstrukci [hm. %]

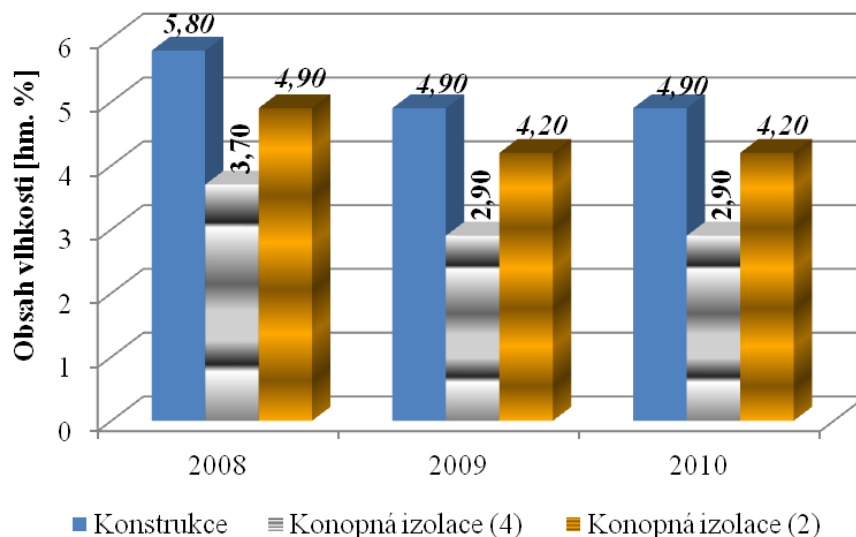


Obr. 72 Obsah vlhkosti v konopné izolaci (4) [hm. %]



Obr. 73 Obsah vlhkosti v konopné izolaci (2) [hm. %]

Ve všech případech lze pozorovat periodický průběh obsahu vlhkosti v hm. %, avšak po 1,5 roce od realizace dochází k ustálení vlhkosti ve sledovaném detailu. Ustálená průměrná vlhkost v podlahové konstrukci činila v průměru 4,9 hm. %. V izolační vrstvě ozn. 4 (receptura 7) byla stanovena ustálená vlhkost 2,9 hm. % a v izolační vrstvě ozn. 2 (receptura 9) byla stanovena ustálená vlhkost 4,2 hm. %.



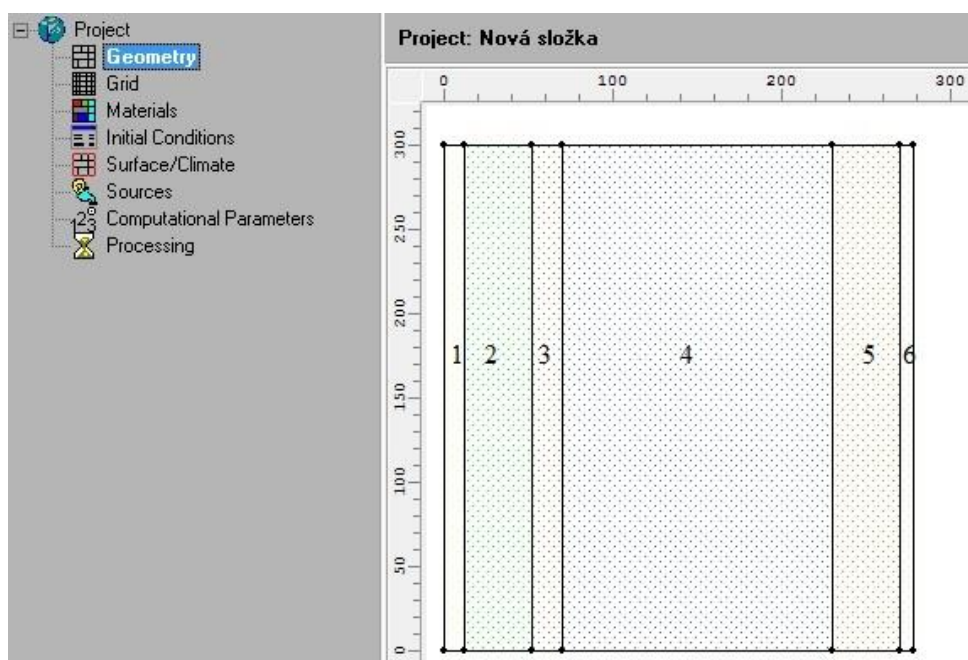
Obr. 74 Porovnání obsahu vlhkosti [hm. %]

Na základě výše uvedených hodnot vlhkostí lze konstatovat, že vlhkosti se pohybují v intervale, ve kterém nedochází k výrazným změnám tepelně izolačních vlastností vyvinutých materiálů.

4.4.7.3 Simulace chování obvodové stěny s předstěnou

Pro simulaci tepelně vlhkostního chování obvodové stěny s předstěnou byla zvolena zkušební receptura č. 5, tedy zkušební receptura na bázi technického konopí, které bylo v zastoupení 48 hm. %, 32 hm. % tvořil odpad při zpracování konopných stonků označovaný jako pazdeří, zbylých 20 % tvořila pojivová bikomponentní vlákna. Nejprve byl proveden návrh kompozice obvodové stěny s předstěnou s využitím vyvinuté přírodní izolace, viz detail na následujícím obrázku č. 75 a v tabulce 55. Do konstrukce byla zabudována také ovčí vlna, další izolační materiál na přírodní bázi, který je charakteristický dobrými sorpčními vlastnostmi. Výběr materiálů proběhl s ohledem na dostupnou databázi materiálů v rámci výpočtového programu.

Jednotlivé materiálové vrstvy obvodové stěny s předstěnou byly navrženy o daných tloušťkách, viz tabulka 55.



Obr. 75 Detail obvodové stěny s předstěnou ze strany interiéru (1) k exteriéru (6); (1- Sádroláknitá deska; 2- Tepelná izolace z ovčí vlny; 3- OSB; 4- Konopná izolace; 5- Dřevoláknitá deska; 6- Silikonovo-pryskyřičná omítka)

Tab. 55 Skladba detailu ze strany interiéru

Označení	Materiál	Tloušťka [mm]
1	Sádroláknitá deska	12,5
2	Tepelná izolace z ovčí vlny	40
3	OSB stavební	18
4	Vyvinutá konopná izolace (receptura č. 5)	160
5	Dřevoláknitá deska	40
6	Silikonovo-pryskyřičná omítka	7

V následující tabulce 56 jsou uvedeny základní charakteristiky pro jednotlivé materiálové konstrukční vrstvy obvodové stěny dřevostavby.

Tab. 56 Vlastnosti jednotlivých vrstev

Označení	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti, návrhová hodnota [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Faktor difúzního odporu [-]	Pórovitost [%]
1	850	0,220	9	65
2	50	0,038	3	95
3	615	0,130	200	90
4	57	0,051	3,9	95
5	300	0,050	12,5	80
6	1750	0,870	52,5	24

Jednotlivé vlastnosti byly převzaty z návrhových hodnot vlastností stavebních materiálů v ČSN 73 0540-3 a materiálové databáze programu WUFI, která vychází z materiálových listů výrobců.

Výše uvedený konstrukční detail byl posouzen z hlediska tepelně technického (prostup tepla a vodní páry). Byl vypočten tepelný odpor a součinitel prostupu tepla, dále vnitřní povrchové teploty, rozložení teplot a tlaků vodní páry v konstrukci a oblasti možného vzniku kondenzace a roční bilance zkondenzované vodní páry dle požadavků ČSN 730540-2 a postupů v ČSN 730540-4, ČSN EN ISO 6946 a ČSN EN ISO 13788.

V následující tabulce 57 je vyhodnocení tepelně technických vlastností daného konstrukčního detailu.

Tab. 57 Tepelně technické vlastnosti konstrukce

Vlastnost	U [W.m ⁻² .K ⁻¹]	R_T [m ² .K ¹ .W ⁻¹]	R [m ² .K ¹ .W ⁻¹]	θ_{sim} [°C]	N_y [-]	P_{si} [hod]
Hodnota	0,1866	5,359	5,194	20,16	115,7	9,3

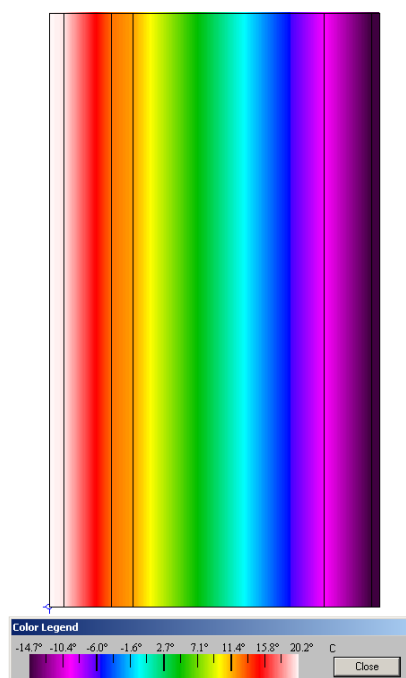
Kde: U ... součinitel prostupu tepla, R_T ... celkový tepelný odpor, R ... tepelný odpor, θ_{sim} ... minimální povrchová teplota ze strany interiéru, N_y ... teplotní útlum konstrukce, P_{si} ... fázový posun teplotního kmitu.

Z hodnot uvedených v tabulce č. 57 je patrné, že daná konstrukce vyhovuje požadavkům dle ČSN 73 0540 dle bodů 5.1 a 5.2, tedy z pohledu nejnižší povrchové teploty, a dále z pohledu požadované hodnoty součinitele prostupu tepla (požadovaná nejvyšší hodnota součinitele prostupu tepla $U_{N,20} = 0,30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

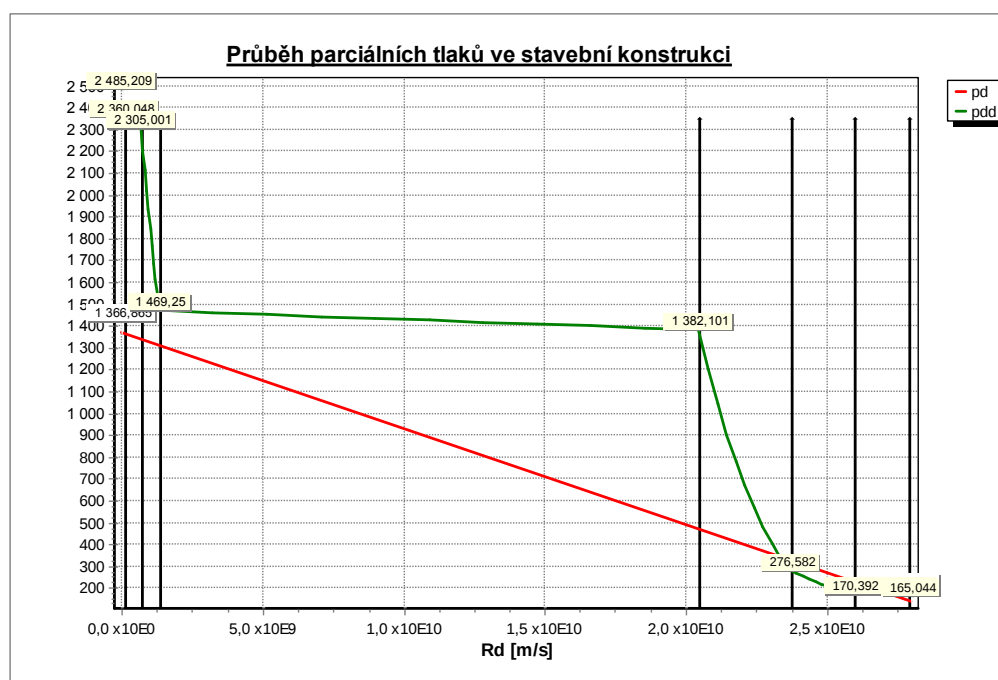
Na níže uvedeném obrázku 76 je zobrazen teplotní průběh v konstrukci při extrémním zatížení. Nejnižší povrchová teplota ze strany interiéru činila 20,16 °C.

