



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM CHOVÁNÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ V PROSTŘEDÍ S VYSOKOU VLHKOSTÍ

STUDY OF THE BEHAVIOR OF INSULATING MATERIALS IN ENVIRONMENT WITH HIGH HUMIDITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jindřich Havelka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jindřich Havelka
Název	Studium chování izolačních materiálů v prostředí s vysokou vlhkostí
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] HALAHYJA, M.; CHMÚRNY, I.; STERNOVÁ, Z. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [2] 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
- [3] Vaverka, J.; Chybík, J., Mrlík, F. Stavební fyzika 2, stavební tepelná technika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [4] Kießl, K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation Essen 1983.
- [5] Künzeli, 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.
- [6] ČSN 73 1901 Navrhování střech
- [7] ČSN EN 13164 Tepelněizolační výrobky pro budovy – Průmyslově vyráběné výrobky z extrudovaného polystyrenu (XPS) - Specifikace

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Bakalářská práce se bude věnovat problematice reálného chování tepelně izolačních materiálů určených pro použití v trvale vlhkém prostředí, jako jsou například konstrukce inverzních a zelených střech. Práce se bude věnovat především zmapování reálného zatížení izolantů v těchto konstrukcích a způsobu stanovení jednotlivých deklarovaných vlastností typicky využívaných izolantů pro tyto aplikace (především extrudovaného polystyrenu /XPS/) z pohledu evropských výrobních i zkušebních norem. Výstupem z práce by měl být návrh vhodné metodiky zkoušení tepelně izolačních materiálů pro konstrukce zatížené vlhkostí, která by lépe simulovala reálné podmínky, jakými je materiál v konstrukci zatížen. V praktické části práce bude provedeno stanovení klíčových vlastností na vybraných druzích XPS použitelných (dle specifikace výrobců) do konstrukce obrácených střech, a to jak za laboratorních podmínek, tak i po zatížení vlhkostí. Výsledkem bude ověření metodiky navržené v první části bakalářské práce, a její případná korekce nebo doplnění na základě reálně provedených měření. (Rozsah práce cca 40–50 stran)

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Extrudovaný polystyren (XPS) je často prezentován jako zcela nenasákavý materiál a bývá aplikován do míst s vysokým vlhkostním namáháním, jako jsou například konstrukce inverzních střech. Důvodem pro jeho využití je velmi dobrý poměr tepelně izolačních a mechanických vlastností a do vlhkostně zatížených aplikací se využívá vzhledem k uzavřené pórové struktuře a vysokému faktoru difúzního odporu, které deklarují výrobci. Dlouhodobé zkušenosti a studie však ukazují, že XPS při dlouhodobé expozici ve vlhkém prostředí vlhkost postupně akumuluje. Pro lepší zmapování trendu zvyšující se vlhkosti byla navržena zkouška dlouhodobé nasákavosti při plném ponoření po dobu 84 dnů. Bylo vybráno a testováno celkem 6 výrobků doporučených do konstrukcí inverzních střech od různých výrobců. Cílem bylo především zmapovat reálné vlastnosti jednotlivých výrobků při vysokém vlhkostním zatížení. Bylo zjištěno, že každý výrobek vykazuje jistou menší nebo větší nasákavost a projevuje rozdílnou míru degradace tepelné vodivosti při stejné hodnotě objemové vlhkosti. Dále byla nalezena souvislost povrchové struktury s mírou nasákavosti, kdy objemová vlhkost byla vyšší pro výrobky s vaflovou strukturou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Šíření tepla, šíření vlhkosti, adsorpce, difúze vodní páry, kapilární jevy, expandovaný polystyren, extrudovaný polystyren, inverzní střecha, dlouhodobá nasákavost, součinitel tepelné vodivosti, degradace tepelné izolace, vlhkostní namáhání konstrukce, optická mikroskopie.

ABSTRACT

Extruded polystyrene (XPS) is presented as non-absorbent material and it is applied in building construction with high moisture, such as inverted roof. The reason for that is a very good ratio of thermal and mechanical properties and it is used in moisture-loaded applications due to the closed pore structure and high diffusion resistance factor, which are declared by the manufacturers. Long-term experience and studies show that XPS accumulates moisture during long-term exposure in an environment with high humidity. A long-term water absorption test at full immersion for 84 days has been proposed to better illustrate the trend of increasing water absorption. A total of 6 products from different manufacturers that are recommended for inverted roof application, were tested. All tested XPS products have reached high amount of water absorption. The main goal was to map the real properties of XPS at high humidity loads. It was found that each product showed a different degradation of thermal conductivity at the same volume moisture value. Furthermore, there was found the connection between the surface structure and amount of water absorption. Products with waffle structure had higher humidity than products with a fine structure.

KEYWORDS

Heat transfer, moisture transfer, adsorption, water vapor diffusion, capillary phenomena, expanded polystyrene, extruded polystyrene, inverted roof, long-term water absorption, thermal conductivity, thermal insulation degradation, structural moisture stress, optical microscopy.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Jindřich Havelka *Studium chování izolačních materiálů v prostředí s vysokou vlhkostí.*
Brno, 2021. 75 s.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav
technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Studium chování izolačních materiálů v prostředí s vysokou vlhkostí* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27.5.2022

Jindřich Havelka
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Studium chování izolačních materiálů v prostředí s vysokou vlhkostí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2022

Jindřich Havelka
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především doc. Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D., jakožto mému vedoucímu za jeho pomoc při vedení bakalářské práce, cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost během konzultací. Děkuji také Ing. Antonínu Žákovi Ph.D. a firmě DEK a.s. za poskytnutí materiálu na zkoušení a odborných rad. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítězslavu Novákovi Ph.D. za jeho spolupráci, rady a strávený čas se mnou během praktické části. V neposlední řadě chci poděkovat mé rodině, která mě podporovala během celého mého vysokoškolského studia.

OBSAH	
ÚVOD	12
TEORETICKÁ ČÁST	13
1 TEORIE ŠÍŘENÍ TEPLA V MATERIÁLECH	13
1.1 Základní mechanismy	13
1.2 Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti, objemové hmotnosti a teplotě. 15	
1.3 Vedení tepla dle dynamiky	17
1.4 Veličiny tepelně izolačních vlastností	17
2 TEORIE ŠÍŘENÍ VLHKOSTI V MATERIÁLECH	18
2.1 Vlhkostně-transportní jevy	18
2.2 Veličiny vlhkosti	22
3 PĚNOPLASTICKÉ TEPELNĚ IZOLAČNÍ MATERIÁLY	24
3.1 Expandovaný polystyren (EPS)	24
3.2 Extrudovaný polystyren (XPS)	27
3.3 Pěnový polyuretan (PUR)	33
3.4 Polyisokyanurát (PIR)	35
4 CHOVÁNÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLU V PROSTŘEDÍ S VYŠŠÍ VLHKOSTÍ	36
4.1 Plochá inverzní střecha	36
4.2 Vlhkostní namáhání inverzní střechy	36
4.3 Šíření vlhkosti v EPS a XPS	37
4.4 Zkoušení vlhkostního namáhání XPS	38
PRAKTICKÁ ČÁST	44
5 METODIKA PRÁCE	44
5.1 Výběr zkušebních vzorků	45
5.2 Formátování vzorků	46
5.3 Stanovení vybraných vlastností	47
6 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ	51
6.1 Dlouhodobá nasákavost při počátečním zvlhčení	51
6.2 Dlouhodobá nasákavost při osušení	53
6.3 Dlouhodobá nasákavost – porovnání metod při počátečním zvlhčení a osušení	55
6.4 Stanovení součinitele tepelné vodivosti a dlouhodobé nasákavosti při osušení	56
6.5 Porovnání s deklaroványými vlastnostmi	58
6.6 Optická mikroskopická analýza	59

7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	63
	ZÁVĚR.....	67
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	69
9	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	74
10	SEZNAM TABULEK.....	75
11	SEZNAM GRAFŮ	75
12	SEZNAM ROVNIC	75

ÚVOD

Práce se zabývá problematikou chování extrudovaného polystyrenu při vysokém vlhkostním zatížení. Extrudovaný polystyren se používá od 60. let na soklové části staveb a inverzní střechy z důvodu své předpokládané nízké nasákavosti. Názory na nasákavost extrudovaného polystyrenu se však v poslední době liší. V širší veřejnosti převládá názor, který považuje extrudovaný polystyren (XPS) za téměř nenasákavý. V rámci řady provedených výzkumných prací však je zjištěno, že po uplynutí několika let od vložení desek XPS do inverzních střešních desek, vlivem vysoké vlhkosti dosahují několikanásobně vyšších hmotností, než jsou hmotnosti původní, tedy jistou (někdy i poměrně vysokou) nasákavost vykazují.

Práce se člení na teoretickou a praktickou část. V prvních kapitolách teoretické části jsou vysvětleny teorie šíření tepla a vlhkosti. V dalších kapitolách jsou popsány pěnoplastické tepelněizolační materiály jako je expandovaný polystyren, extrudovaný polystyren, polyuretanové a polyisokyanurátové pěny. V poslední kapitole je popsána analýza a zkoušení chování tepelných izolací během vyššího vlhkostního namáhání ve světě. Praktická část obsahuje navržení metodiky vlhkostního namáhání XPS, popis a vyhodnocení zkoušek a následně posouzení její vhodnosti.

Cílem práce je zmapovat reálné chování tepelně izolačních materiálů určených pro použití v trvale vlhkém prostředí, jako jsou inverzní a zelené střechy. Do inverzních střešních desek se jako tepelné izolace používá XPS z důvodu nízké nasákavosti. Praktická část se věnuje zkoušení extrudovaného polystyrenu z pohledu evropských zkušebních norem. Na základě provedené rešerše dojde k vhodné úpravě zkoušení extrudovaného polystyrenu, která lépe simuluje reálné podmínky, kterým je materiál ve stavební konstrukci vystaven.

TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE ŠÍŘENÍ TEPLA V MATERIÁLECH

1.1 Základní mechanismy

Aby docházelo k šíření tepla je zapotřebí teplotního gradientu. Dochází k předávání energie z tělesa s vyšší vnitřní energií do tělesa s nižší vnitřní energií. Základní tři mechanismy pro šíření tepelné energie jsou vedení, proudění a sálání.

Porézní struktura pevné látky významně ovlivňuje přenosy tepla. Nejvýraznější vliv má velikost pórů. Pro větší póry se pak významněji projevuje sálání nebo kapilarita. Základním přenosem pomocí vedení může být jednofázový nebo dvoufázový přenos. Jednofázový přenos je charakteristický pro plně nasycenou matici. Tepelná vodivost je tvořena pevnou fází a fází tekutiny v pórech. [1, 2]

Vedení (konduktce)

Jedná se o mechanismus, kdy se teplo šíří z teplejší části do chladnější části tělesa nebo v rámci více těles z teplého tělesa do tělesa chladnějšího při fyzickém kontaktu. Toto šíření tepla můžeme popsat na makroskopické a mikroskopické úrovni. Na mikroskopické úrovni částice s vyšší energetickou hladinou předávají energii částicím s nižší energetickou hladinou při srážce. Pro plyny platí, že s vyšší teplotou se zvyšuje kinetická energie molekul, které se poté srážejí v náhodném pohybu s molekulami s nižší kinetickou energií. Předávají si tak energii a hybnost. V kapalinách je tento jev stejný jako pro plyny. Mají ovšem kratší střední volnou dráhu a ke srážkám tak dochází častěji. V pevných fázích dochází k vibraci krystalové mřížky, jelikož jsou vzájemně působící síly oproti kapalinám a plynům daleko vyšší. Tato energie ovšem přenáší jenom malou část tepla. Na větším přenosu tepla se podílí volné elektrony, které se pohybují bez vaznosti k atomu a mají spíše charakter plynu. Tento přenos je typický pro vodiče, nejčastěji kovy. V makroskopické úrovni definujeme vedení tepla pomocí tepelného toku. Dle Fourierova zákona je hustota tepelného toku přímo úměrná součiniteli tepelné vodivosti a teplotnímu gradientu se zápornou hodnotou z důvodu směru pohybu tepla. [1, 2]

První Fourierův zákon

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}\theta \quad (\text{Rovnice 1})$$

Kde je:	q	hustota tepelné toku [W/m ²]
	λ	součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
	grad θ	gradient teploty [°C]

Proudění (konvence)

Jedná se o přenos tepla v tekutině. Všeobecně vzniká během difuze nebo rozproudění tekutiny. Proudění může být nucené (vytvořeno čerpadlem, ventilátorem) nebo přirozené (vytvořeno teplotním a tlakovým rozdílem). Proudění je doprovodným mechanismem vedení, kdy dochází k výměně tepla mezi tekutinami. O proudění se nejvíce zajímáme mezi tekutinou a ohraničujícím prostředím s rozlišnými teplotami. Často se setkáváme s problematikou konvekce u proudění v potrubí. Základní hodnotou je Nusseltovo číslo, které je poměrem přenosu tepla prouděním a přenosem tepla vedením. Pokud se hodnota pohybuje kolem 1 jedná se o laminární proudění. Laminární proudění je rovnoběžné proudění jednotlivých částic ve vrstvách. Při laminárním proudění nedochází k mísení. Pokud se hodnota dostane nad 1 označujeme ho jako turbulentní proudění. Při tomto proudění částice opouštějí svoje vrstvy a dostávají se do vrstev jiných. Dochází k mísení tekutin. [1, 2]