Na obrázku 77 je vyobrazen průběh parciálních tlaků vodní páry a nasycené vodní páry v konstrukci v zimním období. Na základě těchto průběhů křivek lze říci, že v konstrukci navržené obvodové stěny s předstěnou dochází ke kondenzaci vlhkosti.

Vzhledem k tomu, že v konstrukci dochází ke kondenzaci vlhkosti, bylo nutné ověřit splnění požadavků dle ČSN 730540-2 (body 6.1 a 6.2). Tedy pro množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce musí platit: $M_c \leq M_{c,N}$. Pro daný konstrukční detail je uvažován $M_{c,N}$ roven 0,10 kg.m⁻².rok⁻¹. Dále musí být splněna podmínka, že množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce M_c musí být menší než roční množství vypařitelné vodní páry uvnitř konstrukce M_{ev} .



Obr. 76 Teplotní průběh v obvodové stěně při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21$ °C, $\theta_2 = \theta_e = -15$ °C



Obr. 77 Průběh parciálních tlaků v obvodové stěně při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21$ °C, $\theta_2 = \theta_e = -15$ °C

Difúze vodní páry a bilance vlhkosti byla posouzena dle ČSN 730540 bez vlivu zabudované vlhkosti a sluneční radiace.

Při stanovení celoroční bilance vlhkosti bylo zjištěno, že:

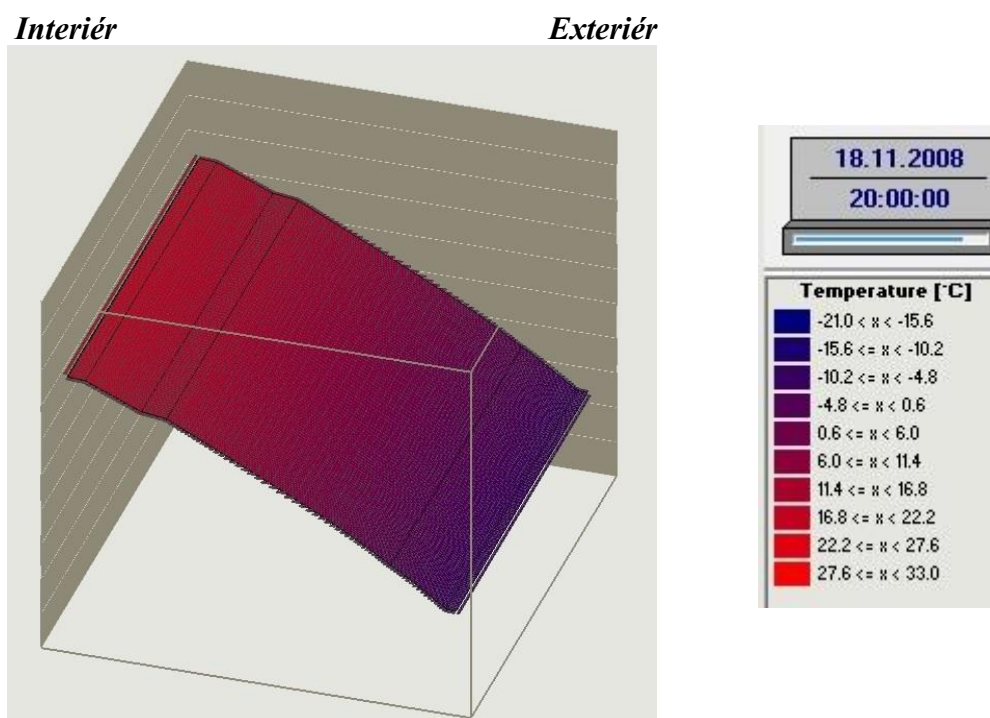
- množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}$ činí $0,076 \text{ kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$,

- množství vypařitelné vodní páry $M_{ev,a}$ činí $5,052 \text{ kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$.

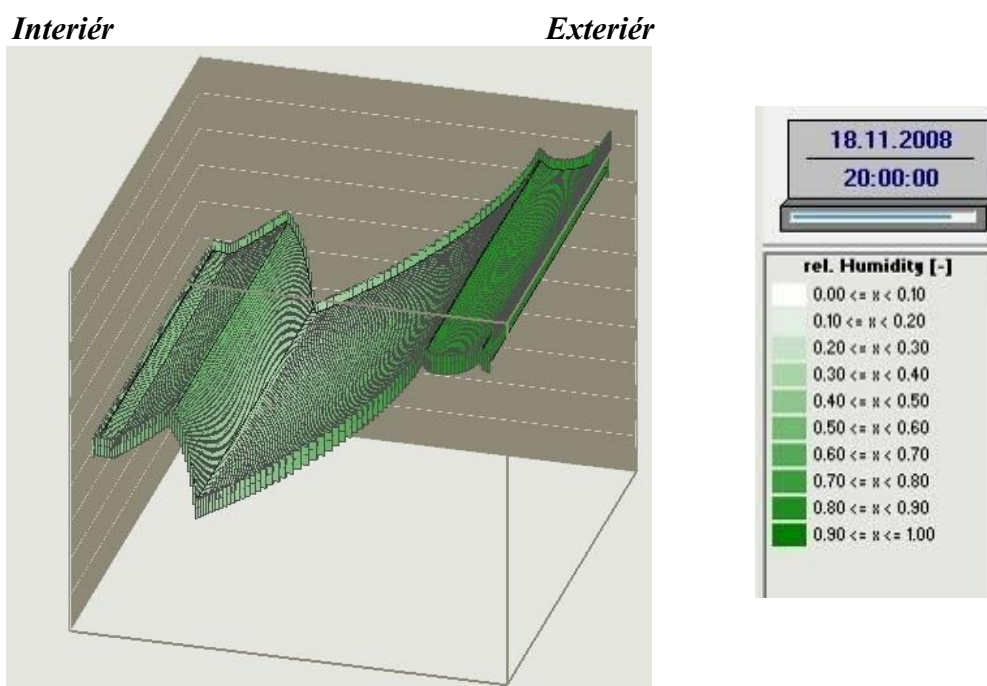
Ke kondenzaci dochází při teplotě exteriéru nižší než $0,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Požadavky dle ČSN 730540-2 (body 6.1 a 6.2) byly tedy z hlediska bilance vlhkosti byly splněny.

Poté byly zadány vstupní a klimatické podmínky pro vlastní simulaci hydrotermálního chování konstrukčního detailu ve výpočtovém programu WUFI. Tepelně vlhkostní chování bylo sledováno pro oblast jižní Moravy (Brno). Při tepelně vlhkostním výpočtu chování konstrukčního detailu bylo započteno jak působení větru, tak i působení dešťových srážek (redukční faktor 0,7). Výpočet ze strany interiéru byl proveden dle EN 13788, kde byla navržena 2. vlhkostní třída.

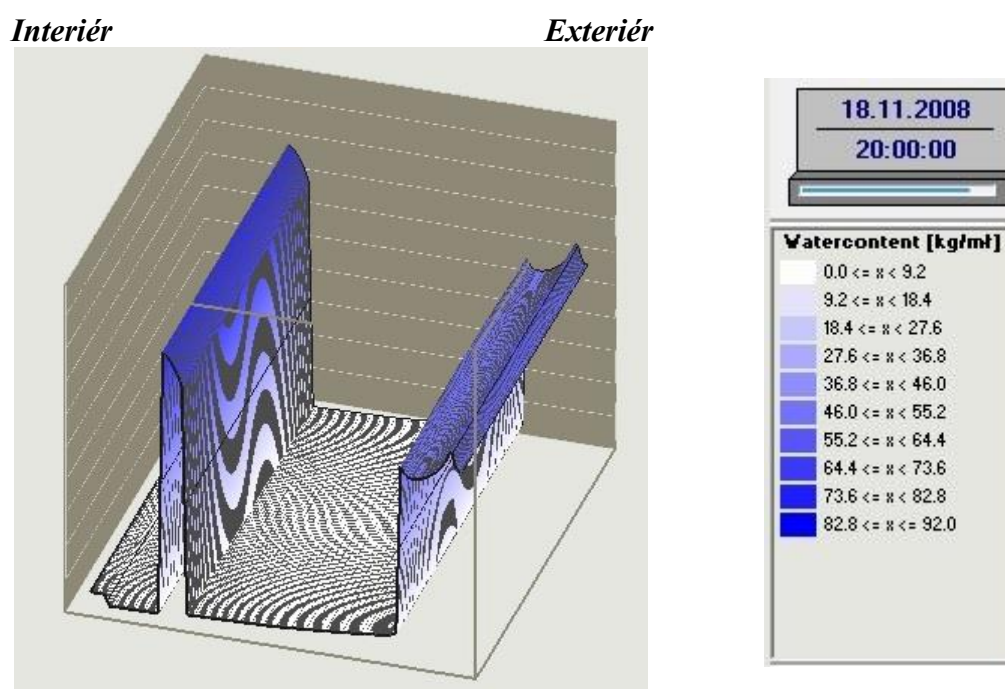
Tepelně vlhkostní chování konopné izolace, tak i celé konstrukce bylo sledováno pro delší časový úsek, od 1. 1. 2008 do 28. 7. 2012, za účelem zjištění periodicity hydrotermálního chování konstrukčního detailu. Cílem bylo získat přehled možného chování vyvinutého materiálu v reálné konstrukci na základě vyhodnocení simulací pro různá roční období. Vybrané detaily teplotních a vlhkostních průběhů v konstrukci jsou uvedeny na obrázcích níže. Jednotlivé simulace byly zvoleny ve vybraných dnech, kdy bylo typické počasí pro dané období.



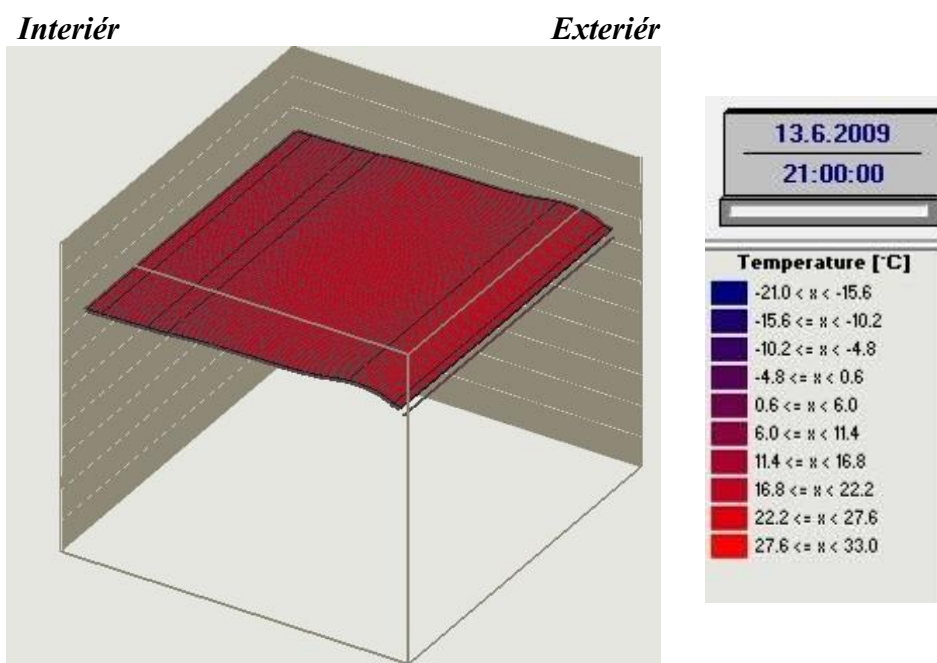
Obr. 78 Teplotní průběh v konstrukci dne 18. 11. 2008, v 20:00



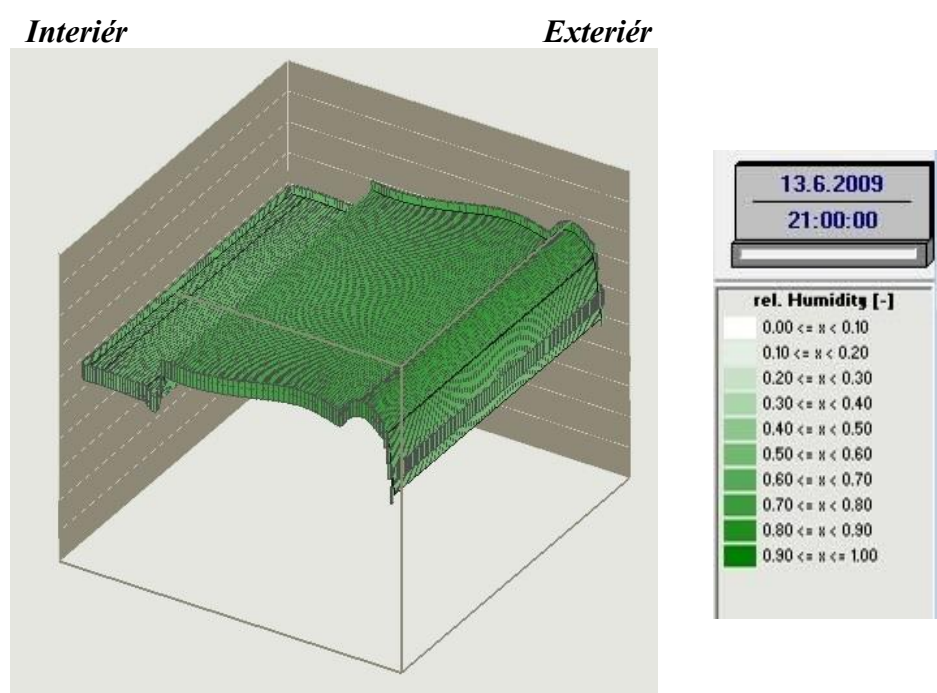
Obr. 79 Relativní vlhkost v konstrukci dne 18. 11. 2008, v 20:00

Obr. 80 Vlhkostní obsah [kg.m⁻³] v konstrukci dne 18. 11. 2008, v 20:00

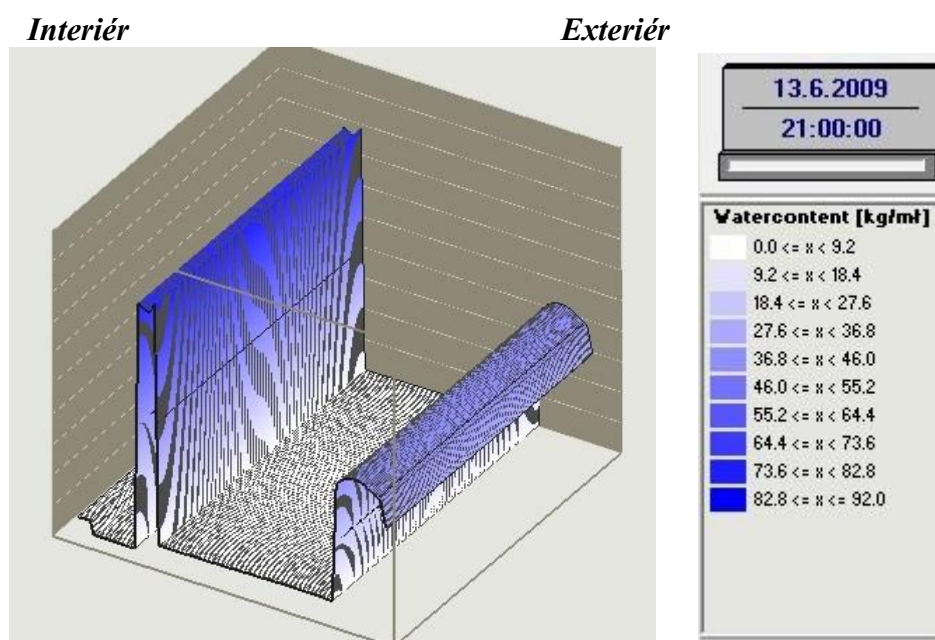
Na následujících obrázcích jsou výsledky teplotního a vlhkostního chování konstrukčního detailu pro vybraný přelom jarního a letního období, konkrétně pro 13. 6. 2009.



Obr. 81 Teplotní průběh v konstrukci dne 13. 6. 2009, v 21:00



Obr. 82 Relativní vlhkost v konstrukci dne 13. 6. 2008, v 21:00

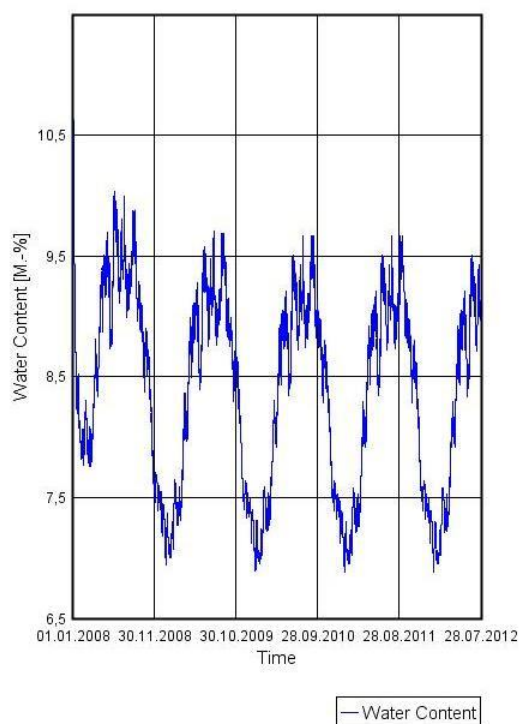


Obr. 83 Vlhkostní průběh v konstrukci dne 13. 6. 2009, v 21:00

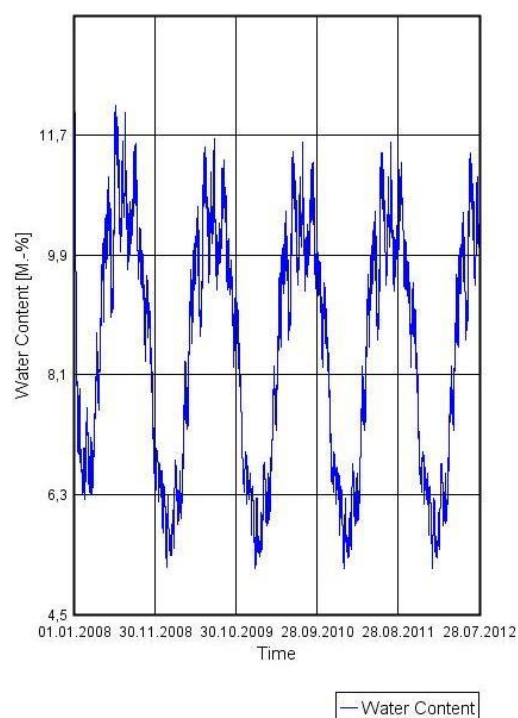
Dále bylo provedeno vyhodnocení obsahu vlhkosti v hm. % v celé konstrukci s konopnou izolací po celé sledované období, tj. od 1. 1. 2008 do 28. 7. 2012, viz obr. 84. Lze sledovat periodický průběh vlhkostního obsahu, kdy se hodnoty materiálové vlhkosti po prvním roce mírně snižují a ustalují na průměrné hodnotě vlhkosti v konstrukci 8,35 hm. %. Průběh vlhkosti ve stejném časovém úseku byl vyhodnocen i pro vyvinutou konopnou izolaci vhodnou pro aplikaci do obvodových stěn, viz obr. 85. Zde byla stanovena ustálená průměrná vlhkost 8,55 hm. %. Jako pozitivní lze však hodnotit, že vlhkostní průběh vykazuje periodický průběh a nedochází k nárůstu vlhkosti.

Pro porovnání byla provedena také simulace tepelně vlhkostního chování v současnosti nejčastěji používané vláknité tepelné izolace, minerální vlny a rovněž bylo provedeno vyhodnocení obsahu vlhkosti v konstrukci s minerální vlnou, viz obr. 86. Také zde lze pozorovat periodický průběh. Ustálená hodnota průměrné vlhkosti v konstrukci s aplikací minerální vlny byla rovna 4,1 hm. %. Průměrná, ustálená hodnota vlhkosti minerální vlny, zabudované do konstrukce, byla 7,7 hm. %, viz obr. 87.

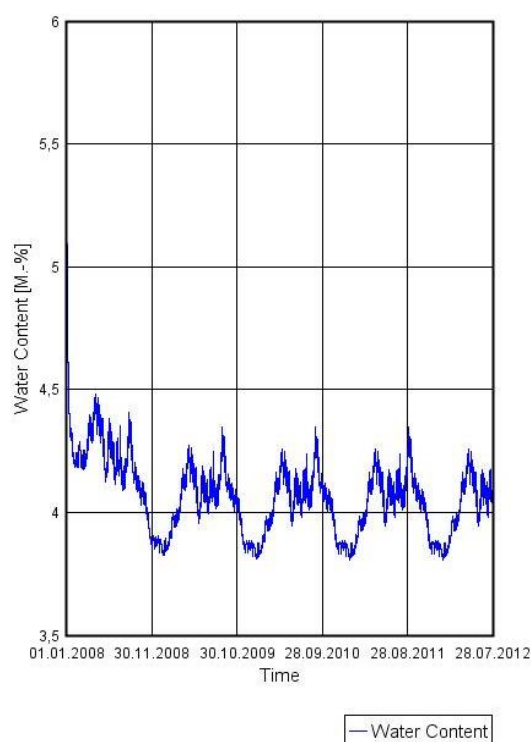
Na základě průběhů vlhkosti v konstrukci a izolačních materiálech (konopná izolace, minerální vlna) byly tyto hodnoty vzájemně porovnány, viz obr. 88.