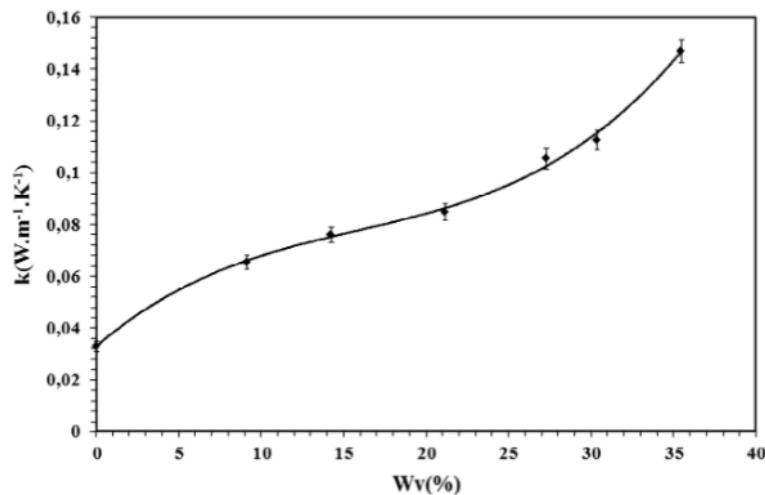
Sálání (radiace)

Jedná se o emitování tepelného záření v podobě elektromagnetického záření. Toto záření se odvíjí od vnitřní tepelné energie a je stejné povahy jako viditelné světlo nebo rentgenové záření. Liší se především vlnovou délkou a zdrojem záření. Lidské oko dokáže zaznamenat elektromagnetické záření ve vlnové délce od 0,39 μm do 0,78 μm . Průměrně se vlnová délka tepelného záření pohybuje od 0,1 μm do 100 μm , takže lidské oko drtivou většinu tepelného záření nemůže zaznamenat. Sálání probíhá ve všech třech skupenstvích. Pro sálání není potřeba médium. Ve vakuu se podílí jako jediný ze tří mechanismů na šíření tepla. Tepelné záření je popsáno pomocí Stefan-Boltzmannova zákona, kdy je intenzita záření přímo úměrná čtvrté mocnině absolutní teplotě zářícího tělesa. Pro skutečné povrchy je

zavedena emisivita, která nabývá hodnoty 0 až 1. Jedná se o poměr mezi intenzitou vyzařování skutečného tělesa a absolutně černého tělesa. Je to tedy schopnost tělesa vyzařovat teplo. [1, 2]

1.2 Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti, objemové hmotnosti a teplotě

Se zvyšující vlhkostí se zvyšuje tepelná vodivost u většiny typů tepelných izolací. Izolační materiály jsou obecně tvořeny z pevné fáze a vzduchových pórů, které mají nízký součinitel tepelné vodivosti. Pokud se do dutin dostává voda, která se podílí na vedení tepla, dochází ke zvyšování hodnoty tepelné vodivosti. Součinitel tepelné vodivosti vody při 20 °C je 0,6 W/(m·K), pro led, který zamrzá v pórech je to hodnota kolem 2,3 W/(m·K), součinitel tepelné vodivosti tenké vzduchové vrstvy v klidu je 0,026 W/(m·K). Příklad závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti je uvedena na obrázku č. 1. [3, 8]

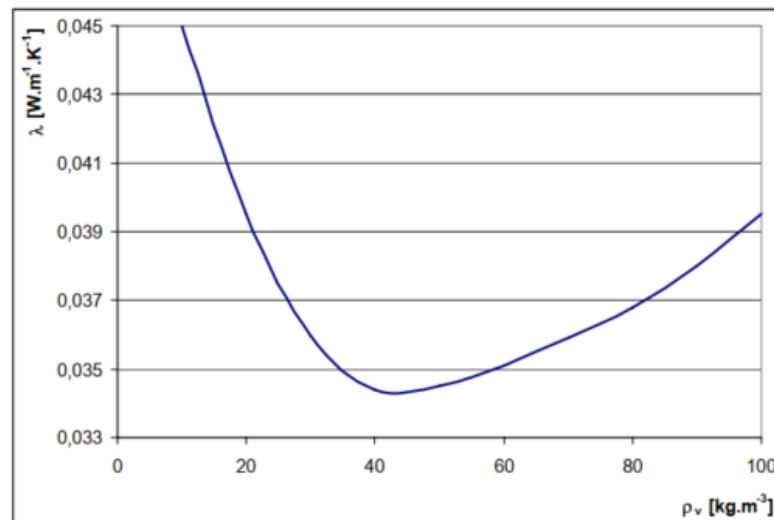


Obrázek 1 - Graf závislosti změny tepelné vodivosti oproti vysušenému stavu na vlhkosti [59]

Z pohledu objemové hmotnosti je u tepelně izolačních materiálů situace poněkud složitější. Vzhledem k tomu, že se teplo v jejich struktuře šíří všemi základními způsoby, tedy vedením prouděním i sáláním, je závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti většinou nelineární a závislá na převažujícím způsobu šíření tepla pro danou objemovou hmotnost konkrétního typu izolantu.

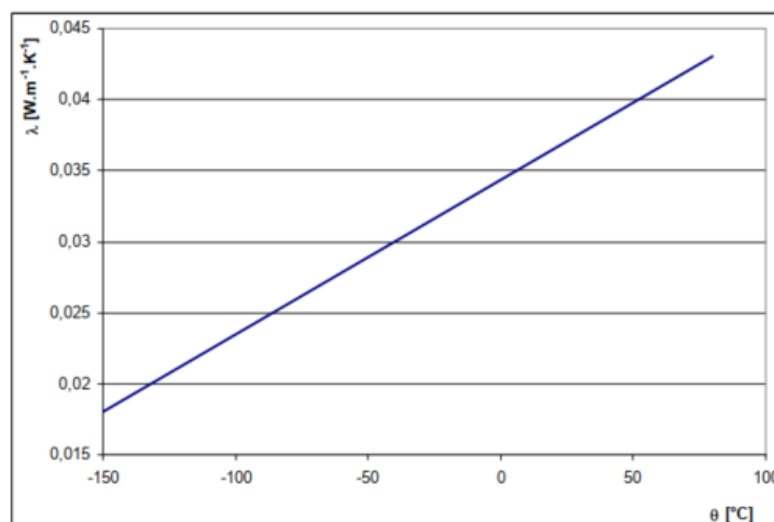
Záleží na mnoho faktorech jako je distribuce, velikost pórů či druh vazeb a krystalové mřížky. Existuje speciální případ pro některé druhy izolací, kdy obvykle platí, že se snížením objemové hmotnosti se snižuje jeho tepelná vodivost. Pokud snížíme objemovou hmotnost příliš, začne se tepelná vodivost

zvedat. Z důvodu zvýšeného přenosu tepla pomocí sálání a proudění. Tato skutečnost je patrná na závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti uvedené na obrázku č. 2. [3, 8]



Obrázek 2 - Graf závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti pro EPS [4]

Dalším faktorem ovlivňující tepelnou vodivost je teplota. Se zvyšující teplotou se zvyšuje i tepelná vodivost materiálu. Tento předpoklad vychází z termodynamiky, kdy se zvyšující se teplotou zvyšujeme i tepelnou energii částic, které mají vyšší kinetickou energii. Tím se lépe může přenášet pomocí nárazů tepelná energie. Na tuto skutečnost poukazuje obrázek č. 3. [3, 8]



Obrázek 3 - Graf závislosti tepelné vodivosti na teplotě pro EPS s objemovou hmotností 20 kg/m³

[4]

1.3 Vedení tepla dle dynamiky

- **Ustálený teplotní stav**

Ustálený teplotní stav je zjednodušení pro výpočty, kdy předpokládáme, že se teplota nemění v závislosti na čase. Při výpočtech se uvažuje, že těleso nebo stavební konstrukce, ve kterém dochází k vedení tepla je z protilehlých stran v rozdílných konstantních teplotách. Tepelný tok se pak počítá z rozdílů teplot. [5]

- **Neustálený teplotní stav**

Neustálený teplotní stav je reálný stav, kdy se teplota v jednotlivých místech v konstrukci mění v závislosti na čase. Dochází k postupnému vyrovnávání teplot až dojde k teplotní rovnováze. [6]

1.4 Veličiny tepelně izolačních vlastností

- **Součinitel tepelné vodivosti**

Součinitel tepelné vodivosti charakterizuje schopnost látky vést teplo. Jeho hodnota vypovídá, jak velké množství tepla projde jedním metrem při teplotním spádu 1 Kelvinu. [7]

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-\text{grad}\Theta} \quad (\text{Rovnice 2})$$

Kde je: \vec{q} vektor hustoty tepelného toku [W/m²]
grad Θ gradient teploty [K/m]
A plocha [m²]

- **Hustota tepelného toku**

Hustota tepelného toku vyjadřuje tepelný výkon vztažený na plochu 1 m². [7]

$$q = \frac{d\Phi}{dA} \quad (\text{Rovnice 3})$$

Kde je: q hustota tepelné toku [W/m²]
 Φ Tepelný tok [W]
A Plocha [m²]

2 TEORIE ŠÍŘENÍ VLHKOSTI V MATERIÁLECH

Ve stavebních konstrukcích z hlediska stavební fyziky dochází k majoritnímu šíření vlhkosti zejména pomocí difuze vodní páry a kapilárními jevy. Pro šíření vlhkosti je zapotřebí teplotního, tlakového nebo koncentračního spádu. Šířením vody dochází přímým nebo nepřímým vlivem k degradaci materiálů. Pro tepelné izolace se jedná především o zhoršení tepelně-izolačních a mechanických vlastností. Při kontaktu hygroskopického materiálu s vlhkým vzduchem dochází k tendenci dosažení rovnováhy ve formě vlhkostně-transportních jevů. [8]

Šíření vlhkosti uvnitř struktury může být ovlivněn vnitřními vlivy jako je typ struktury, fáze a důvod, který vytváří podmínky pro vlhkostní šíření. Podmínkou pro šíření vody uvnitř struktury je existence pórů, dutin a trhlin. Póry se rozdělují podle velikosti na nanopóry, mikropóry, mezopóry a makropóry. Kovy a skla jsou vodotěsné díky pravidelnosti krystalové mřížky. V praxi se ovšem setkáváme nejčastěji s porézní strukturou. Póry mohou nabývat tvaru kulového, kuželového nebo válcovitého. Druhově jsou pak póry kanálkovité oboustranně otevřené, jednostranně otevřené nebo uzavřené. Makropóry s poloměrem nad 10^{-7} m se vyplňují především v přímém kontaktu s vodou (kapilární nevázaná vlhkost) a z menší části také kapilární kondenzací. Póry s nižším poloměrem, než je 10^{-7} m se pak zaplňují právě díky kapilární kondenzaci. [9]

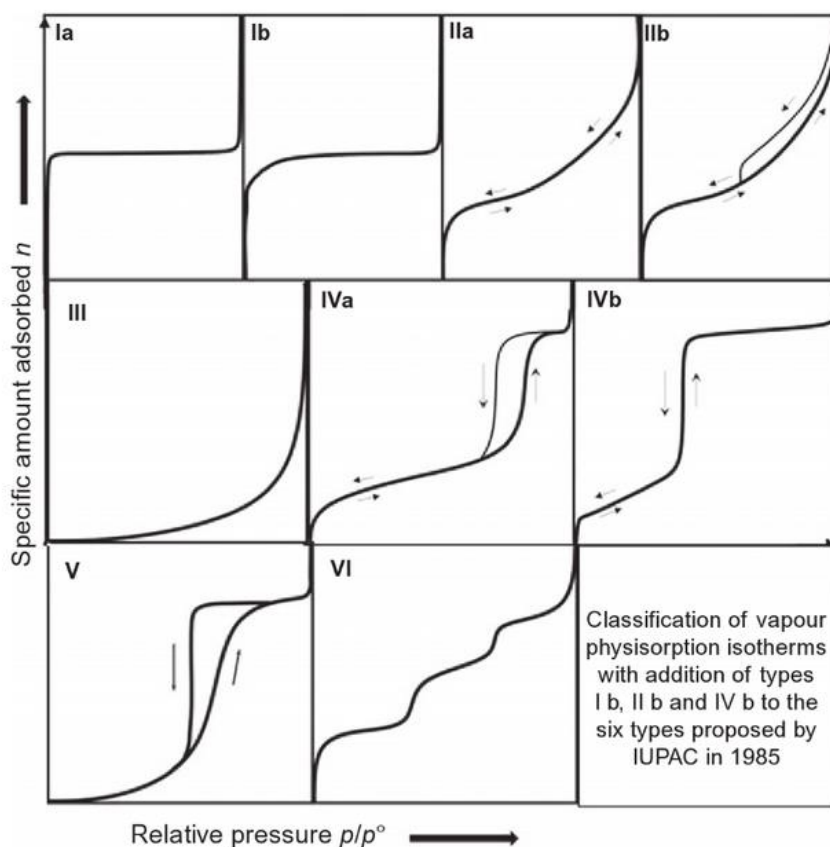
2.1 Vlhkostně-transportní jevy

Stavební materiál můžeme podle obsahu vlhkosti rozdělit na dvě skupiny, dle obsahu vody. Pokud je stavební materiál suchý obsahuje pouze chemicky vázanou vodu. Pokud obsahuje vodu fyzicky nebo volně vázanou jedná se o materiál nasáklý. Vlhkost se může šířit v pevném, kapalném nebo plynném skupenství. Pro lepší charakterizování ukládání vlhkosti v hygroskopické a hydrofilním materiálu je vytvořeno rozdělení do tří oblastí. První oblast je sorpční nebo hygroskopická oblast, kde se nachází suchý stav až po relativní vlhkost 95 %, zahrnuje sorpci vodní páry. Druhou oblastí je kapilární oblast, která navazuje z první oblasti po úplně samovolné nasycení vodou. Třetí oblast je přesycená oblast, které nelze dosáhnout při běžných podmínkách. Hlavním mechanismem je difuze při teplotním spádu. Nachází se na pomezí samovolného nasycení vodou a úplného zaplnění pórů a dutin. [8]

2.1.1 Sorpční pochody

Adsorpce je obohacování pevné fáze tekutinou na rozhraní dvou fází, kdy je právě na rozhraní vyšší koncentrace tekutiny než v okolním prostředí. Při adsorpci je plyn (adsorbát) vázaný k povrchu pevné látky (adsorbent). Například voda v kapalně fázi působí na pevnou fázi z důvodu van der Waalsových sil. K tomuto jevu dochází vlivem vysokých adhezních sil pevné látky. Během adsorpce dochází k průniku plynu do struktury materiálu. Při chemisorpci dochází k reakci mezi pevnou fází a tekutinou a následnému vytvoření chemické vazby mezi tekutinou a pevnou látkou. Pojem desorpce je myšlen opak adsorpce, tedy uvolňování tekutiny z pevné fáze. Adsorpce a desorpce indikuje směr, jakým je dosažena rovnováha. Adsorpční hystereze poukazuje na to, že adsorpce a desorpce neprobíhá stejně. Adsorpční izoterma nám popisuje závislost adsorbovaného množství na tlaku nebo závislost příjmu adsorbovaného množství na relativní vlhkosti vzduchu při konstantní teplotě. Rozdíl mezi adsorbovaným a desorbovaným množstvím nám znázorňuje hysterezní smyčka, podle které můžeme zjistit objem kondenzace zaplněných pórů a tím zjistit měrný povrch, objem, distribuci a velikost pórů. Toto se zjišťuje metodou volumetrické adsorpce. Tyto hodnoty zjišťujeme pro prášky (pigmenty, fillery a cementy) nebo porézní materiály (jíly a keramika). Podle IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemist) rozlišujeme celkem šest typů, respektive devět skupin adsorpčních izoterm, které jsou znázorněny na obrázku č. 4. [9, 10, 11, 12]

Na adsorpci se podílí hlavně mikropóry a mezopóry. Organické polymery mají sorpční izotermu popsanou, dle Flory a Hugginse. Při prvotním navlhání se dostávají molekuly vody do míst makromolekul. Postupně se pokryje povrch makromolekuly vodou (solvatace). Začíná postupné vrstvení vody na makromolekule a zvyšování koncentrace. Poté dochází k intermicelárnímu bobtnání, kdy molekuly vody začínají vnikat mezi makromolekuly. Později mohou chemicky reagovat polymery s vodou. [9, 10, 11, 12]



Obrázek 4 - Průběhy sorpčních izoterm pro jednotlivé typy podle IUPAC [10]

2.1.2 Efúze

Efúze je pohyb, kdy molekuly naráží pravidelněji do stěn pórů než do ostatních molekul. Předpokladem pro efúzi je, že lineární rozměr póru je menší než střední dráha plynu. Tento molekulární transport je tedy charakteristický pro mikropóry řádově $5 \cdot 10^{-9}$ m. Při snížení tlaku a zvýšení teploty v určitém rozmezí může efúze probíhat i v makropórech. Pokud dojde k rovnováze lze některé vlastnosti plynu vypočítat z kinetické teorie plynů. [8, 9, 13]

2.1.3 Difúze vodní páry

Difúze vodní páry je pohyb látky při koncentračním, teplotním nebo tlakovém spádu. Při koncentračním spádu ji označujeme za Fickovu difúzi. Pro budovy v zimě je typické, že teplota a tlak vodní páry uvnitř je vyšší, a naopak relativní vlhkost vzduchu je nižší. Vzniká tak teplotní, koncentrační a tlakový gradient během, kterého dochází k difúzi vodní páry skrz konstrukci budovy. Pokud je konstrukční prvek nenasáklý dochází k difuzi vodní páry zevnitř budovy ven. Jestliže uvnitř

budovy vzrůstá relativní vlhkost, vytváří se na povrchu stěn jemná vrstva adsorbované vody, která je slabší než na fasádě z důvodu vyšší venkovní relativní vlhkosti. Difúze může probíhat v pórech o velikosti větších jak 10^{-7} m. Pokud jsou póry menší dochází více ke srážkám mezi molekulou a stěnami pórů než mezi molekulami samotnými. Dle několika kapilárních modelů se předpokládá, že transport kapalné fáze a difuze vodní páry se do určité fáze navzájem neovlivňují, pokud nedochází k výraznému šíření vlhkosti pomocí kapilárních sil, pak zaplněné póry blokují difúzi. [9]

2.1.4 Vypařování

Vypařování je proces, kdy dochází k přeměně kapaliny na plyn, který uniká do atmosféry. K vypařování je potřeba dodat molekulám na povrchu energii buď ze slunce radiací nebo z atmosféry větrem. Molekuly kapaliny se navzájem přitahují a musí být dodáno tolik energie, aby byly tyto přitažlivé síly překonány. Označení pro množství energie vztažené na hmotnost se nazývá latentní teplo. Vypařování můžeme označit za difúzi, která má charakter molekulární nebo turbulentní. [14]

2.1.5 Kapilární pohyb

Ke kapilárnímu pohybu dochází v kapilární oblasti, kde je obsah vody v materiálu nad kritickou vlhkostí. V mikrokapilárách dochází ke kapilárnímu pohybu již pod kritickou vlhkostí simultánně s difúzí, efuzí nebo Fickovou difúzí, kapilárním vedením a povrchovou difúzí. Stavební materiál, který je kapilárně aktivní, při kontaktu s vodou začne vodu absorbovat, dokud nedojde k volnému nasycení vodou. Menší kapiláry v materiálu mají vyšší sací schopnost než větší kapiláry, dojde tedy nejprve k zaplňování menších kapilár. Nad vodní hladinou je tlak vzduchu a zároveň se vytváří pod meniskem v kapiláře nejvyšší sací napětí, které když překročí hodnotu barometrického tlaku v kapiláře, stane se napětím tahovým. V malých kapilárách, díky silnému silovému uspořádání molekul vody je voda schopna absorbovat tahové napětí. Kapilární pohyb tak může stoupat do výšek nad 10 metrů. [8]

2.1.6 Povrchová difúze

Jedná se o pohyb adsorbovaných molekul na pórovitém povrchu nebo v potenciálním poli adsorpce. Dle BET teorie se vytváří na povrchu jemný film z molekulárních vrstev, které jsou ve vlhkostní rovnováze s okolním prostředím. Čím je vyšší vlhkost, tím vzniká tlustší film a tím rychleji pak může difúze probíhat. Experimentálně se dá prověřit metodou nukleární magnetické rezonance. Velký význam pro šíření vlhkosti má povrchová difúze při relativní vzdušné vlhkosti 60 %, pokud je relativní vzdušná vlhkost 90 % je povrchová difúze až 100násobně vyšší než difúze vodní páry. Povrchová difúze je rychlejší při teplotách, které jsou znatelně nižší, než je teplota, při které dochází už k odpařování. [9, 15, 16]

2.2 Veličiny vlhkosti

• Relativní vlhkost vzduchu

Jedná se o procentuální poměr množství vodní páry daného vzduchu a plně nasyceného vzduchu vodní párou při stejné teplotě a tlaku. [7]

$$\varphi_a = 100 \cdot \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (\text{Rovnice 4})$$

Kde je:	φ_a	relativní vlhkost vzduchu [%]
	p_v	částečný tlak vodní páry ve vzduchu o dané teplotě [Pa]
	$p_{v,sat}$	částečný tlak vodní páry při stejné teplotě [Pa]

• Faktor difuzního odporu

Relativní schopnost vrstvy materiálu propouštět vodní páru difuzí. Hodnota je poměrem difuzního odporu vrstvy a difuzního odporu vzduchu. [7]

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (\text{Rovnice 5})$$

Kde je:	μ	faktor difuzního odporu [-]
	δ_a	součinitel difuzní vodivosti vzduchu [kg/(m·s·Pa)]
	δ	součinitel difuzní vodivosti materiálu [kg/(m·s·Pa)]

• Hmotnostní vlhkost

Jedná se o procentuální poměr hmotnosti vody obsažené ve vzorku a hmotnosti vysušeného vzorku. [7]

$$u = 100 \cdot \frac{m - m_0}{m_0} \quad (\text{Rovnice 6})$$

Kde je:	u	hmotnostní vlhkost [%]
	m	hmotnost materiálu ve vlhkém stavu [g]
	m ₀	hmotnost materiálu v suchém stavu [g]

• Objemová vlhkost

Jedná se o procentuální poměr objemu vody obsažené ve vzorku a objemu vzorku. [7]

$$\psi = 100 \cdot \frac{V_w}{V} \quad (\text{Rovnice 7})$$

Kde je:	ψ	objemová vlhkost [%]
	V _w	objem volné vlhkosti v materiálu zjištěné sušením [m ³]
	V	objem materiálu [m ³]

• Dlouhodobá navlhavost při difuzi

Množství vody vztažené na plochu nasáklé materiálem při difuzi o daném teplotním a tlakovém spádu. [7]

$$W_{dp} = \frac{m_D - m_0}{A_p} \quad (\text{Rovnice 8})$$

Kde je:	W _{dp}	Dlouhodobá navlhavost při difuzi [g/m ²]
	m _D	hmotnost materiálu po 28 dnech expozice při 50°C a 100 % [g]
	m ₀	počáteční hmotnost materiálu po kondicionování [g]
	A _p	plocha spodního povrchu materiálu [m ²]

3 PĚNOPLASTICKÉ TEPELNĚ IZOLAČNÍ MATERIÁLY

3.1 Expandovaný polystyren (EPS)

Bílý expandovaný polystyren je nejznámějším a nejrozšířenějším zástupcem pěnoplastických látek. Byl objeven náhodou v roce 1949 Fritzem Stastnym v Německu. Největší výhodou pěnového polystyrenu je jeho nízká objemová hmotnost, dobré tepelně technické vlastnosti a velmi dobré mechanické vlastnosti (ve vztahu k nízké objemové hmotnosti). Expandovaný polystyren má i nízkou nasákavost a navlhavost. Jeho nevýhodou je horší reakce na oheň a nízká odolnost vůči UV záření. Při vystavení UV záření například ze slunce zžehne a zežlutne vlivem fotooxidace. Jeho objemová hmotnost se nejčastěji pohybuje kolem 10-30 kg/m³. Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí 0,034–0,039 W/(m·K). Jeho příznivé tepelně technické parametry jsou díky vysokému objemu vzduchu, který činí 98 %. Zbývá 2 % tvoří polystyren. Třída reakce na oheň pěnového polystyrenu je třída E dle ČSN EN 13501-1, kam se řadí spolu s polyuretany. Odolává teplotám v rozmezí od -150 °C od +80 °C. [4, 17]

Další variantou je expandovaný polystyren s příměsí grafitu, který nazýváme šedý/černý polystyren. Jeho hlavní výhodou je nižší součinitel tepelné vodivosti s hodnotou 0,032 W/(m·K). Grafitové částice plní v polystyrenu pohltivou funkci, kdy snižují vedení tepla radiací vlivem absorpce dlouhovlnného infračerveného záření, pro které je normální EPS částečně propustný. Jeho výrazná nevýhoda oproti bílému EPS je jeho náchylnost k zahřívání při použití v exteriéru vlivem absorpce ze slunečního záření. Díky černé barvě pohlcuje sluneční záření, které ho může v letním období (např. při aplikaci na fasády budov systémů ETICS) zahřívát na vysoké teploty. Pokud se zateplí zahřátými deskami hrozí po vychladnutí vznik dilatačních mezer vlivem smrštění, prohnutí či vyboulení desek. Přepравuje se zabalený ve fóliích, které ho chrání před slunečním zářením. [17, 18]