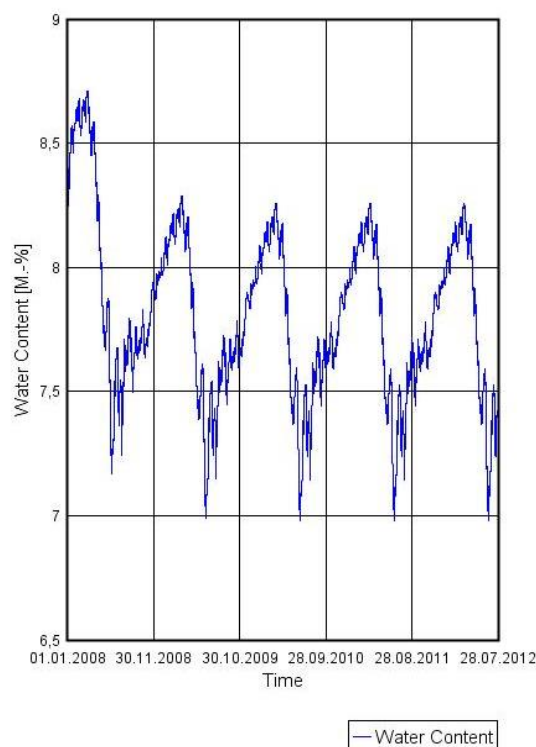
Obr. 84 Obsah vlhkosti v konstrukci s izolací na bázi konopných vláken ve sledovaném období [hm. %]



Obr. 85 Obsah vlhkosti v izolaci na bázi technického konopí [hm. %]



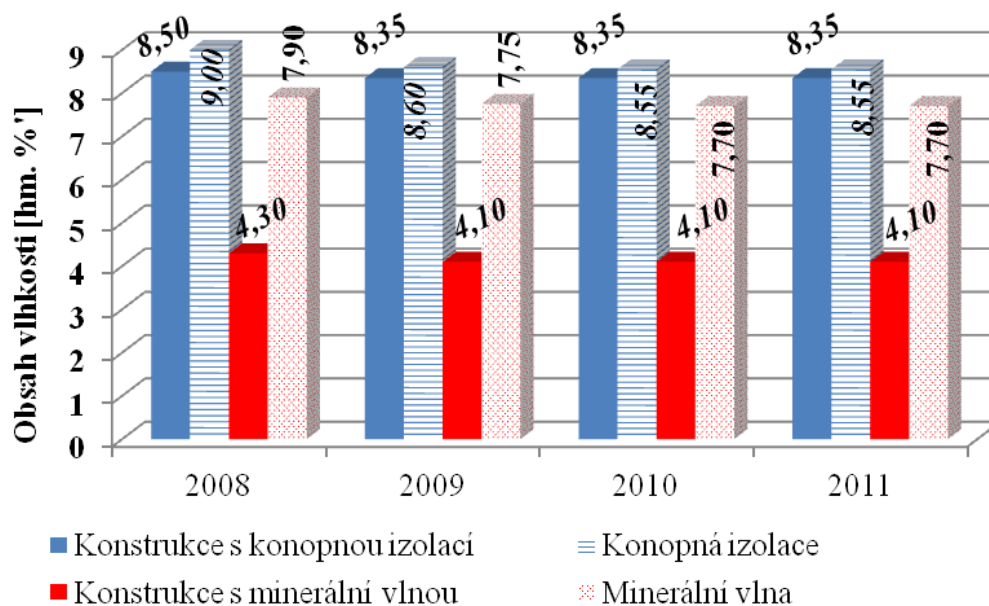
Obr. 86 Obsah vlhkosti v konstrukci s minerální izolací [hm. %]



Obr. 87 Obsah vlhkosti v minerální vlně [hm. %]

Na základě provedených simulací vlhkostního průběhu v reálné konstrukci s využitím nových, vyvinutých přírodních izolačních materiálů na bázi konopných vláken lze

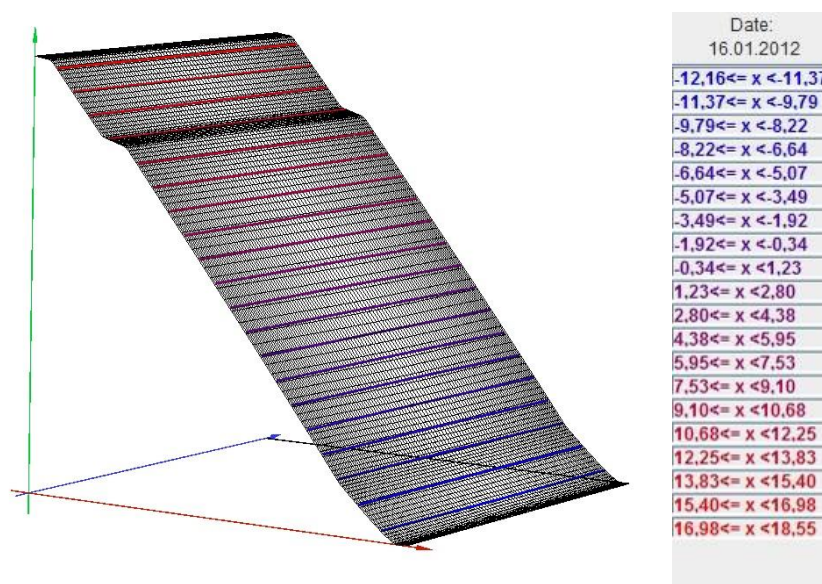
konstatovat, že u izolačního materiálu z technického konopí byl zjištěn vyšší obsah vlhkosti v hm. % v porovnání s dnes nejčastěji využívanou minerální vlnou.



Obr. 88 Přehled obsahu vlhkosti [hm. %]

Na výše uvedeném obrázku lze sledovat snižující se tendenci obsahu vlhkosti až do ustálení těchto hodnot. Na základě těchto hodnot je možné konstatovat, že po 2 letech od realizace této obvodové stěny s předstěnou dochází k ustálení vlhkostního obsahu v konstrukci. Vyšší hodnoty vlhkosti jsou zřejmě způsobeny aplikací více druhů přírodních materiálů, které jsou citlivější na vlhkost v porovnání s klasickými izolanty. Je nutné též poznamenat, že přírodní vlákna nebyla hydrofobizována a výpočet byl proveden s návrhovými hodnotami pro 80% relativní vlhkost. Přesto by bylo vhodné při výrobě izolací na bázi přírodních vláken použít vhodné hydrofobizéry a při aplikaci přírodních izolačních materiálů do konstrukce použít parotěsnou fólii za účelem zamezení možnosti vzniku kondenzace vlhkosti.

Na následujícím obrázku 89 jsou dále uvedeny izotermické křivky pro daný konstrukční detail obvodové stěny pro vybraný zimní den s extrémními teplotami, 16. 1. 2012.



Obr. 89 Izotermické křivky v konstrukčním detailu obvodové stěny
dne 16. 1. 2012

4.5 Vyhodnocení etapy V „Závěrečné vyhodnocení a uplatnění vyvinutých materiálů v praxi“ a diskuze výsledků

Na základě dosažených výsledků v podobě základních fyzikálních, tepelně technických, akustických vlastností vyvinutých izolačních materiálů a studia jejich hydrotermálního chování lze usuzovat, že tyto materiály jsou perspektivními alternativami k dnes běžně užívaným izolačním materiálům na evropském stavebním trhu, kterými jsou zejména expandovaný polystyren a minerální vlna. Z výsledků experimentální činnosti vyplývá, že navržené materiály disponují minimálně srovnatelnými vlastnostmi jako klasické izolace. Je však nutné neopomenout vyšší vlhkostní citlivost těchto přírodních materiálů. Proto je nutné při praktické realizaci tyto materiály vhodně aplikovat, např. do konstrukce zabudovat v rámci systému. Jak je z dosažených výsledků výzkumu a vývoje přírodních izolačních materiálů patrné, jako nejvhodnější aplikace se jeví použití pro izolace podlah, stěnových příček a lehkých obvodových konstrukcí.

Novodobý trend, v úzkém vztahu s ochranou životního prostředí a ekologií ve stavebnictví, vyžaduje používání moderních, nejlépe bezodpadových výrobních technologií, které takto umožní produkovat materiály šetrné k životnímu prostředí a zdraví lidstva. Bohužel v České republice je tento trend potlačen samotnými budoucími uživateli staveb, pro které je prioritou cena stavebního materiálu, nezdědka převažující i nad

samotnou kvalitou a jakostí výrobků a následně i prováděcích stavebních prací. Toto je velký rozdíl v porovnání s našimi sousedy z Rakouska a Německa, kde lidé preferují používání zejména přírodních stavebních materiálů a výrobních technologií a postupů. Tato problematika je ve vztahu finančních možností a mentality obyvatel.

Další vývoj izolačních materiálů na přírodní bázi by měl být zaměřen na oblast řešení nasákavosti a hořlavosti těchto materiálů. Dále by měla být řešena také otázka možnosti snížení nákladů na samotné surovinové zdroje, produkované v zemědělství, a nalézt vhodnou úspornou výrobní technologii.

5. Diskuze výsledků - souhrn

Výsledky řešení jednotlivých etap experimentální části disertační práce zaměřené na vývoj environmentálně úsporných izolačních materiálů z alternativních surovinových zdrojů jsou podklady pro konstatování následujících závěrů.

V rámci počáteční etapy byla provedena analýza možných surovinových zdrojů pro vývoj přírodních izolačních materiálů v zemích Evropské unie a zmapování dostupnosti surovinových zdrojů pro jejich následný vývoj.

Podkladem pro analýzu byly především odborné články ve vědeckých zahraničních časopisech, případně odborné články prezentované na zahraničních konferencích. Problematicou přírodních izolačních materiálů s využitím přírodních surovinových zdrojů pro jejich vývoj se zabývá mnoho zahraničních odborníků nejen v Evropě (Německo, Litva, Rumunsko, Rakousko, Velká Británie a další), ale i v Asii a Americe. Na základě literární rešerše zahraničních literárních zdrojů [60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78] patří mezi nejčastěji zkoumané přírodní surovinové zdroje při vývoji izolačních materiálů: sláma, technické konopí, len, kenaf, ovčí vlna, bambus, rákos, korek a další.

Na základě zjištěných poznatků z výše uvedených odborných článků byly vytipovány vhodné surovinové zdroje z pohledu České republiky, jednalo se o technické konopí, len, jutu a ovčí vlnu. Největší možný výběr lokality odběru poskytovalo technické konopí, avšak vzhledem k značným cenovým rozdílům bylo zvoleno technické konopí s pazdeřím původem z České republiky. Také lněná vlákna pocházela z tuzemských zdrojů. Jutová vlákna byla objednána z Asie, vlákna ovčí vlny byla získána z Nejdku v České republice (viz. výše). Mikroskopický rozbor, stanovené tepelně technické a fyzikální vlastnosti, a dále pak zejména dostupnost jak dopravní, tak i cenová, sloužily k výběru vhodných přírodních vláken pro další výzkum a vývoj izolačních materiálů. Lze tedy konstatovat, že z prvního pohledu analýzy dostupných surovinových zdrojů, se jevila jako optimální vlákna technického konopí a lnu. Tyto plodiny byly dříve v českých zemích tradičními plodinami a v případě větší podpory státu českým zemědělcům, při návratu k těmto tradičním zemědělským produktům s širokou oblastí využití, by byly navíc sníženy náklady na pěstování a zpracování těchto zemědělských užitkových rostlin.