3.1.1 Výroba

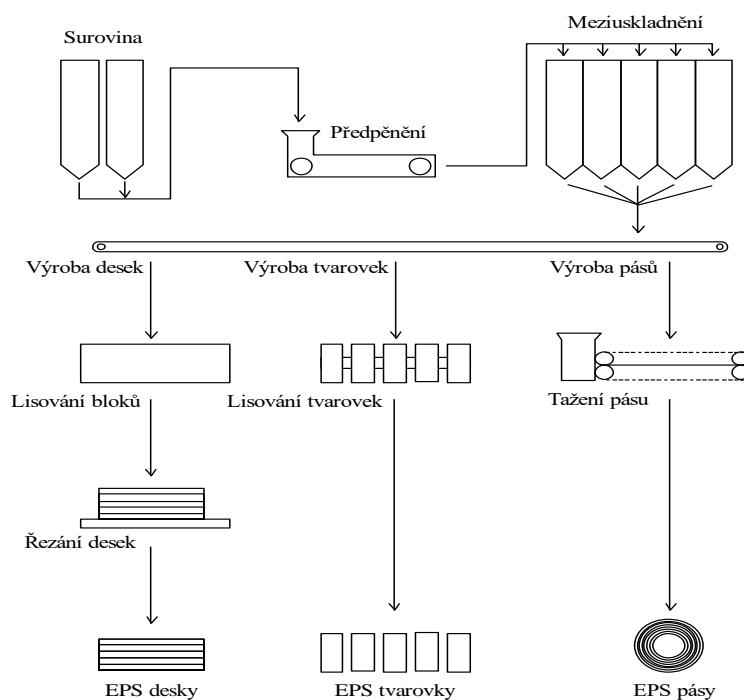
3.1.1.1 Výroba styrenových perel

Prvním krokem je výroba styrenu. Ten se vyrábí reakcí benzenu a etylenu za přítomnosti Friedel-Craftsova katalyzátoru při 95 °C, kdy vzniká etylbenzen. Po reakci dochází k ochlazení v reakční komoře. Po ochlazení se pomocí frakční

destilace oddělí jednotlivé produkty a následně se polyetylbenzeny dealkylují při teplotě 200 °C. Druhou fází je dehydrogenace, která je endotermického charakteru. Etylbenzen se propaňuje vodní párou a vzniká surový styren. Ten obsahuje 61 % etylbenzenu, 31 % styrenu a 2 % aromatických uhlovodíků. Surový styren projde složitými procesy, kdy prochází sírou a destilací. Výsledkem je bezbarvá kapalina. Kapalina se poté v předpolymeračním kotli zahřeje na 80 °C po dobu 2 dnů. Poté se směs odvede do věže, kde jsou teplotní pásma v rozmezí 100-180 °C. Zde se vyvábí zbytkový styren z polymeru. Věž je zakončena násypy s extrudérem, kde vystupuje tavenina jako filament. Ten se poté upravuje do formy styrenových perel [19]

3.1.1.2 Výroba expandovaného polystyrenu

Polystyren se vyrábí suspenzní a blokovou polymerací perel monomerního styrenu. Perly polystyrenu obsahují kolem 6–7 % alifatických těkavých uhlovodíků, které jsou rozpustné v monomeru a slouží jako nadouvadla. Typickým zástupcem těchto uhlovodíků je pentan. Aplikují se na styren formou impregnace. První fází je předpěnění, kdy jsou perle zahřívány teplotou mezi 90–100 °C vodní párou. V této fázi by nemělo docházet ke spojování kuliček. Pentan díky těkání ve formě nízkovroucí kapaliny tzv. pneumatogenu pomáhá k expanzi jeho objemu o 20–50násobek, další příčina expanze je osmotického charakteru, kdy vodní pára difunduje do kuličky během těkání pentanu. Podle odhadu vědců je polovina expanze zapříčiněna difuzí páry. Druhou fází je uložení EPS do provzdušňovacích sil, kde jsou vypěněné perly ochlazovány a sušeny vzduchem. Během této fáze difunduje vzduch do buňky a vyrovnává teplotu a tlak mezi buňkou a okolím. Tato fáze trvá minimálně 24 hodin. Třetí fází je tvarování konečného rozměru EPS. Forma se naplní vypěněnými kuličkami a poté je forma zahřívána na teplotu kolem 110–120 °C s tlakem 0,11 MPa. Kuličky změknou a vzduch v buňkách začíná opět expandovat, díky ohřevu a odpařování pneumatogenu. Kuličky ve formě tlačí na kuličky sousední a tím vytváří soudržnou strukturu. Celé schéma výroby je znázorněno na obrázku č. 5. [4, 17, 19]



Obrázek 5 - Schéma výroby EPS [4]

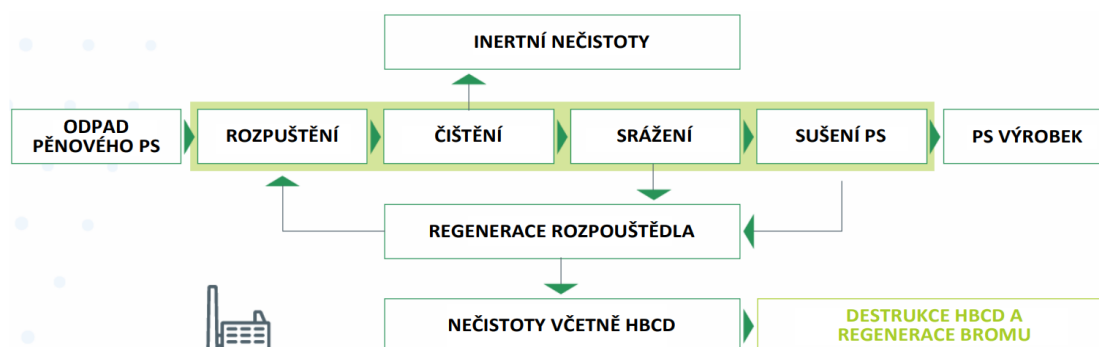
3.1.2 Využití

Pěnové polystyreny dělíme i podle typu konstrukčního použití. EPS F (fasádní) se používá na zateplení fasády. EPS S (stabilizovaný) se používá na podlahy a ploché střechy, jedná se o polystyren, který se po výrobě ukládají a nechávají stabilizovat na 20–150 dní. EPS P (perimetr) se používá na zateplení soklové části. EPS Z (podlahový) se používá na zateplení šikmých střech a podlah. Kuličky polystyrenu se používají i do lehčených betonů. Desky EPS se používají do SIP panelů, kdy je izolant (EPS, PUR pěna) z obou stran opláštěn OSB deskami. [4]

3.1.3 Recyklace

Poslední roky se větší pozornost zaměřuje na životní cyklus materiálů. EPS tvoří méně jak 1 % celkového množství stavebního odpadu, díky své vysoké trvanlivosti. Největší problém je jeho následná recyklace, kdy může EPS obsahovat HBCD (hexabromcyklododekan), který se v minulosti používal jako retardér hoření. Tato látka zvyšuje žárovzdornost polystyrenových pěn. HBCD byl zařazen jako znečišťující, toxická perzistentní sloučenina, která negativně ovlivňuje životní prostředí a narušuje homeostázu štítné žlázy. Jednou z možností je, že se EPS znovu použije na izolační desky. Další variantou je, že se odpady podrtí a poté použijí pro výrobu lehčených betonů, izolačních omítek nebo se spalují. EPS je ekologicky

šetrné, jelikož dokáže zateplit velkou plochu relativně malým množstvím, díky nízké objemové hmotnosti. Jednou z variant recyklace je znázorněno na obrázku č. 6. [20, 21]



Obrázek 6 - Proces CreaSolv® [22]

3.2 Extrudovaný polystyren (XPS)

Extrudovaný polystyren je pěnoplastická látka s uzavřenější strukturou, než má EPS. Extrudovaný polystyren byl vynalezen roku 1940 firmou DoW Chemical. Jeho hlavní využití v roce 1941 bylo jako extrudovaná polystyrenová pěna do záchranných vest amerického námořnictva během druhé světové války. Během padesátých let vznikla myšlenka obrácených střech. [23]

3.2.1 Obecné vlastnosti

Hlavní rozdíl mezi EPS a XPS je v jejich struktuře. Zatímco EPS má kuličkovou strukturu, kde se buňky dotýkají mezi sebou v několika bodech. XPS má homogenní uzavřenější strukturu. Rozdíl spočívá v použití odlišných doplňkových surovin a technologii výroby. Jejich podobnou vlastností je nízká odolnost vůči UV zářením, ropným produktům, ředidlům a organickým rozpouštědlům a třídy reakce na oheň. XPS má hodnotu součinitele tepelné vodivosti kolem 0,034 W/(m·K). Největší výhoda XPS oproti EPS jsou jeho vysoké mechanické pevnosti a téměř nulová nasákavost. Dlouhodobá nasákavost při plném ponoření dosahuje do 0,5 % objemu, což je 10x nižší hodnota než u EPS. Nevýhodou oproti EPS je jeho nižší teplotní odolnost, kdy odolává do teplot +75 °C. [4, 23]

3.2.2 Výroba

Extrudovaný polystyren se vyrábí pomocí tzv. extruze. Vstupní suroviny, které jsou tvořeny z granulí polystyrenu, granulí barviva a rozdrčeného odpadu získaného z odřezků XPS z předchozí výroby. V násypce se při potřebném poměru na sucho promísí. [24, 25, 26, 27]

Poté dochází k tavení směsi v extrudéru a vhánění nadouvacího plynu pomocí čerpadla. Extrudér je šnekový stroj, kterým prochází směs. Směs se pod tlakem až 200 atmosfér stlačí a zahřeje na teplotu do 200 °C. Nadouvací plyn v podobě superkritické kapaliny se mísí se vznikající polymerní taveninou. V extrudéru se směrem ke konci snižuje teplota společně s tlakem a plyn začíná přecházet na plynnou fázi. Tavenina začíná tvořit bubliny jako důsledek vyrovnávání tlaku mezi taveninou a plynem v tavenině. Jedná se o proces tzv. bublinové nukleace. Roztavená směs poté opouští extrudér pomocí trysky na běžící pás. [24, 25, 26, 27]

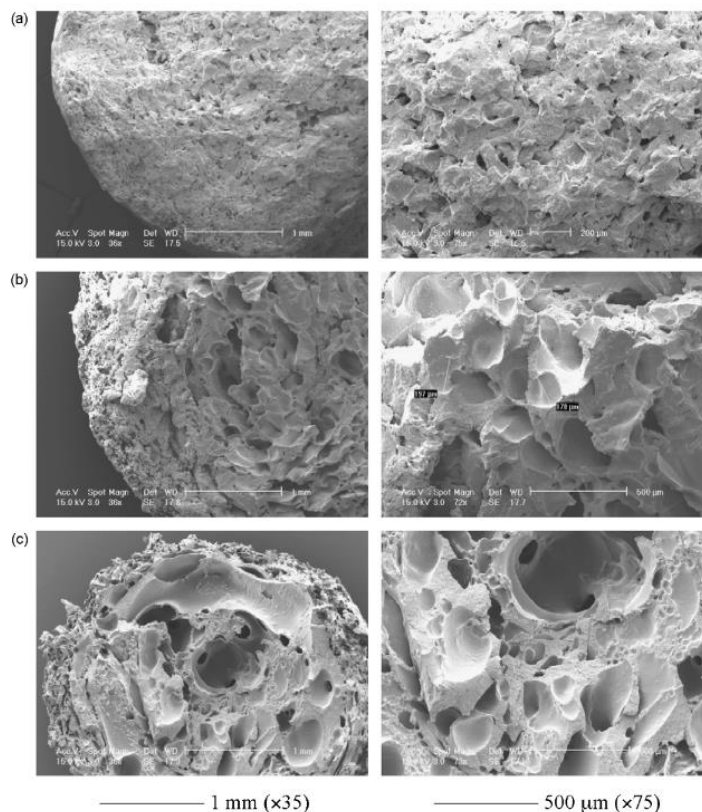
Okolní prostředí běžícího pásu se nachází již v atmosférickém tlaku. Nadouvadlo v podobě CO₂ vlivem tlakového gradientu expanduje a vyplňuje formovací desku. Během expanze plynu dochází k vytvrzování struktury. Tomuto procesu se říká extruze. Materiál v podobě nekonečné desky jede na běžícím páse do tvarovacích válců, kde dochází k formátování finální jmenovité tloušťky. Po opuštění válcové hlavice jsou ofrézovány boční hrany nekonečné desky na rovnou hranu nebo pero a drážku. Poté se nechá materiál na třicet minut odpočinout, kvůli vyrovnání vnitřní teploty a působení vnitřního pnutí. Nakonec dojde k ofrézování kratší strany a vytvoření potřebného formátu desky. Pak se materiál na 1 až 4 týdny nechá uležet z důvodu stabilizace vlhkosti a tvarové stálosti. [24, 25, 26, 27]

Tepelná vodivost u desky není stejná v celém jejím objemu. Tepelná vodivost pod povrchem je nižší než ve středu desky, to je určeno technologií výroby, velikostí a tvarem buněk. Tato rozdílná struktura u desky má vliv i na faktor difuzního odporu, kdy se vzrůstající tloušťkou klesá. [24, 25, 26, 27]

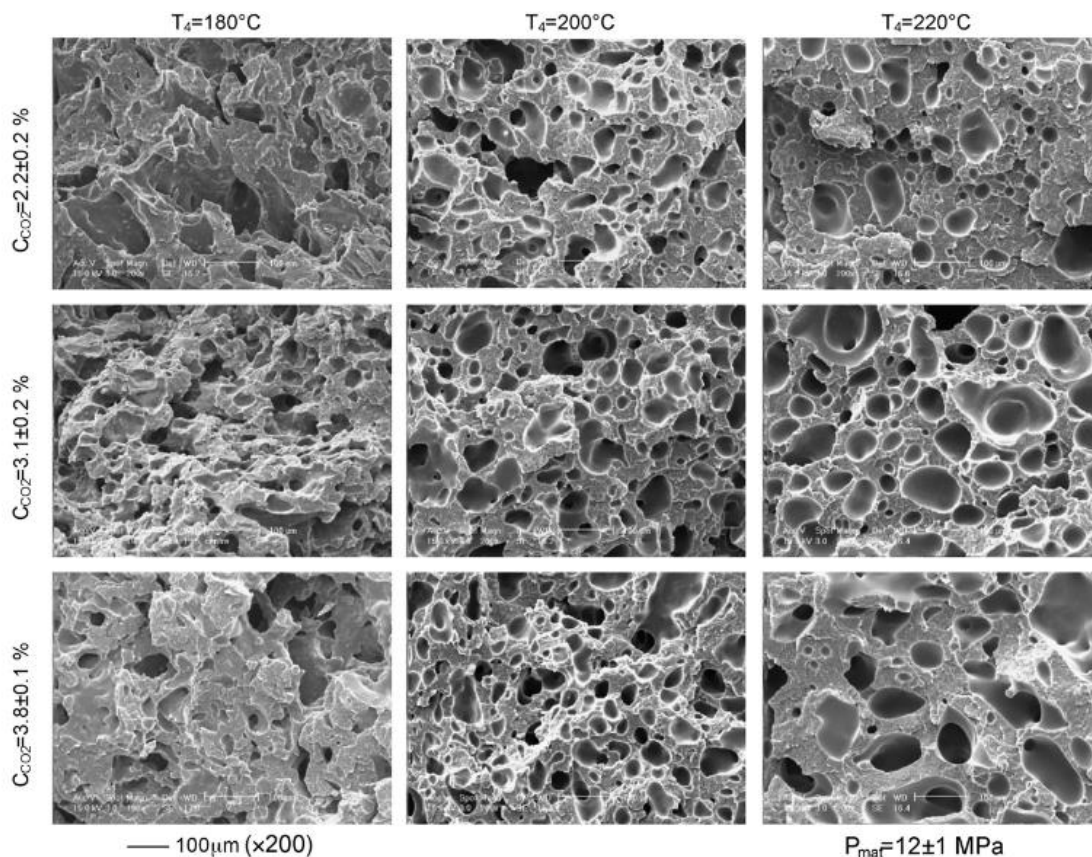
3.2.2.1 Faktory ovlivňující strukturu v extrudéru

Extrudovaný polystyren má strukturu tvořenou z uzavřených buněk, které jsou k sobě přitvrzené. Jeho výsledná struktura může být ovlivněna mnoha faktory. Jedním z nich je výběr nadouvacího plynu. Mezi nejčastější nadouvadlo se

řadí tzv super kritický CO₂ (scCO₂), který vstupuje do směsi jako super kritická kapalina (SCF). Super kritickou kapalinou se rozumí látka, jejíž teplota a tlak se nachází za kritickým bodem fázového diagramu, kde už není jednoznačně definovaný přechod mezi kapalinou a plynem. Pro CO₂ se jedná o teplotu nad 31,1 °C a tlak nad 7,38 MPa. Jeho výhodou je nehořlavost, cenová dostupnost, chemická netečnost a zdravotní nezávadnost. scCO₂ snižuje teplotu skelného přechodu a viskozitu směsi. Dochází k lepší homogenizaci směsi a nižší potřebné teplotě. Množství použitého scCO₂ má přímý vliv na zdánlivou hustotu a velikost buněk ve struktuře. Dalším faktorem je velikost tlaku v extrudéru. S nižším tlakem se snižuje zdánlivá hustota až o 40 %, vzniká však velmi nepravidelná struktura s buňkami o průměru od 100 μm do 1 mm. Na obrázku č. 7 je znázorněna změna struktury při různých teplotách použitých v extrudéru. Na obrázku č. 8 jsou zobrazeny kombinace odlišných tlaků a teplot. [26, 27]



Obrázek 7 - Změna struktury XPS při různých teplotách a) T=175 °C; b) 185 °C; 200 °C [26]



Obrázek 8 - Struktura XPS při různých teplotách a různých koncentracích CO₂ [26]

3.2.3 Využití

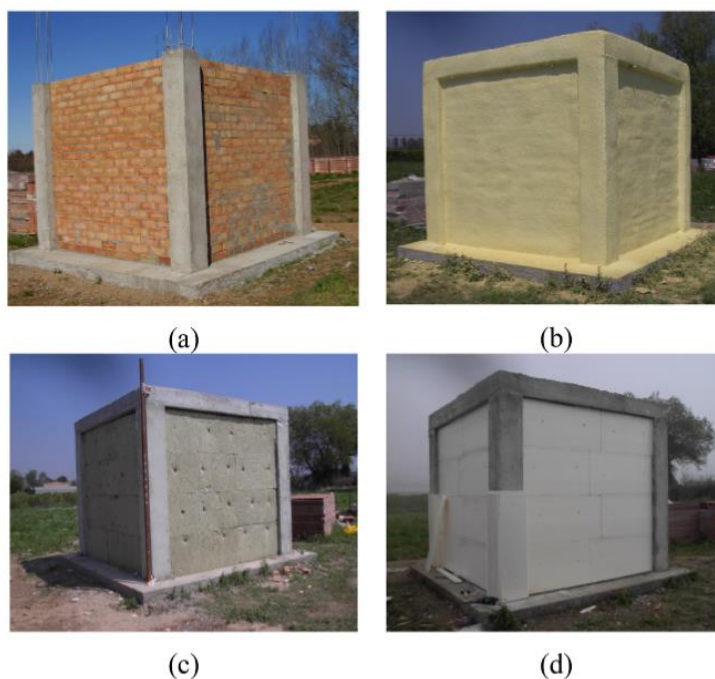
Extrudovaný polystyren se využívá především v místech se zvýšenou vlhkostí. Nejčastější aplikace je v úrovni základů a plochých střech. Důvodem je, že nejlépe odolává degradaci vlhkostí, která zhoršuje tepelně izolační vlastnosti. V úrovni základů musí XPS odolávat vztlínající vodě z půdy, tlakové vodě a vodě z dešťových srážek. Pro ploché střechy se jedná o srážkovou vodu, která může tvořit stojatou vodu v podobě kaluží a difúzí vodní páry. [28]

3.2.4 Recyklace

Extrudovaný polystyren se může recyklovat několika způsoby. Hlavní dva způsoby jsou spalování a mechanická recyklace. Alternativním způsobem je recyklace pomocí rozpouštědel na bázi benzenu, toluenu, xylenu a chloroformu. Nově se začínají zkoušet éterické oleje d-limonen, terpinen a felandren, které nedegradují polymerní řetězce a snadno se recyklují pomocí destilace. [29]

3.2.5 Enviromentální prohlášení o produktu (EPD)

Pro trvale udržitelný rozvoj je důležité se u materiálů zajímat nejen výrobou a využitím, ale také i zpracováním odpadu, recyklací nebo druhotným využitím. Pro názorné porovnání jednotlivých materiálů vznikl EPD (environmental product declaration), který ukazuje, jak vysokou zátěž má daný materiál na životní prostředí. Základem vzniku EPD je nejprve PCR (product category rule), který se stanovuje dle ISO 21930. Ten vytváří pravidla a požadavky pro splnění EPD. Poté se vytváří LCA studie, která nám ukáže u jednotlivých produktů, jejich dopad na životní prostředí. Započítává se tam vstup materiálu, energie a doprava při výrobě, využití a konečná likvidace. Po zpracování dat a výpočtů nám vzniká EPD. Pro srovnávání minerální vlny, extrudovaného polystyrenu a polyuretanové pěny vznikl experiment, kdy se vytvořilo 22 krychlí o rozměrech 2,4x2,4x2,4 m, což je zobrazeno na obrázku č. 9. Ekologická návratnost se pohybovala u minerální vlny kolem 7 let, pro polyuretan kolem 10 let a pro extrudovaný polystyren kolem 12 let. XPS má tedy nejdelší ekologickou návratnost. Z článku [31] vychází, že nejvyšší hodnotu dodané energie na kilogram z izolací EPS, XPS a PUR má právě XPS. Téměř čtyřikrát nižší hodnotu má minerální vlna. [30, 31]



Obrázek 9 - Zkušební krychle pro výpočet LCA: a) referenční krychle; b) krychle s PUR izolací; c) krychle s MW izolací; d) krychle s PS izolací [30]

3.2.6 Zkoušení extrudovaného polystyrenu

Extrudovaný polystyren se může používat do typu konstrukcí stanovených podle ČSN 72 7221-1. Jedná se o šikmé a ploché střechy, vnější a vnitřní stěny, vnitřní a vnější podhledy, podlahy a spodní stavby. Na daný typ konstrukce se vztahuje skupina výrobků, které se mohou použít (Z, S, F, P, INV). Pro dané typy konstrukcí jsou i stanovené vlastnosti výrobků, které musí výrobce deklarovat. Pro inverzní střechy platí kód použití B/5, používat se mohou skupiny výrobků s označením INV. [55, 56]

Pro extrudovaný polystyren existuje výrobková norma ČSN EN 13164+A1: Tepelněizolační výrobky pro budovy – Průmyslově vyráběné výrobky z extrudovaného polystyrenu (XPS) – Specifikace, kterou se musí řídit výrobce v rámci EU. V této výrobkové normě jsou napsány zkušební normy, podle kterých výrobci stanovují vlastnosti potřebné k uvedení výrobku na trh. Hodnoty deklarované výrobcem jsou poté k dohledání v Prohlášení o vlastnostech. [46]

Součinitel tepelné vodivosti a tepelný odpor se stanovuje podle tloušťky dle ČSN EN 12667 nebo ČSN EN 12939. Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti se stanovuje z hodnoty, která reprezentuje minimálně 90 % výroby se spolehlivostí 90 %. Do výpočtu součinitele tepelné vodivosti pro XPS se zahrnuje i vliv stárí. [46]

Délka a šířka se stanovuje dle ČSN EN 822 s tolerancí v závislosti na jmenovité délce nebo šířce. [46]

Tloušťka se zjišťuje pomocí ČSN EN 823, kde se naměřené tloušťky nesmí lišit od deklarované tloušťky odchylkou vyšší, než jsou třídy tolerance. Třídy tolerance jsou T1, T2 a T3. [46]

Napětí v tlaku při 10% deformaci se stanovuje dle ČSN EN 826, u které se hodnoty porovnávají s hodnotou úrovně napětí. Hodnoty zkoušky nesmí být nižší, než je deklarovaná hodnota. Úrovně napětí jsou od CS(10/Y)100 po CS(10/Y)1000. [46]

Pevnost v tahu kolmo k rovině desky se zjišťuje pomocí ČSN EN 1607 a porovnává se s úrovněmi pevnosti TR100 až TR1200, přičemž hodnota odpovídá požadované pevnosti v tahu kolmo k rovině desky v kPa. [46]

Dotvarování tlakem se stanovuje po minimálně 122 dnech neustálého napětí podle ČSN EN 1606. Výsledky se extrapolují tak, aby se dosáhlo hodnot, které odpovídají 10 roků expozice. [46]

Dlouhodobá nasákavost při plném ponoření se stanovuje podle ČSN EN ISO 16535. [46]

Dlouhodobá navlhavost při difúzi se stanovuje dle ČSN EN 12088, u které naměřené hodnoty nesmí být vyšší, než jsou úrovně dlouhodobé navlhavosti při difúzi deklarované výrobcem. Úrovně se pohybují v rozmezí od WD(V)1 do WD(V)5. [46]

Rozměrová stabilita se zjišťuje podle ČSN EN 1604 na základě daných teplotních a vlhkostních podmínek. Pozoruje se relativní změna délky a šířky. [46]

3.3 Pěnový polyuretan (PUR)

Pěnový polyuretan je polymerní materiál, který má vynikající mechanické a tepelně technické vlastnosti. Řadí se mezi estery. Polyuretan byl objeven roku 1937 profesorem Bayerem a jeho spolupracovníky v Německu. PUR pěny se dělí na měkké a tvrdé. Měkké PUR pěny se označují jako molitan. Tvrdé PUR pěny se využívají ve stavebnictví především jako izolační materiál. Jejich výroba může probíhat ve formách, kontinuálně nebo in-situ pomocí stříkání. Tvrdé PUR pěny snadno přilnou k povrchu, jsou odolné vůči naftě a olejům. Degradují především při vystavení UV záření, mají nízkou objemovou hmotnost a můžou dobře vyplňovat prostor. [19, 32]