Návrh zkušebních receptur z přírodních vláken juty, lnu a technického konopí, který probíhal v rámci druhé etapy řešení, byl závislý na zjištěných informacích z literárních rešerší o výzkumu a vývoji přírodních izolačních materiálů. Záměrně byly zvoleny různé

poměry základních tří složek, vlákna, pojivová vlákna a pazdeří. V podstatě se jednalo o čtyři typy poměrů: 1) 68:20:12, 2) 48:20:32, 3) 64:20:16, 4) 49:20:32. Výroba zkušebních těles proběhla na výrobní lince firmy Canabest s.r.o. v Břeclavi-Poštorné. Izolační rohože jednotlivých receptur byly připraveny s ohledem na jejich finální požadovanou objemovou hmotnost. Splnění požadovaného rozmezí hodnot objemových hmotností spočívalo v nastavení optimálního tlaku a zvýšené teploty. Téměř všechny zkušební receptury vykazaly požadované hodnoty objemových hmotností, tyto pak byly připraveny pro následující třetí etapu „Laboratorní měření“.

Z vyhodnocení podrobného studia fyzikálních a tepelně technických vlastností byla potvrzena hypotéza, že při vyšší objemové hmotnosti zkušebních vzorků má vyšší obsah pazdeří pozitivní vliv na tepelně izolační vlastnosti. Jako optimální oblast objemové hmotnosti z pohledu tepelně izolačních vlastností (viz obr. 59) se jeví rozmezí 70 až 80 kg.m⁻³.

Tento úsudek byl potvrzen u zkušebních záměsů č. 5 a 9. Nicméně vyšší objemová hmotnost materiálu je spojena také s vyššími výrobními náklady, vzhledem ke spotřebě většího množství surovin, potřebných k výrobě jednotkového objemu izolantu.

Téměř všechny zkušební receptury na bázi vláken technického konopí vykazaly velmi dobré hodnoty součinitele tepelné vodivosti, které nejsou výrazně odlišné od hodnot dnes běžně užívaných izolačních materiálů, například vůči minerální vlně, jejíž výroba je však v porovnání s produkcí přírodních materiálů, výrazným způsobem energeticky náročnější. Při hledání závislosti mezi tloušťkou vláken a součinitelem tepelné vodivosti bylo zjištěno, že vliv objemové hmotnosti je dominantnější než vliv tloušťky vláken. Pro sledování závislosti tloušťky vláken a tepelně izolačních vlastností byla závislost stanovena pouze u zkušebních těles srovnatelných objemových hmotností, která potvrdila obecný předpoklad, že v případě organických vláken ze zemědělských plodin dochází se zvyšující se tloušťkou vláken k degradaci tepelně izolačních vlastností materiálů.

Při sledování akustických vlastností byla všechna zkušební tělesa zaříděna dle dosažených výsledků dynamické tuhosti do I. kategorií podložek. Na základě stanovení tříd zvukové pohltivosti byly všechny receptury určeny jako třídy D, s výjimkou zkušebních sad 6 a 7, kdy bylo provedeno zařídění do třídy E. V daném případě se však jedná o orientační hodnoty, protože v oblasti zvukové pohltivosti dochází ke změně akustických vlastností spolu se změnou tloušťky materiálu.

Z vyhodnocení mechanických vlastností vyplývá, že zkušební tělesa z technického konopí dosáhla velmi dobrých hodnot pevností v tahu kolmo k rovině desky. Byla

prokázána platnost hypotézy, že zkušební tělesa s vyšší objemovou hmotností vykazovala nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu kolmo k rovině desky. Ze stanovených hodnot napětí při 10% deformaci je zřetelný vliv objemové hmotnosti. Zkušební tělesa s vyšší objemovou hmotností vykazovala dostačující hodnoty napětí při 10% deformaci. Je nutné však podotknout, že tato vlastnost je přínosná pouze pro určité typy izolací, dle jejich umístění v konstrukci.

Dále bylo experimentálně doloženo, že tyto přírodní materiály jsou materiály difúzně otevřené. Na podkladě experimentálních měření byly stanoveny nízké hodnoty difúzních odporů, nejnižší hodnota byla stanovena u receptury č. 1. Při sledování naměřených dat při stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření se potvrdila vyšší nasákavost přírodních materiálů.

Cílem čtvrté etapy bylo potvrdit míru vlivu podmínek prostředí na tepelně izolační vlastnosti vyvinutých materiálů, především vlivu teploty a vlhkosti na součinitel tepelné vodivosti. Na základě vyhodnocení experimentálně získaných dat byly potvrzeny následující hypotézy. Se vzrůstající teplotou dochází ke zhoršení tepelně izolačních vlastností. Také vlivem zvyšující se vlhkosti dochází k degradaci tepelně izolačních schopností vyvinutých materiálů. Pokud se však nebude jednat o extrémní podmínky, tyto materiály zachovávají dobré vlastnosti i při běžné teplotní a vlhkoštní zátěži. Experimentálně naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti a teplotě byly aproximovány exponenciálními funkcemi v souladu s ČSN EN ISO 14056 a byly přepočteny převodní činitele pro vlhkost a teplotu. Souhrn výsledků je uveden v tabulce 58 níže. Obecně lze tedy konstatovat, že vyvinuté materiály jsou teplotně i vlhkoštně citlivější. Proto by bylo vhodné při výrobě těchto materiálů vhodně hydrofobizovat vstupní vlákna.

Tab. 58 Přehled převodních činitelů f_T a f_u

Sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_T [1/K]	0,0083	0,0075	0,0077	0,0068	0,0062	0,0057	0,0038	0,0045	0,0031
f_T^* [1/K]	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0035	0,0040	0,0035	0,0035	0,0035
f_u [-]	0,964	1,471	1,376	1,565	2,148	1,567	1,221	1,196	1,218
f_u^* [-]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

f_T a f_u ... dle ČSN EN ISO 14056

Dále byla provedena optimalizace vyvinutých materiálů pro konkrétní aplikaci ve stavební konstrukci. Pro vyhodnocení vlastností vyvinutých izolačních materiálů bylo zvoleno několik kritérií, dle jejich možné aplikace v konstrukci (objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti, faktor difúzního odporu, napětí při 10% deformaci, pevnost v tahu kolmo k rovině desky, dynamická tuhost, činitel zvukové pohltivosti). Vyhodnocení bylo provedeno na základě metody multikriteriálního srovnání. Pro výpočet váhy jednotlivých kritérií f_i [-] byla zvolena metoda kvantitativního párového srovnání. Na základě vyhodnocení lze konstatovat, že vyvinuté materiály jsou vhodné pro aplikace do podlah (především sada č. 9) díky dobrým mechanickým, akustickým a tepelně izolačním vlastnostem, dále pak pro aplikace jako izolace příček a střech (sady č. 5 a 9).

Na závěr bylo provedeno posouzení chování vybraných zkušebních receptur v daných konstrukčních detailech, s ohledem na požadavky dle použití těchto materiálů ve stavebních konstrukcích. Bylo prokázáno, že pokud jsou tyto materiály vhodně aplikovány a nejsou zatíženy vysokou relativní vlhkostí, není nutné se obávat snížení jejich tepelně izolačních funkcí.

6. Závěr

V rámci disertační práce byly vyvíjeny a následně zkoumány environmentálně úsporné izolační materiály s uplatněním ve stavebnictví. Stěžejní část disertační práce byla zaměřena na studium tepelně vlhkostního chování vyvinutých materiálů na bázi přírodních vláken. Cílem bylo nalézt přírodní, snadno obnovitelné surovinové zdroje, případně druhotné suroviny na bázi odpadních materiálů z průmyslu, které by byly vhodné pro výrobu izolačních materiálů, jež by byla energeticky, ekologicky a ekonomicky úspornější v komparaci s výrobou dnes používaných izolačních materiálů v praxi (minerální vlna, EPS, PUR). Záměrem výzkumu bylo získat materiály s dobrými fyzikálními, mechanickými, akustickými a tepelně technickými vlastnostmi, které by se staly vhodnou alternativou k dnes běžně užívaným izolačním materiálům.

Pro prvotní výzkum vlastností vláken byly zajištěny 4 druhy vláken, a sice vlákna z juty, lnu, technického konopí a ovčí vlny. Z důvodu špatné lokální dostupnosti ovčích vláken, byla tato vlákna vyloučena pro další výzkum. Jako nejvíce vhodné surovinové zdroje, pro následné, možné využití v České republice při vývoji izolačních materiálů, byla klasifikována vlákna technického konopí a lnu setého. Důvodem byla především jejich snadná dostupnost, cena a tepelně izolační vlastnosti vláken.

Co se týče experimentálně zjištěných fyzikálních charakteristik u vyvíjených zkušebních sad izolačních materiálů na bázi juty, lnu a technického konopí, byly připraveny směsi s širokým spektrem objemové hmotnosti. Toto pak umožňuje jejich širší možné využití, např. izolace šikmých střech, lehkých obvodových stěn, podlah, přiček, případně i fasád. Z pohledu tepelně technických vlastností bylo zjištěno, že optimální oblast objemové hmotnosti je v rozmezí od 70 do 80 kg.m⁻³. Z hlediska dosažených hodnot součinitele tepelné vodivosti za laboratorních podmínek byla vybrána jako optimální receptura č. 9, která se skládala ze 49 % vláken technického konopí, 10 % bikomponentních vláken a 41 % pazdeří.

Zkoumáním akustických vlastností bylo zjištěno, že vyvinuté materiály jsou z hlediska dynamické tuhosti vhodné pro použití do konstrukcí plovoucích podlah (těžkých i lehkých – v závislosti na objemové hmotnosti izolantu). Všechny zkušební receptury byly zařazeny dle ČSN 73 0532 do I. kategorie podložek. Vyhodnocením váženého činitele zvukové pohltivosti byly vyvinuté izolační materiály určeny do tříd D a E.

Vyhodnocením mechanických vlastností bylo zjištěno, že použití technického konopí má pozitivní vliv na pevnost v tahu kolmo k rovině desky, v porovnání s testovanými

recepturami lnu a juty. Hodnoty napětí při 10% deformaci jsou stěžejní zejména pro vybrané materiály, s požadavky na vyšší pevnost v tlaku. Což bylo také poznatkem při vlastním měření napětí při 10% deformaci. Vzhledem k různým objemovým hmotnostem zkušebních receptur nelze tyto hodnoty navzájem porovnávat, a jak již bylo řečeno, tato vlastnost je významná pouze pro dané aplikace izolačních materiálů v konstrukci.

Při uvážení vlhkostního a tepelně vlhkostního chování vyvinutých materiálů, prokázaly se tyto materiály jako difúzně otevřené, s malým difúzním odporem. Nejnižší hodnota byla určena u zkušební sady č. 1 z juty, a to $\mu = 2,1$. Nejvyšší difúzní odpor byl stanoven, jak bylo předpokládáno, u zkušební sady č. 7 s nejvyšší objemovou hmotností, a sice $\mu = 5,3$.