3.3.1 Výroba

Vytváří se syntézou polyfunkční hydroxylové sloučeniny s polyfunkčním izokyanátem. Po reakci vzniká plynný CO₂, který plní funkci nadouvadla. Výroba může být dvousložková či vícesložková. Další součástí jsou katalyzátory, povrchově aktivní látky, retardéry hoření, antioxidanty, barviva a polymerní sloučeniny pro zesíťování nebo prodloužení řetězců. Dvousložkové se vyrábí základními třemi systémy, dle použitých chemikálií během syntézy. Dvousložkové systémy jsou jednostupňový, kvazipředpolymerovaný a plně předpolymerovaný. V dnešní době se využívá nejvíc plně předpolymerovaný systém, kdy v komponentu A je polyisokyanát s polyolem a v komponentu B je nadouvadlo, katalyzátor a povrchově aktivní látky. Proces zpěnění může probíhat kelímkovým, krabicovým a strojním napěněním. [19, 32, 33]

3.3.1.1 Jednotlivé složky pro výrobu

Dnes se používají aromatické polyfunkční izokyanáty z důvodu vyšší reaktivity, než mají alifatické izokyanáty. Hlavním zástupcem je toluen diisokyanát (TDI) a difenylmetan diisokyanát (MDI). Mezi polyoly využívající se pro výrobu PUR pěny se používají polyeterpolyoly a polyesterpolyoly. Nadouvací plyny slouží pro vytvoření charakteristické struktury PUR pěny. Nadouvá se buď chemicky, kdy reakcí izokyanátu a jiné látky vzniká CO_2 , nebo fyzikálně, kdy je použito nadouvadlo s nízkým bodem varu. Do skupiny katalyzátorů se řadí gelové, nadouvací a cyklotrimerizační katalyzátory. Povrchově aktivní látky se využívají v silikonové podobě, která zlepšuje stabilitu pěny a tepelně izolační vlastnosti. Po smíchání vzniká polyuretanová pěna. Pro zesíťování se používají nízkomolekulární dioly, např. etylenglykol. Pro prodloužení řetězců se přidává nízkomolekulární trioly, např. glycerol. Další důležitou součástí jsou zpomalovače hoření, které zlepšují vlastnosti PUR pěny, která je vysoce hořlavá. [19, 32, 33]

3.3.2 Využití

Pěnový polyuretan má ve stavebnictví využití tepelně izolační. V dnešní době se nejvíce využívá ve formě stříkané pěny do střešních konstrukcí, izolačních desek pro zateplení fasád, izolací do podlahového topení, lepení izolací, vyplňování mezer a spár a izolací potrubí. Ve strojírenství se používá jako izolační materiál do chladniček, mrazniček, chladírenských vozů nebo termosek. [19, 32]

3.3.3 Recyklace

Díky vysokému využívání polyuretanu ve světě vzniká i velké množství odpadu, který je potřeba efektivně likvidovat. V dnešní době se používají tři metody, a to je skladování, spalování a recyklace. Při spalování dojde k 99% ztrátě objemu a tvorbě tepla srovnatelného s černým uhlím. Při smíchání rozdrčeného polyuretanu s uhlím vzniká kompozitní palivo s názvem Eco-fuel, které by mohlo sloužit jako alternativa k čistému uhlí. Při nedokonalém spalování se vytváří jedovatý plyn, který znečišťuje atmosféru. Od spalování se ustupuje z důvodu neekologičnosti. Nejpoužívanější metodou je fyzikální recyklace, kdy dojde k rozdrčení polyuretanu a s pomocí lepidel a lisování se vyrábí nový produkt. Při chemické recyklaci se využívá

reverzibility polyuretanové polymerace, např. alkoholýzy. Jedná se ovšem o technicky a ekonomicky velmi náročný proces. [34]

3.4 Polyisokyanurát (PIR)

Polyisokyanurátové pěny jsou samostatně velmi drolivé a křehké, jelikož mají silně zesíťovanou strukturu. Modifikují se pomocí uretanových vazeb, amidů a imidů kvůli drolivosti a křehkosti. Pěna je nehořlavá, stabilní ve vyšších teplotách, má lepší tepelně izolační a mechanické vlastnosti a málo se drolí. Isokyanurátová vazba se získává cyklometrizací izokyanátové skupiny. Hlavním rozdílem mezi uretanovou a isokyanurátovou vazbou je, že isokyanurátová vazba nemá volný vodík, tudíž je potřeba více energie k disociaci molekul. Z toho získává svoji teplotní stabilitu. [19, 32]

3.4.1 Využití

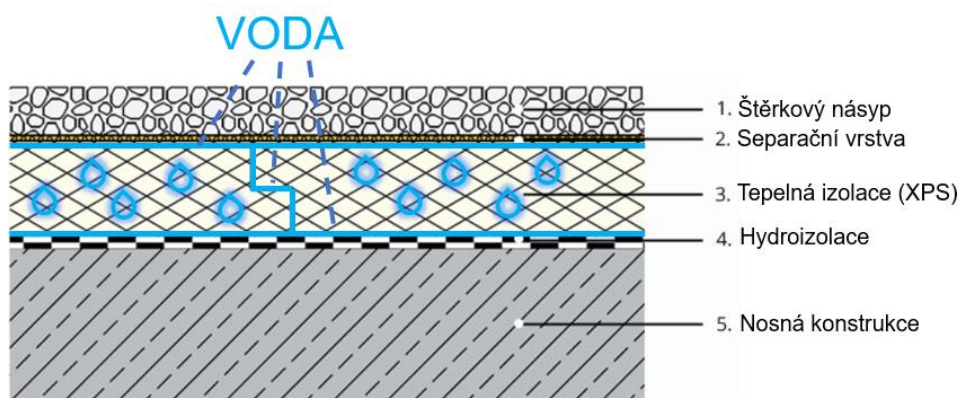
PIR desky a pěny se využívají jako tepelná izolace potrubí, nádrží, chladíren, mrazíren a pláště budov. Ve stavebnictví jsou nejvíce rozšířené sendvičové panely, kdy je PIR deska obalena minerálním rounem nebo hliníkovou fólií. U stěn se využívají především pro zateplení lehkých obvodových a větraných fasád. Pro střechy se typicky využívají jako nadkrokevní izolace. [19, 32]

4 CHOVÁNÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLU V PROSTŘEDÍ S VYŠŠÍ VLHKOSTÍ

Extrudovaný polystyren se používá jako tepelná izolace pro aplikace v oblastech s vyšší vlhkostí jako jsou soklové části budov, inverzní střechy, střešní terasy, zahrady nebo balkóny. V těchto oblastech pak dochází v rámci snahy o nastolení termodynamické rovnováhy k šíření vlhkosti. V konstrukci se vytváří vysoké teplotní či koncentrační spády. Vlhkost se šíří skladbou, a tedy i izolačním materiálem, nejvíce v podobě difúze vodní páry a kapilárními jevy. Tepelná izolace má zvýšené požadavky vůči vlhkostrádatnímu namáhání. V dnešní době se především používá XPS, z důvodu nízké nasákavosti. [35]

4.1 Plochá inverzní střecha

Inverzní střechy mají na nosné konstrukci umístěnou hydroizolační vrstvu, na kterou se klade tepelná izolace. Obecně má inverzní střecha tepelnou izolaci zasypanou násypem a oddělenou separační fólií. Výhodou je ochrana hydroizolace vůči mechanickému poškození, UV zářením a povětrnostním podmínkám. Skladba inverzní střechy společně s jejím vlhkostrádatním namáháním je zobrazena na obrázku č. 10. [35, 36, 37]



Obrázek 10 – Inverzní střecha se zobrazením vlhkostrádatního namáhání XPS [38]

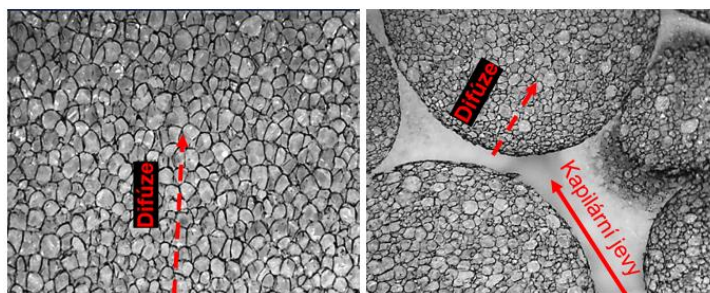
4.2 Vlhkostrádatní namáhání inverzní střechy

V inverzních střechách se kombinuje tepelné a vlhkostrádatní namáhání. Vzniká vysoký teplotní a koncentrační gradient napříč celým izolantem. Hlavním zdrojem vysoké vlhkosti jsou deště a tající sníh procházející skrze spáry jednotlivých desek

extrudovaného polystyrenu. V letním období, kdy jsou vysoké teploty je problémem, že se voda uvnitř inverzní střechy vypařuje a vznikají vysoké parciální tlaky vodní páry. Z experimentu, kde se studovalo chování střešních inverzních pláštů bylo prokázáno, že voda zůstává ve spojích XPS desek. Dále se ukázalo, že množství vody proteklé izolací je ovlivněno použitou separační vrstvou, kde kontaktní difúzní fólie snižuje množství proteklé vody více, jak separační geotextilie. Kontaktní difúzní fólie vytváří bariéru při kontaktu s vodou a snižuje, tak vlhkost v oblasti mezi fólií a hydroizolací. Pod deskami je tvořen vodní film o tloušťce více než 10 mm. Dalším vlivem ovlivňující vlhkostní namáhání je krycí vrstva střechy, stěrkové násypy lépe odvádějí vlhkost, a naopak zelené střechy napomáhají vlhkost akumulovat uvnitř izolace. Důležitým faktorem jsou klimatické podmínky a vnitřní teplota, které ovlivňují difúzní tok ve skladbě. [35, 39, 57]

4.3 Šíření vlhkosti v EPS a XPS

Extrudovaný a expandovaný polystyren získává vody do struktury především difúzí vodní páry a kapilárními silami. Čím vyšší je tlakový rozdíl, tím masivnější bude difúze vodní páry skrze strukturu. Kapilárními silami se voda dostává do systému sítěmi kanálek mezi jednotlivými buňkami expandovaného polystyrenu. Souběžně difunduje vodní pára skrze deformace buněčných stěn dovnitř buněk. Pro extrudovaný polystyren, který má více uzavřenou strukturu a neobsahuje vzájemně propojené dutiny, či kanálky dochází k šíření vlhkosti především pomocí difúze vodních par, kapilárními silami jenom minimálně, jak je patrné na obrázku č. 11. Difúze je oproti kapilárnímu pohybu časově daleko pomalejší proces. Z toho vyplývá, že extrudovaný polystyren bude nabírat vlhkost podstatně déle a znatelnější přírůstky vlhkosti se při reálném vlhkostním namáhání projeví během několika let. Zvyšováním vlhkosti pak dochází ke snižování tepelného odporu. [40, 41]



Obrázek 11 – Zobrazení struktury XPS (vlevo) a EPS (vpravo), 25x zvětšeno [42]

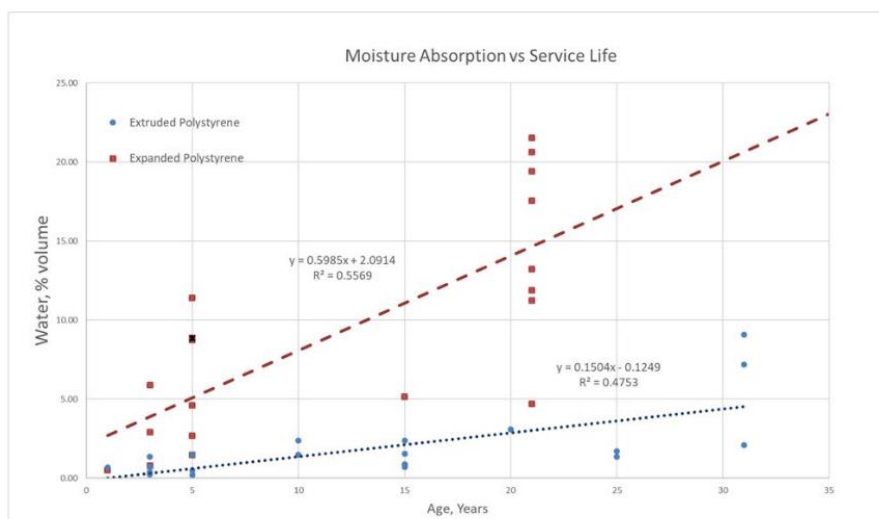
4.4 Zkoušení vlhkostního namáhání XPS

Bylo provedeno značné množství experimentů a zkoušek nasákavostí extrudovaného polystyrenu od 70. let do dnešní doby. Tyto zkoušky a experimenty naznačují důležité poznatky a objevy, které popisují a vysvětlují chování XPS při styku s vodou. První zkouška byla vliv zmrazování a rozmrazování na nasákavost XPS, kterému je konstrukce střechy vystavena během roku. Druhé bylo nejdelší zaznamenané měření zabudovaného XPS v konstrukci, kde je znázorněn trend zvyšující se nasákavosti. Třetí byl experiment, který znázorňoval míru degradace tepelných izolací se zvyšující se nasákavostí. Poslední experiment se týkal měření dlouhodobé nasákavosti a tepelné vodivosti na experimentálních inverzních střeších po dobu 20 let.