Obecně je známo, že přírodní vláknité materiály jsou teplotně i vlhkostně citlivé, přičemž vlivem zvýšené teploty i vlhkosti dochází k degradaci jejich tepelně izolačních vlastností. Toto bylo také podnětem pro zkoumání chování vyvinutých přírodních izolačních materiálů v případě vystavení zvýšené vlhkosti, teplotě. Experimentálním měřením bylo zjištěno, že materiály z technického konopí jsou v porovnání s jinými přírodními materiály (dřevo, ovčí vlna) méně vlhkostně citlivé. Z tohoto pohledu byly vyhodnoceny, jako nejméně vlhkostně citlivé, zkušební sady č. 1, 8, 9 a 7. Pokud jsou vyvinuté přírodní materiály exponovány v prostředí s relativní vlhkostí do 60 %, nedochází k významným tepelně izolačním změnám. Na základě vyhodnocení závislosti součinitele tepelné vodivosti na materiálové vlhkosti lze konstatovat, že do 6 % materiálové vlhkosti nedochází k významným změnám součinitele tepelné vodivosti. Byla sledována také teplotní citlivost zkušebních sad, kdy jako nejvíce citlivá byla určena receptura z jutových vláken, naopak nejmenší teplotní citlivost byla zaznamenána u zkušební sady č. 9.

Závěrem lze konstatovat, že při vhodně zvolených okrajových podmínkách mohou být tyto materiály tedy bezproblémově použity při rekonstrukcích, sanacích stavebních konstrukcí či při zateplování stavebních konstrukcí, kde je kladen důraz na zachování klasických způsobů výstavby a použití snadno obnovitelných zdrojů. Případně mohou být do konstrukce zabudovány v rámci systému, kde budou dostatečně dobře chráněny před vlhkostí. Z výše uvedeného se jako optimální jeví zkušební receptury č. 5 a 9, na bázi technického konopí.

Přínosy disertační práce lze rozdělit do několika oblastí. Z hlediska základního výzkumu se jedná o studium tepelně vlhkostního chování těchto materiálů na přírodní bázi, které patří k největšímu přínosu této práce. Z hlediska ekologického se jedná o materiály s velkým potenciálem vzhledem k jejich nízkým hodnotám PEI vstupních vláken,

v porovnání s klasickými vlákny (skelná vlákna apod.). Na základě provedených výpočtových simulací lze konstatovat, že tyto materiály jsou vhodnou alternativou k dnes běžně používaným materiálům, což představuje přínos i v oblasti aplikovaného výzkumu.

V rámci případného navazujícího výzkumu bude třeba se zaměřit na otázku hořlavosti a nasákavosti přírodních izolačních materiálů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] CHYBÍK, J. *Přírodní stavební materiály*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009. 272 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [2] *Climate Action* [online]. Last revision 10th of September 2012 [cit. 2012-10-15]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm>.
- [3] KABELE, Karel. Revize evropské směrnice 2002/91/ES o energetické náročnosti budov. *TZB-info* [online]. 30. 8. 2010 [cit. 2012-01-15]. Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz/hodnoceni-energeticke-narocnosti-budov/6739-revize-evropske-smernice-2002-91-es-o-energeticke-narocnosti-budov>>. ISSN 1801-4399.
- [4] ČSN P 730600. *Hydroizolace staveb – Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 20 s.
- [5] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. *Zkoušení izolačních materiálů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X.
- [6] CHYBÍK, Josef. Dřevěné konstrukce a přírodní izolační materiály. *TZB-info* [online]. 20. 9. 2010 [cit. 2011-10-10]. Dostupné z: <<http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/6791-drevene-konstrukce-a-prirodni-izolacni-materialy>>. ISSN 1801-4399.
- [7] Lýková vlákna. *Wikipedia, otevřená encyklopedie* [online]. 2007, poslední revize 18. 4. 2011 [cit. 2012-01-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/L%C3%BDkov%C3%A1_vl%C3%A1kna>.
- [8] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Rostlinná vlákna: Učební texty Fakulty textilní, Katedra textilních materiálů*. Liberec [online]. 2005, [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/20061005/6-rostlinna_vlakna.pdf>.
- [9] MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Situační a výhledová zpráva LEN A KONOPÍ*. Praha [online]. 2010, [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/file/56759/LEN_a_KONOPI_2010.pdf>.
- [10] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. E.V. *Gülzower Fachgespräche Band 26 Studie zur Markt- und Konkurrenz -situation bei Naturfasern und Naturfaser- Werkstoffen (Deutschland und EU)*. Hürth [online]. 2008, [cit. 2010-01-24]. Dostupné z: <http://www.nova-institut.de/pdf/08-01-Flachs-Hanf_Buch_Carus_et_al.pdf>.

-
- [11] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. E.V. Preise Hanf und Flachs. Hürth [online]. 2010, [cit. 2010-10-25]. Dostupné z: <http://www.nova-institut.de/bio/data/images/13-02-preise_hanf_flax_de.jpg>.
- [12] ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. *Pěstování rostlin*. Praha [online]. 2010, [cit. 2010-04-01]. Dostupné z: <<http://etext.czu.cz/php/skripta/>>.
- [13] WIKIMEDIA. *Hanfstengel*. [online]. 2002, [cit. 2010-04-10]. Dostupné z: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Hanfstengel.jpg>>.
- [14] KVĚTENA ČR. *Konopí seté*. [online]. 2003, [cit. 2010-04-10]. Dostupné z: <www.kvetenacr.cz>.
- [15] GROOT, Birgitte. *Hemp pulp and paper production: Paper from hemp woody core*. Wageningen, The Netherlands [online]. 2. 3. 1995, [cit. 2010-03-19]. Dostupné z: <<http://www.hempfood.com/IHA/iha02112.html>>.
- [16] HONZÍK, Roman. Konopí seté nejen alternativní energetická plodina. *Biom.cz* [online]. 2004-03-24 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/konopi-sete-nejen-alternativni-energeticka-plodina>>. ISSN: 1801-2655.
- [17] KURZ BY KATIE. *Lněné látky* [online]. 16. 1. 2010, [cit. 2012-01-14]. Dostupné z: <<http://kurzbykatie.blogspot.com/2010/01/cast-i-latky-len.html>>.
- [18] WIKIPEDIA. *Juta* [online]. 11. 3. 2013, [cit. 2010-04-15]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Juta>>.
- [19] MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Situační a výhledová zpráva Obiloviny*. Praha [online]. 2011, [cit. 2012-01-16]. Dostupný z: <http://eagri.cz/public/web/file/140964/OBILOVINY_12_2011__k_umisteni_na_web.pdf>
- [20] WIKIPEDIA. *Ovčí vlna* [online]. 10. 3. 2013, [cit. 2012-01-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ov%C4%8D%C3%AD_vlna>.
- [21] WIKIPEDIA. *Bavlna* [online]. 23. 5. 2013, [cit. 2012-01-16]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Bavlna>>.
- [22] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Chemická vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec [online]. 2005, [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/chemicka_vlakna.pdf>.
- [23] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Syntetická vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec [online]. 2005, [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/synteticka_vlakna.pdf>.

- [24] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Polyamidová vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec [online]. 2005, [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/polyamid>>.
- [25] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Polyesterová vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec [online]. 2005, [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/polyester>>.
- [26] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Polypropylenová vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec [online]. 2005, [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/polypropylen>>.
- [27] JIRSÁK, O.; KALINOVÁ, K. *Netkané textilie*. Liberec [online]. [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/nte/tisk.pdf>>.
- [28] JILANA A. S. *Technologie výroby* [online]. 2013, [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <<http://www.jilana.cz/technologie.html>>.
- [29] ASTRON, S. R. O. *Struto®* [online]. 17. 6. 2008, [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <http://www.struto.com/index.htm>
- [30] HALAHYJA, M.; CHMÚRNY, I.; STERNOVÁ, Z. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov*. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [31] VAVERKA, J.; CHYBÍK, J.; MRLÍK, F. *Stavební fyzika 2, stavební tepelná technika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [32] KUTATELADZE, S. S.; BORISĀNSKIĀ, V. M. *Průručka sdělení tepla*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 528 s. Typové číslo L11-E1-N-41/1338, 04-019-62.
- [33] ČSN EN ISO 10456. *Stavební materiály a výrobky - Tepelně vlhkostní vlastnosti - Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových tepelných hodnot*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 32 s.
- [34] JENISCH, R. *Schadenfreies Bauen - Tauwasserschäden*. Fraunhofer IRB Verlag 1996.
- [35] VAVERKA, J.; KOZEL, V.; LÁDYŠ, L.; LIBERKO, M.; CHYBÍK, J. *Stavební fyzika 1, urbanistická stavební a prostorová akustika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. 343 s. ISBN 80-214-1283-6.

- [36] ČSN 73 0532. *Akustika – Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků – Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 24 s.
- [37] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J., *Stavební akustika a zvukoizolační materiály*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 209 s. ISBN 80-214-2117-7.
- [38] ČSN EN 822. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení délky a šířky*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 8 s.
- [39] ČSN EN 823. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 16 s.
- [40] ČSN EN 12085. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení lineárních rozměrů zkušebních vzorků*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 12 s.
- [41] ČSN EN 12431. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky izolačních výrobků pro plovoucí podlahy*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 12 s.
- [42] ČSN EN 1602. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 12 s.
- [43] ČSN 72 7012-3. *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 8 s.
- [44] ČSN EN 12667. *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 60 s.
- [45] ISO 8301 Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Heat flow meter apparatus
- [46] ČSN EN 12086. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení propustnosti pro vodní páru*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 16 s.
- [47] ČSN EN 826. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Zkouška tlakem*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 16 s.
- [48] ČSN EN 1607. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 12 s.
- [49] ČSN ISO 9052-1. *Akustika. Stanovení dynamické tuhosti. Část 1: Materiály pro izolaci plovoucích podlah v bytových objektech*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1992, 8 s.