Dosud nejdéle prováděné měření na XPS probíhá v Golivanu na Aljašce od roku 1987 až po současnost. Jedná se o měření XPS na letišti in-situ. Rovněž University of Alaska vytvořila souhrn několika studií (Esch, Pouliot & Savard), včetně vlastní, která se zabývala dlouhodobým zkoušením nasákavosti XPS, vypočtené hodnoty jsou v tab. 1 a grafické znázornění v obrázku č. 12. Měření vlhkosti se prováděly dle ASTM C518. Do grafu jsou zahrnuty i měření z jiných studií. V grafu je znázorněný lineární trend nasákavosti. Po 31 letech se průměr objemové nasákavosti pohybuje kolem 5 %. [43, 44]

Tab. 1- Souhrn dat nasákavosti XPS ze studie University of Alaska [43]

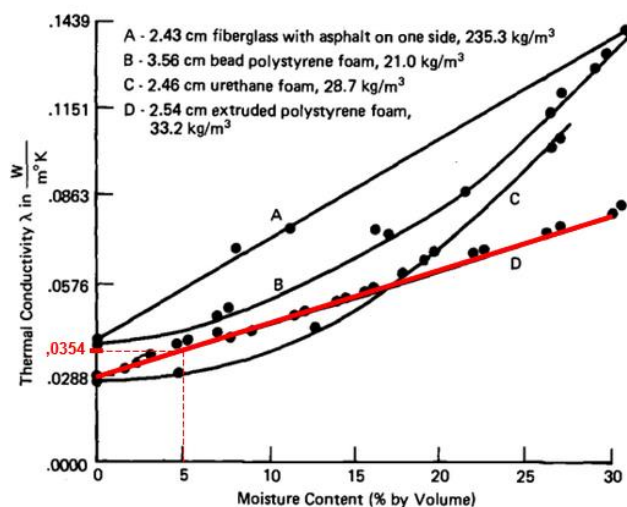
Místo	Tloušťka [cm]	Rok položení	Doba užívání [let]	Objemová nasákavost [%]	Studie
Kotzebue	5	1969	15	2,38	Esch
Kotzebue	5	1969	15	0,89	
Buckland	7,5	1981	3	0,41	
Buckland	7,5	1981	3	0,23	
Deering	5	1981	3	1,37	
Chitina	5	1969	15	0,71	
Chitina	5	1969	15	0,88	
Chitina	5	1969	15	1,54	
Bonanza Creek	5	1974	10	1,48	
Bonanza Creek	5	1974	10	2,38	
Fairhill	5	1979	5	0,5	
Fairhill	5	1979	5	0,2	
Chitina	5	1969	25	1,36	
Chitina	5	1969	25	1,72	
Bonanza Creek	5	1974	20	3,1	
Golivan 1	5	1987	31	9,09	
Golivan 2	5	1987	31	7,18	
Golivan 3	5	1987	31	2,08	
Quebec Test	-	1995	1	0,67	Pouliot and Savard
Quebec Test	-	1995	3	0,73	
Quebec Test	-	1995	5	1,5	



Obrázek 12- Trend závislosti nasákavosti XPS na čase ze studie University of Alaska [43]

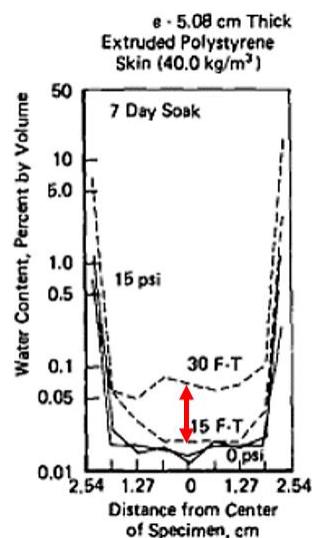
V další studii od firmy DoW Chemical Company bylo vybráno několik izolačních materiálů, kde se zjišťoval vliv objemové vlhkosti na tepelnou vodivost. Vzorky byly umístěné ve vodě o teplotě 30 °C. Tento experiment nesimuluje reálné podmínky ve stavební konstrukci a je předimenzovaný kvůli ilustraci vlivu zvýšení tepelné vodivosti na zvyšující se objemovou vlhkost. Z obrázku č. 13, je patrné, že se pro XPS podařilo dosáhnout objemové nasákavosti až 30 %, kdy došlo ke zvýšení součinitele tepelné vodivosti z 0,0288 W/(m·K) na 0,0807 W/(m·K),

Pokud bychom z této závislosti odečetli 5 % objemové nasákavosti, které byly naměřeny v Golivanu před 31 lety, dostali bychom se k hodnotě součinitele tepelné vodivosti 0,0354 W/(m·K), což znamená zhoršení tepelné vodivosti o 0,007 W/(m·K). [44]



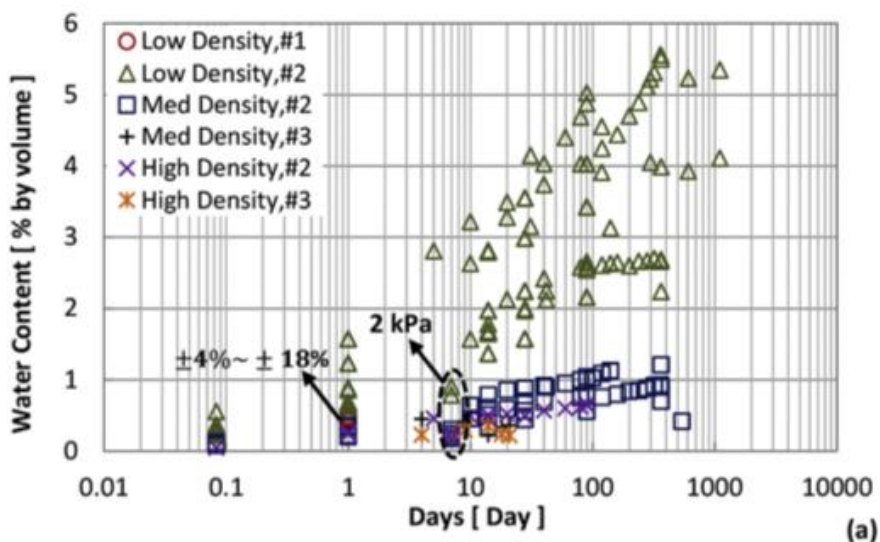
Obrázek 13 - Graf závislosti tepelné vodivosti na objemové vlhkost (XPS-křivka D) [44]

Pro zjišťování vlivu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů (freeze-thaw cycle) na nasákavost extrudovaného polystyrenu byl navržen experiment. Zmrazovací fáze cyklu měla teplotu $-2,22\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozmrazovací fáze cyklu měla $1,11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzorky o hraně $5,08\text{ cm}$ byly na 7 dní ponořeny do vody a vystaveny 15 až 30 cyklům. Jeden cyklus se skládal z 1,5 hodiny zmrazování a 3 hodin rozmrazování. Poté se vzorky rozřezaly a zjišťovala se míra nasákavosti v jednotlivých segmentech. Bylo zjištěno, že F-T cykly mají vliv na míru nasákavosti. S přibývajícými cykly se zvyšuje nasákavost, vlivem vznikajícího tlaku způsobeným fázovou přeměnou. Při zmrznutí vody se zvyšuje její objem o 9 %. Červenou šipkou na obrázku č. 14 je znázorněn přírůstek uprostřed vzorku po 15 a 30 cyklech. Dále bylo zjištěno, že vyšší nasákavost se vykazuje právě na krajích vzorku. [44]



Obrázek 14 - Rozmístění vlhkosti po celé délce vzorku při F-T cyklech [44]

V roce 2017 byl vytvořen přehled studií a zkoušek týkajících se EPS a XPS. Přehled zohledňuje odlišnou metodiku a snaží se statisticky poukázat na závislosti mezi objemovou vlhkostí, časem a tepelnou vodivostí. Nejčastější zkoušky na nasákavost byly provedeny pomocí ASTM C272 a ASTM 2842, klimatické komory a in-situ. Bylo zjištěno, že drtivá většina vzorků přijímala vlhkost v závislosti na čase. Každé XPS v různé míře zvyšovalo nasákavost v závislosti na objemové hmotnosti, kdy vzorky s nejnižšími objemovými vlhkostmi měly nejvyšší nasákavost v čase, tyto trendy jsou patrné z obrázku č. 15. [45]



Obrázek 15 - Graf závislosti objemové vlhkosti na čase pro jednotlivé objemové hmotnosti XPS dle ASTM 2842 [45]

Další významný experiment byl proveden ve Fraunhofer Institute for Building Physics v Německu. Byly zde vytvořeny 3 různé skladby inverzních střech, které jsou vypsány v tab. 2, o jednotlivých plochách 9 m². Testy probíhaly od roku 1985 do roku 2004, jednalo se tedy o interval zhruba 20 let. Experiment se zaměřoval na objemovou nasákavost v extrudovaných deskách a vliv vlhkosti na tepelnou vodivost. Měření probíhalo jednou až dvakrát ročně. [57]

Tab. 2 - Skladby měřených inverzní střech [57]

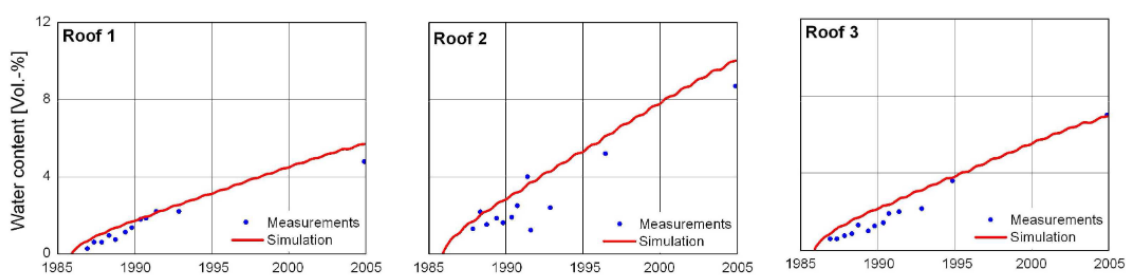
Objekt	Materiál	Tloušťka [mm]
Střecha 1 1985–2004	Substrát	80
	Štěrkový násyp	50
	Separáční vrstva	-
	Extrudovaný polystyren A	100
Střecha 2 1985–2004	Substrát	80
	Štěrkový násyp	50
	Separáční vrstva	-
	Extrudovaný polystyren B	100
Střecha 3 1985–2004	Substrát	80
	Separáční vrstva	-
	Drenážní desky EPS	-
	Extrudovaný polystyren	80

Testy prokázaly, že se dlouhodobá nasákavost zvyšovala v průběhu let. Dlouhodobá nasákavost se pohybovala od 4,8 % do 8,7 %, jak je patrné z tab. 3 a obrázku č. 16. Je zde i zmíněna závislost pro XPS, podle které se zvyšovala tepelná

vodivost o 2,8 % s každým dalším 1% přírůstkem objemové vlhkosti. Z toho vyplynulo zvýšení součinitele tepelné vodivosti desek až na 125 % hodnoty suchého stavu. Hodnoty byly měřeny a simulovány, čímž bylo zjištěno, že simulované hodnoty korespondovaly s hodnotami naměřenými. [57, 58]

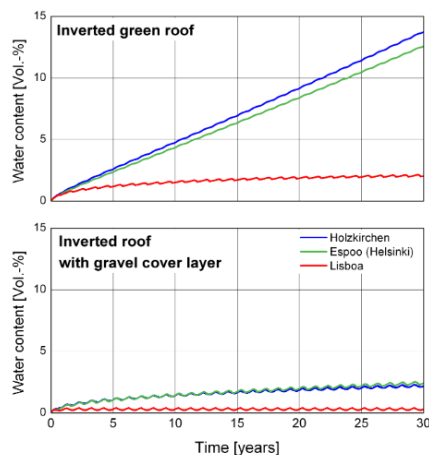
Tab. 3 – Naměřená objemová nasákavost v [%] během testovacího období [57]

Objekt	1986	1987	1988	1989	1990	1992	1996	2004
Střecha 1	0,29	0,59	0,85	1,26	1,83	2,22	-	4,79
Střecha 2	-	1,28	1,86	1,74	2,19	2,62	5,18	8,70
Střecha 3	0,60	0,84	1,20	1,13	1,68	2,16	-	7,01



Obrázek 16 – Naměřené a simulované hodnoty objemové nasákavosti pro všechny střechy během 20 let [57]