-
- [50] ČSN ISO 9053 *Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance.*
- [51] ČSN ISO 10534-1. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubiciích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny.* Praha: Český normalizační institut, 1999. 28 s.
- [52] ČSN EN ISO 11654. *Akustika – Absorbéry zvuku používané v budovách – Hodnocení zvukové pohltivosti.* Praha: Český normalizační institut, 1998. 16 s.
- [53] ČSN EN 1609. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení krátkodobé nasákavosti vody při částečném ponoření.* Praha: Český normalizační institut, 1998. 12 s.
- [54] ČSN EN ISO 12571. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností.* Praha: Český normalizační institut, 2001. 16 s.
- [55] ČSN 730540-4. *Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody.* Praha: Český normalizační institut, 1998. 12 s.
- [56] ČSN EN ISO 13788. *Tepelně vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků – Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce – Výpočtové metody.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. 32 s.
- [57] KIEßL, K. *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung.* Dissertation Essen 1983.
- [58] KÜNZEL, H.-M. *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten.* Dissertation Stuttgart 1994
- [59] KÜNZEL, H.M. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters.* PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [60] MACDOUGALL, Colin. *Natural Building Materials in Mainstream Construction: Lessons from the U. K..* Journal of Green Building. Volume: 3 Issue: 3 Pages: 3-14, 2008.
- [61] VEJELIENE, Jolanta; GAILIUS, Albinas; VEJELIS, Sigitas; et al. *Evaluation of Structure Influence on Thermal Conductivity of Thermal Insulating Materials from*

- Renewable Resources. Materials Science-Medziagotyra*. In National Conference on Materials Engineering, Volume 17, Issue 2, strany 208-212, 2011.
- [62] MURPHY, D. P. L.; BEHRING, H. *Arable crop materials for insulation in buildings. Biomass for Energy and Industry*. In 10th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Strany: 176-179, 1998.
- [63] BROUWER, W. D. *Natural fibre composites: Where can flax compete with glass?* Sampe Journal, Volume 36, Issue 6, Strany: 18-23, 2000.
- [64] IBRAHEEM, S. A.; ALI, Aidy; KHALINA, A. *Development of Green Insulation Boards From Kenaf Fibres Part 2: Characterizations of Thermal and Water Absorption*. Fracture and strength of solids VII, Part 1 and 2, Book Series: Key Engineering Materials. In 8th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Volume 462-463, Strany 1331-1336, 2011.
- [65] IBRAHEEM, S. A.; ALI, Aidy; KHALINA, A. *Development of Green Insulation Boards From Kenaf Fibres Part 1: Development and characterizations of Mechanical Properties*. Fracture and strength of solids VII, Part 1 and 2, Book Series: Key Engineering Materials. In 8th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Volume 462-463, Strany 1343-1348, 2011.
- [66] MUKHOPADHYAY, S.; ANNAMALAI, D.; SRIKANTA, R. *Coir Fiber for Heat Insulation*. *Journal of natural fibers*, Volume 8, Issue 1, Strany 48-58, 2011.
- [67] IBRAHEEM, S. A.; ALI, Aidy; KHALINA, A. *Development of Green Insulation Boards from Kenaf Fibres and Polyurethane*. Polymer-plastics technology and engineering. Volume 50, Issue 6, Strany 613-621, 2011.
- [68] ASHOUR, Taha; WIELAND, Hansjoerg; GEORG, Heiko; et al. *The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings*. *Materials & Design*, Volume 31, Issue 10, Strany 4676-4685, 2010.
- [69] LI, Y.; LUO, Y.; HAN, S. *Multi-Scale Structures of Natural Fibres and Their Applications in Making Automobile Parts*. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. In International Conference on Natural Fibres. Volume 4, Issue 2, Special Issue: SI, Strany: 164-171, 2010.
- [70] PECENKA, Ralf; FUERLL, Christian; IDLER, Christine; et al. *Fibre boards and composites from wet preserved hemp*. *International Journal of Materials & Product Technology*. In International Conference on Innovative Natural Fibre Composites for Industrial Applications. Volume 36, Issue 1-4, Strany 208-220, 2009.

-
- [71] JANULAITIS, T.; PAULAUSKAS, L. *Structural Analysis of Fibrous Thermo Insulation Materials*. Mechanika 2009 – Proceedings of the 14th International Conference, Book Series: Mechanika Kaunas University of Technology, Strany 152-155, 2009.
- [72] BICA, Smaranda; ROSIU, Liliana; RADU, Radoslav. *What Characteristics Define Ecological Building Materials*. Proceedings of the 7th IASME/WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE'09). Strany 159-164, 2009.
- [73] GLASNOVIC, Zvonimir; HORVAT, Jasna; OMAHIC, Dino. *Straw as a Building Material. Energy and the Environment 2008*. In 21st Scientific Conference on Energy and the Environment. Volume 1, Strany 479-488, 2008.
- [74] YILMAZ, Oe.; ERSOY, S. *Measurement of sound absorption properties of industrial organic waste material*. Mechanika 2008, Proceedings Book Series: Mechanika Kaunas University of Technology. In 13th International Conference on Mechanika Location: Kaunas Univ Technol, Kaunas, LITHUANIA, strany 168-173, 2008.
- [75] PAULAUSKAS, L.; JANULAITIS, T. *Experimental analysis of usage of thermo insulation materials from technological refuse*. Mechanika 2008, Proceedings Book Series: Mechanika Kaunas University of Technology. In 13th International Conference on Mechanika, strany 394-397, 2008.
- [76] COSTANZO, S.; CUSUMANO, A.; GIACONIA, C.; et al. *Thermal characterisation of bio-based building materials. Sustainable city IV: Urban regeneration and sustainability*, Book Series: WIT Transactions on Ecology and the Environment, Volume 93, Strany 39-46, 2006.
- [77] WIELAND, Hansjoerg; MOELLER, Frank; BOCKISCH, Franz-Josef. *Thermotechnical and technological aspects of insulation and building materials from renewable raw materials*. Landbauforschung Volkenrode, Volume: 57, Issue: 1, Strany 87-93, 2007.
- [78] Paudel, S. K. *Engineered bamboo as a building material. Modern bamboo structures*. In 1st International Conference on Modern Bamboo Structures, Strany 33-40, 2008.
- [79] PYTLÍK, Petr. *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*. Brno: VUTIUM, 1998, s. 399, ISBN 80-214-1123-6.
- [80] ČSN EN 15026:2007. *Hodnocení šíření vlhkosti stavebními dílci pomocí numerické simulace*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

-
- [81] WTA 6-2-01. *Simulation of heat and moisture transfer*. München: WTA Publications, 2004.

Seznam zkratek a symbolů

$\%$	Procenta
ε	Emisivita
μ	Součinitel dynamické viskozity
σ_0	Součinitel sálání absolutně černého tělesa
α_w	Vážený činitel zvukové pohltivosti
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia
λ	Součinitel teplotní vodivosti
A	Tepelný ekvivalent mechanické práce
α	Pohltivost
A	Plocha zkušebního vzorku
AP	Potenciál zakyselení životního prostředí
<i>apod.</i>	A podobně
<i>atd.</i>	A tak dále
β	Teplotní jímavost
c	Měrná tepelná kapacita
c	Rychlost zvuku
<i>cca</i>	Asi, přibližně
CUOXAM	Hydroxid tetraamoměďnatý
ČR	Česká republika
d	Tloušťka
DMF	Dimetylformamid
E_{air}	Dynamický modul pružnosti vzduchu
EPS	Expandovaný polystyren
EU	Evropská unie
f	Frekvence
F	Síla
$f(d_x)$	Hustota pravděpodobnosti
$F(x)$	Distribuční funkce
F_a	Převodní faktor stárnutí
F_m	Převodní vlhkostní faktor
F_T	Převodní teplotní faktor

GWP	Potenciál globálního oteplování
<i>h</i>	Tloušťka akustického materiálu
<i>ha</i>	Hektar
<i>K</i>	Stlačitelnost
<i>kg</i>	Kilogram
<i>L</i>	Hladina akustického tlaku
<i>m</i>	Hmotnost zkušebního tělesa
<i>m'</i>	Plošná hmotnost
<i>max.</i>	Maximálně, maximum
<i>mil.</i>	Milion
<i>min.</i>	Minimálně, minimum
NMMO	N-metylmorfolin-N oxid
<i>Obr.</i>	Obrázek
<i>P</i>	Pórovitost
<i>p</i>	Akustický tlak
PAD	Polyamid
PAN	Akrylonitrilové jednotky
PEI	Primární energie v materiálu
<i>př. n. l.</i>	Před naším letopočtem
<i>příp.</i>	Případně
PUR	Polyuretan
<i>q</i>	Hustota tepelného toku
<i>Q</i>	Energie
<i>q_č</i>	Hustota zářivého toku
<i>q_v</i>	Vnitřní tepelný zdroj
<i>R</i>	Odráživost
<i>R</i>	Tepelný odpor
<i>r.</i>	Rok
<i>s'</i>	Dynamická tuhost
<i>t</i>	Tuna
<i>T</i>	Propustnost
<i>T</i>	Absolutní teplota
Tab.	Tabulka

THC	$C_{12}H_{30}O_2$
tis.	Tisíc
TU	Technická univerzita
Tzv.	Takzvaně
u	Hmotnostní vlhkost
U	Napětí
V	Objem zkušebního tělesa
w	Rychlost proudění
W	Akustický výkon
w_m	Hmotnostní vlhkost materiálu
W_p	Krátkodobá nasákavost vody při částečném ponoření
x, y, z	Prostorové koordináty
α	Činitel zvukové pohltivosti
δ	Součinitel difúzní vodivosti
Δd	Změna tloušťky
ε	Pružnost
θ	Teplota
λ	Součinitel tepelné vodivosti
μ	Faktor difúzního odporu
ρ	Objemová hmotnost
σ_{mt}	Pevnost v tahu kolmo k rovině desky
σ_{mt}	Napětí při 10% deformaci
τ	Čas
ψ	Objemová vlhkost

Seznam tabulek

- Tab. 1** Vybrané klasické i přírodní izolační materiály a jejich hodnoty podílu energetické složky PEI a jejich míry vlivu na kvalitu životního prostředí vyjádřenými parametry GWP a AP
- Tab. 2** Světová spotřeba a vybrané fyzikální vlastnosti nejdůležitějších vláken
- Tab. 3** Vybrané fyzikální vlastnosti u přírodních stavebních materiálů používaných ve stavebnictví nejen v zemích EU
- Tab. 4** Chemické složení vybraných přírodních vláken
- Tab. 5** Deklarované hodnoty tepelného odporu R a součinitele tepelné vodivosti λ při teplotě 10 °C
- Tab. 6** Rozdělení podlah dle plošné hmotnosti
- Tab. 7** Kategorie podložky dle dynamické tuhosti (ČSN 730532)
- Tab. 8** Pružnost při zatížení 2 kPa
- Tab. 9** Stlačitelnost při zatížení 2 kPa
- Tab. 10** Požadavky na vyvíjené materiály dle jejich aplikace v konstrukci
- Tab. 11** Přehled zastoupení jednotlivých vstupních složek pro výrobu izolačních materiálů
- Tab. 12** Přehled fyzikálních vlastností přírodních vláken
- Tab. 13** Přehled hodnot součinitele tepelné vodivosti v ustáleném stavu u konopných, lněných a jutových vláken při objemové hmotnosti $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Tab. 14** Přehled stanovených tloušťek vláken u vzorků ovčí vlny
- Tab. 15** Přehled hodnot součinitele tepelné vodivosti v ustáleném stavu u ovčí vlny
- Tab. 16** Souhrnný přehled vlastností přírodních vláken
- Tab. 17** Souhrnný přehled současných cen přírodních vláken
- Tab. 18** Zkušební sady a zastoupení jednotlivých vstupních komponent
- Tab. 19** Přehled stanovených průměrných hodnot tloušťek zkušebních těles od jednotlivých zkušebních sad
- Tab. 20** Přehled stanovených průměrných hodnot lineárních rozměrů zkušebních těles od jednotlivých zkušebních sad
- Tab. 21** Přehled stanovených průměrných hodnot objemových hmotností u zkušebních těles jednotlivých zkušebních sad
- Tab. 22** Přehled stanovených průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti stanovených u zkušebních těles jednotlivých zkušebních sad za laboratorních podmínek

Tab. 23 *Přehled stanovených průměrných hodnot dynamické tuhosti u zkušebních těles jednotlivých zkušebních sad*

Tab. 24 *Třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654*

Tab. 25 *Přehled průměrných hodnot činitelů zvukové pohltivosti zkušebních vzorků*

Tab. 26 *Třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654 u jednotlivých zkušebních receptur*

Tab. 27 *Průměrné hodnoty pevností v tahu kolmo k rovině desky u jednotlivých zkušebních sad*

Tab. 28 *Průměrná napětí při 10% deformaci u jednotlivých zkušebních sad*

Tab. 29 *Průměrné hodnoty difúzních odporů a ekvivalentních difúzních tloušťek u jednotlivých zkušebních sad*

Tab. 30 *Průměrné hodnoty krátkodobých nasákavostí při částečném ponoření u jednotlivých zkušebních sad*

Tab. 31 *Přehled průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] při teplotním zatížení u jednotlivých zkušebních sad*

Tab. 32 *Procentuální nárůst součinitele tepelné vodivosti u zkušebních těles*

Tab. 33 *Přehled návrhových hodnot součinitele tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] dle ČSN EN ISO 10456*

Tab. 34 *Přehled převodních činitelů f_T*

Tab. 35 *Přehled průměrných hodnot materiálových vlhkostí u zkušebních těles při daných relativních vlhkostech vzduchu*

Tab. 36 *Přehled průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti u zkušebních těles s danou materiálovou vlhkostí*

Tab. 37 *Návrhové hodnoty součinitele tepelné vodivosti dle ČSN EN ISO 10456*

Tab. 38 *Přehled převodních činitelů f_u*

Tab. 39 *Přehled aproximovaných vztahů pro jednotlivé zkušební sady*

Tab. 40 *Přehled hodnotících kritérií a požadavků na jejich optimum*

Tab. 41 *Rozhodovací matice A_{ij} pro optimalizační proces*

Tab. 42 *Transformovaná matice B_{ij} pro použití izolace v podlahách*

Tab. 43 *Vysvětlivky k porovnání daných kritérií*

Tab. 44 *Saatyho matice pro použití izolace v podlahách*

Tab. 45 *Výpočtová matice C_{ij} pro použití izolace v podlahách*

Tab. 46 *Transformovaná matice B_{ij} pro použití izolace do střech či příček*

Tab. 47 *Saatyho matice pro použití izolace do střech či příček*

Tab. 48 Výpočtová matice pro použití izolace do střech či příček

Tab. 49 Skladba detailu ze strany interiéru

Tab. 50 Vlastnosti jednotlivých vrstev

Tab. 51 Tepelně technické vlastnosti konstrukce

Tab. 52 Skladba podlahové konstrukce

Tab. 53 Vlastnosti jednotlivých vrstev

Tab. 54 Tepelně technické a akustické vlastnosti konstrukce

Tab. 55 Skladba detailu ze strany interiéru

Tab. 56 Vlastnosti jednotlivých vrstev

Tab. 57 Tepelně technické vlastnosti konstrukce

Tab. 58 Přehled převodních činitelů f_T a f_u

Seznam obrázků

- Obr. 1** Grafický přehled osevní plochy konopí setého v ha v zemích EU v letech 2009/2010
- Obr. 2** Osevní plochy konopí setého v ha v zemích EU a v ČR v období 2005 až 2010
- Obr. 3** Stavba konopného stonku
- Obr. 4** Stavba konopného stonku
- Obr. 5** Cannabis sativa, C.indica, C. ruderalis
- Obr. 6** Grafický přehled osevní plochy lnu přadného v ha v zemích EU v letech 2009/2010
- Obr. 7** Osevní plochy lnu přadného v ha v zemích EU a v ČR v období 2005 až 2010
- Obr. 8** Lněná tkanina
- Obr. 9** Celosvětová produkce juty v r. 2008 [tis. t]
- Obr. 10** Sklizeň jutovníku
- Obr. 11** Corchorus capsularis
- Obr. 12** Polyesterová vlákna (podélný směr)
- Obr. 13** Polyesterová vlákna (příčný směr)
- Obr. 14** Polypropylenová vlákna (podélný směr)
- Obr. 15** Polypropylenová vlákna (příčný směr)
- Obr. 16** Charakteristické tvary příčných řezů bikomponentních vláken
- Obr. 17** Průřez zvláknovací hubice pro výrobu bikomponentních vláken typu jádro – plášť
- Obr. 18** Základní schéma vpichovacího stroje
- Obr. 19** Struto agregát
- Obr. 20** Sorpční izotermy stavebních materiálů
- Obr. 21** Schéma jednotlivých etap disertační práce
- Obr. 22** Zkušební aparatura pro stanovení tloušťky dle EN 823
- Obr. 23** Zkušební zařízení Holometrix Lambda 2300 pro stanovení součinitele tepelné vodivosti
- Obr. 24** Zkušební miska se zkušebním tělesem
- Obr. 25** Vzorek při testování napětí při 10% deformaci
- Obr. 26** Vzorek upevněný v lisu před zkouškou pevnosti v tahu kolmo k rovině desky
- Obr. 27** Zkušební aparatura pro zkoušku dynamické tuhosti
- Obr. 28** Interference přímé a odražené stojaté akustické vlny v interferometru
- Obr. 29** Kuntova trubice
- Obr. 30** Zařízení pro částečné ponoření
- Obr. 31** Metoda A – Odkapání přebytečné vody

- Obr. 32** Mikroskop pro určení tloušťky vláken
- Obr. 33** Grafický přehled průměrných hodnot tloušťek přírodních vláken ze zemědělství
v μm
- Obr. 34** Hustota pravděpodobnosti $f(dx)$ tloušťek vláken u lnu, konopí a juty
- Obr. 35** Distribuční funkce $F(dx)$ tloušťek vláken u lnu, konopí a juty
- Obr. 36** Hustota pravděpodobnosti $f(dx)$ tloušťek vlněných vláken
- Obr. 37** Distribuční funkce $F(dx)$ tloušťek vlněných vláken
- Obr. 38** Princip výroby izolačních rohoží na přírodní bázi
- Obr. 39** Fotografie přípravy vstupních vláken na výrobní lince firmy CANABEST –
rozvlákňování balíků vláken (vlevo technické konopí, vpravo bikomponentní
vlákna)
- Obr. 40** Vytváření izolačních rohoží na výrobní lince
- Obr. 41** Finále výroby izolačních rohoží na výrobní lince
- Obr. 42** Detail struktury – juta (68-20-12)
- Obr. 43** Detail struktury – len (68-20-12)
- Obr. 44** Detail struktury – konopí (68-20-12)
- Obr. 45** Grafické vyobrazení základních fyzikálních vlastností u testovaných
zkušebních sad
- Obr. 46** Grafické vyobrazení hodnot součinitele tepelné vodivosti u testovaných
zkušebních sad
- Obr. 47** Závislost součinitele tepelné vodivosti na tloušťce vláken
- Obr. 48** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci
- Obr. 49** Závislost pevnosti v tahu kolmo k rovině desky na objemové hmotnosti u
jednotlivých zkušebních sad
- Obr. 50** Závislost pevnosti v tahu kolmo k rovině desky na objemové hmotnosti u
zkušebních sad 1-5
- Obr. 51** Napětí při 10% deformaci u jednotlivých zkušebních sad
- Obr. 52** Závislost napětí při 10% deformaci na objemové hmotnosti u jednotlivých
zkušebních sad
- Obr. 53** Faktor difúzního odporu u jednotlivých zkušebních sad
- Obr. 54** Krátkodobá nasákavost u jednotlivých zkušebních sad
- Obr. 55** Závislost součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě
- Obr. 56** Závislost objemové hmotnosti na nárůstu součinitele tepelné vodivosti

v závislosti na teplotě

Obr. 57 *Vyobrazení průběhů ustálených rovnovážných sorpčních vlhkostí u jednotlivých zkušebních vzorků při teplotě 23 °C*

Obr. 58 *Závislost součinitele tepelné vodivosti na materiálové vlhkosti u jednotlivých zkušebních sad*

Obr. 59 *Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti zkušebních těles*

Obr. 60 *Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí*

Obr. 61 *Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí (30 %–60 %)*

Obr. 62 *Detail obvodové stěny u dřevostavby ze strany interiéru (1) k exteriéru (7)*

Obr. 63 *Teplotní průběh v obvodové stěně při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21\text{ °C}$, $\theta_2 = \theta_e = -15\text{ °C}$*

Obr. 64 *Průběh parciálních tlaků v obvodové stěně při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21\text{ °C}$, $\theta_2 = \theta_e = -15\text{ °C}$*

Obr. 65 *Obsah vlhkosti v konstrukci s izolací na bázi konopných vláken ve sledovaném období [hm. %]*

Obr. 66 *Obsah vlhkosti v izolačním materiálu na bázi technického konopí [hm. %]*

Obr. 67 *Obsah vlhkosti v konstrukčním detailu s minerální vlnou [hm. %]*

Obr. 68 *Obsah vlhkosti v minerální vlně [hm. %]*

Obr. 69 *Porovnání obsahu vlhkosti [hm. %]*

Obr. 70 *Detail podlahové konstrukce*

Obr. 71 *Obsah vlhkosti v podlahové konstrukci [hm. %]*

Obr. 72 *Obsah vlhkosti v konopné izolaci (4) [hm. %]*

Obr. 73 *Obsah vlhkosti v konopné izolaci (2) [hm. %]*

Obr. 74 *Porovnání obsahu vlhkosti [hm. %]*

Obr. 75 *Detail obvodové stěny s předstěnou ze strany interiéru (1) k exteriéru (6)*

Obr. 76 *Teplotní průběh v obvodové stěně při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21\text{ °C}$, $\theta_2 = \theta_e = -15\text{ °C}$*

Obr. 77 *Průběh parciálních tlaků v obvodové stěně při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21\text{ °C}$, $\theta_2 = \theta_e = -15\text{ °C}$*

Obr. 78 *Teplotní průběh v konstrukci dne 18. 11. 2008, v 20:00*

Obr. 79 Relativní vlhkost v konstrukci dne 18. 11. 2008, v 20:00

Obr. 80 Vlhkostní obsah [kg.m^{-3}] v konstrukci dne 18. 11. 2008, v 20:00

Obr. 81 Teplotní průběh v konstrukci dne 13. 6. 2009, v 21:00

Obr. 82 Relativní vlhkost v konstrukci dne 13. 6. 2008, v 21:00

Obr. 83 Vlhkostní průběh v konstrukci dne 13. 6. 2009, v 21:00

Obr. 84 Obsah vlhkosti v konstrukci s izolací na bázi konopných vláken ve sledovaném období [hm. %]

Obr. 85 Obsah vlhkosti v izolaci na bázi technického konopí [hm. %]

Obr. 86 Obsah vlhkosti v konstrukci s minerální izolací [hm. %]

Obr. 87 Obsah vlhkosti v minerální vlně [hm. %]

Obr. 88 Přehled obsahu vlhkosti [hm. %]

Obr. 89 Izotermické křivky v konstrukčním detailu obvodové stěny dne 16. 1. 2012