Z experimentů bylo vyvozeno několik faktorů, které ovlivňovaly objemovou nasákavost. Hlavními faktory byly typ krycí vrstvy, difúzní odpor, venkovní klima a teplota pod střechou. Pro lepší zmapování vlivu klimatu byly postaveny další experimentální střechy v Espoo (Finsko) a Lisabonu (Portugalsko). Střechy měly stejné skladby jako v Německu. Bylo zjištěno, že chladnější klima způsobovalo vyšší objemovou nasákavost desek XPS, což mělo za následek vyšší tepelnou vodivost. Tento vliv je patrný z obrázku č. 17. Důvodem byla tvorba vodního filmu pod izolací dosahující více než 10 mm, který přispíval k difúznímu toku a nemožnosti vyschnutí kvůli vrchní vrstvě na izolaci. V Lisabonu oproti Espoo jsou teplejší zimy a vytváří se tak menší teplotní gradient napříč izolací. Další výhodou bylo, že v Lisabonu byla horká a suchá léta, která napomáhala k vysychání desek. Dále bylo pozorováno, že střechy se šterkovým násypem lépe odvádějí vlhkost než střechy se substrátem, které vlhkost spíše akumulovaly. [57]

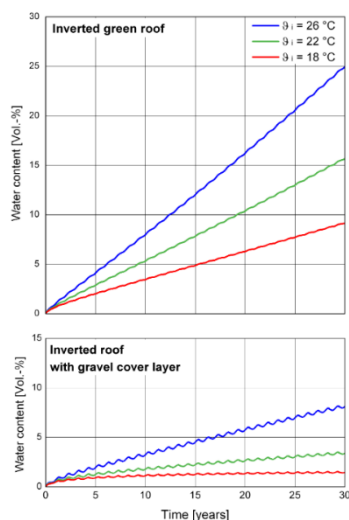


Obrázek 17 – Simulovaná objemová nasákavost XPS pro inverzní zelenou střechu a inverzní střechu se štěrkovým násypem v Holzkirchenu, Espoo a Lisabonu [57]

Prověřen byl i vliv vnitřní teploty pod střechou. Bylo potvrzeno, že teplota pod nosnou konstrukcí střechy pomáhala navyšovat tlak vodní páry, a tedy difúzní tok v XPS deskách. U vnitřní teploty 26 °C, která se vyskytuje například u bazénů, dosahovala po 30 letech až 25 % objemové nasákavosti. Toto vyhodnocení je uvedeno v tab. 4 a obrázku č. 18. [57]

Tab. 4 – Nasimulované objemové nasákavosti pro různé vnitřní teploty po 30 letech [57]

Vnitřní teplota [°C]	Objemová nasákavost [%]
18	10
22	16
26	25



Obrázek 18 – Simulovaná objemová nasákavost XPS pro inverzní zelenou střechu a inverzní střechu se štěrkovým násypem pro vnitřní teplotu 18 °C, 22 °C, 26 °C [57]

PRAKTICKÁ ČÁST

5 METODIKA PRÁCE

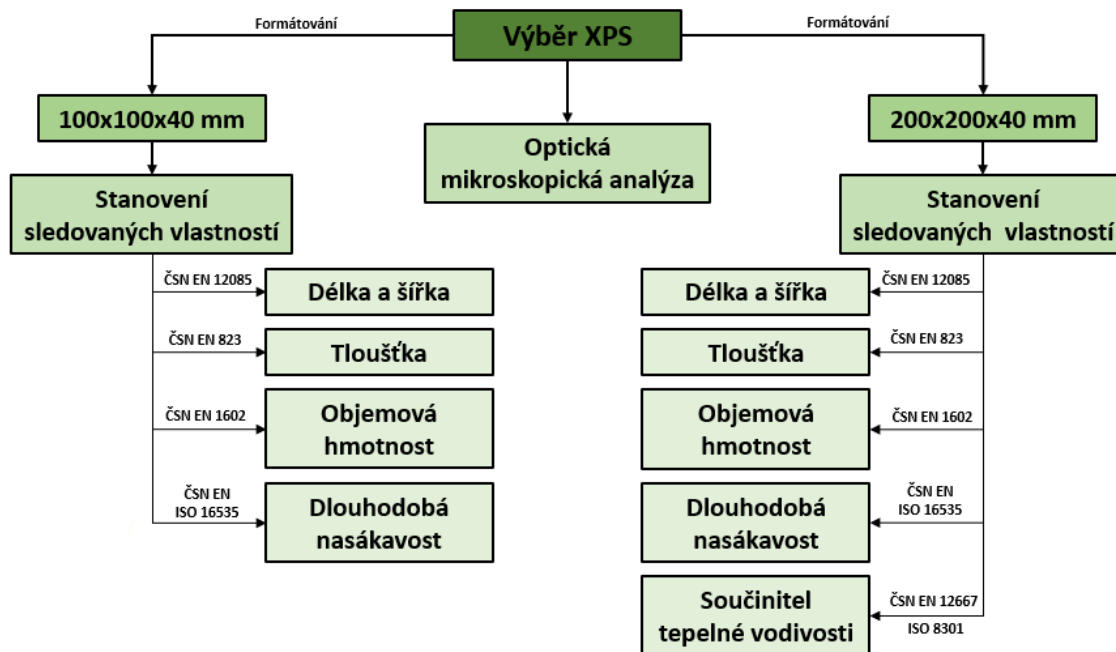
Na základě provedené rešerše byla navržena metodika pro zkoušení XPS během vlhkostního namáhání. Bylo vybráno celkem 6 výrobků. Z každého výrobku byly vytvořeny 2 formáty vzorků po třech vzorcích. Jeden formát měl rozměry 100x100x40 mm a druhý formát měl rozměry 200x200x40 mm. Na každém výrobku byla provedena optická mikroskopická analýza pro zmapování buněčné struktury, velikosti buněk a vliv topného drátu na povrch.

Pro formát 100x100x40 mm se určily vybrané vlastnosti jako délka, šířka, tloušťka, objemová hmotnost a dlouhodobá nasákavost. Dlouhodobá nasákavost se zkoušela podle ČSN EN ISO 16535 metodou 2B s úpravou. Vzorky byly zmenšeny z 200x200 mm na 100x100 mm a doba zkoušení byla prodloužena z 28 dnů na 84 dnů pro lepší znázornění trendu přibývajících nasákavosti. Po 84 dnech byla metoda s počátečním zvlhčením nahrazena osušením buničinou z důvodu vysokých nepřenositelností. Z výsledků byla vyjádřena závislost přírůstků objemové vlhkosti na čase.

Pro formát 200x200x40 mm se stanovily vlastnosti podobným způsobem, navíc se stanovil součinitel tepelné vodivosti dle ČSN EN 12667 (ISO 8301). Vzorky se ponořily pod vodu a změřil se součinitel tepelné vodivosti v suchém a nasáklém stavu. Z naměřených hodnot se stanovila závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové vlhkosti.

Metodika byla rozdělena do následujících částí:

- výběr zkušebních vzorků,
- formátování vzorků,
- stanovení vybraných vlastností.



Obrázek 19 - Metodika práce – blokové schéma

5.1 Výběr zkušebních vzorků

Z důvodu vysokých požadavků na tepelně vlhkostní namáhání v inverzních střechách byly vybrány extrudované polystyreny, které se mohou používat pro tento typ konstrukcí (dle specifikace jednotlivých výrobců). Bylo vybráno celkem 6 produktů od různých výrobců, které lze zakoupit na stavebním trhu v ČR, a které byly v době provádění prací dostupné. Popis jednotlivých vzorků a jejich vlastnosti deklarované jednotlivými výrobci jsou uvedeny v tabulce 2 níže.

Tab. 5- Výběr extrudovaného polystyrenu

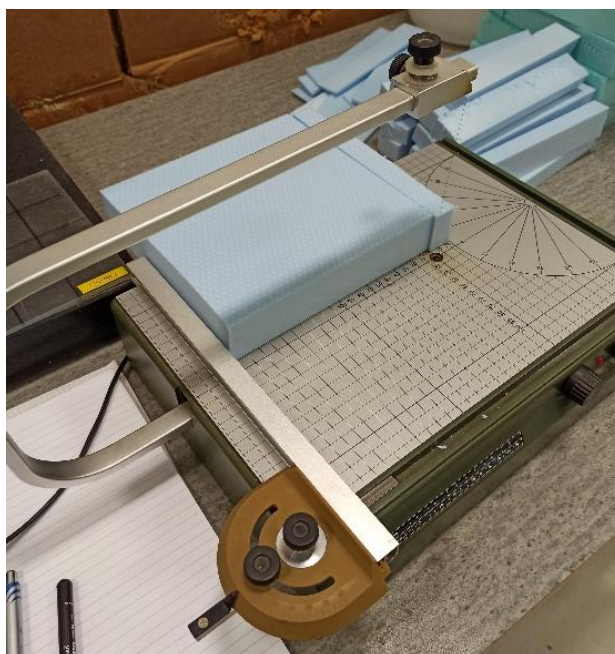
Označení	Výrobce	Povrch	tloušťka [mm]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]	Dlouhodobá nasákavost [%]
1	1	Drsný	40	0,033	0,7
2	2	Jemný	40	0,032	0,7
3	3	Jemný	40	0,032	0,7
4	4	Jemný	40	0,035	0,7
5	5	Drsný	40	0,033	0,7
6	6	Drsný	40	0,034	0,7



Obrázek 20 - Výběr extrudovaného polystyrenu

5.2 Formátování vzorků

Nejprve byly vzorky předběžně nařezány ocelovým zalamovacím nožem se zásobníkem na planžety. Byly vytvořeny celkem dvě sady o rozměrech 120x120x40 mm a 220x220x40 mm. Vzorky byly přesněji nařezány topným drátem. Každý formát obsahoval 3 vzorky od každého výrobce tj. 18 kusů. V prvním formátu byly nařezány vzorky o rozměrech 100x100x40 mm. V druhém formátu měly vzorky rozměr 200x200x40 mm. Tři vzorky od výrobce byly vybrány ze tří 3 desek a nařezány tak, aby neobsahovaly žádné hrany původního výrobku. [46]



Obrázek 21 - Formátování vzorků topným drátem

5.3 Stanovení vybraných vlastností

5.3.1 Stanovení délky a šířky

Rozměry vzorků po naformátování byly změřeny dle normy ČSN EN 12085: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení lineárních rozměrů zkušebních těles. Zkušební tělesa byla uložena na více než 6 hodin při (23 ± 5) °C a relativní vlhkosti (50 ± 5) %. Délka l a šířka b byla měřena dvakrát na obou okrajích vzorků pomocí kovového pravítka. Hodnoty byly zaokrouhleny na nejbližších 0,5 mm. Ze dvou hodnot byla určena střední hodnota rozměru. Střední hodnota byla zaokrouhlena na nejbližší 1 mm. [48]

5.3.2 Stanovení tloušťky

Tloušťka d byla měřena pomocí číselníkového úchylkoměru dle ČSN EN 823: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky. Zkoušení se provádí při (23 ± 5) °C a relativní vlhkosti (50 ± 5) %. Vzorek byl umístěn na základnu a přes přítlačnou desku, která působila celkový tlak 50 Pa, byla změřena tloušťka vzorku pomocí číselníkového úchylkoměru. Byly provedeny dvě měření pro každý vzorek. Ze dvou hodnot byla určena střední hodnota zaokrouhlená na nejbližší milimetr. [49]



Obrázek 22 - Měření tloušťky úchylkoměrem

5.3.3 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost ρ_d byla vypočtena dle normy ČSN EN 1602: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti. Po změření všech rozměrů byli vypočítány objemy vzorků. Pro vzorky byly na váze zváženy hmotnosti s přesností 0,5 %. Objemová hmotnost byla vypočtena z objemu a hmotnosti vzorků. [50]

Objemová hmotnost se vypočítá dle vzorce:

$$\rho_d = \frac{m}{V} \quad (\text{Rovnice 9})$$

Kde je:

ρ_d	objemová hmotnost vzorku na tři platné číslice [kg/m ³];
m	hmotnost vzorku [kg];
V	objem vzorku [m ³].

5.3.4 Stanovení dlouhodobé nasákavosti při plném ponoření

5.3.4.1 Sada vzorků o rozměrech 100x100 mm

Dlouhodobá nasákavost byla zjišťována dle normy ČSN EN ISO 16535: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření. Vzorky s kolmo řezanými hranami se zkoušeli při (23±5) °C. Vzorky byly zkoušeny metodou 2B, kdy byly zkušební vzorky úplně ponořeny pod vodu po dobu 84 dní. Zkušební vzorky byly umístěny do nádržky s vodou a zatíženy tak, aby horní povrchová plocha zkušebního tělesa byla ponořena (50±2) mm pod hladinu. Po 10 s bylo zkušební těleso vyjmuto a vodorovně přeneseno na misku na váhu během 5 s. Tím byla stanovena hmotnost m_1 . Poté byly zkušební vzorky opět vloženy do nádržky s vodou a ponořeny. Po každých 28 dnech bylo zkušební těleso vyjmuto z vody a vodorovně položeno na misku na váze během 5 s. Tímto byly zváženy hmotnosti m_{28} , m_{56} , m_{84} . Po 84 dnech byly vzorky otírány buničinou místo používání metody 2B. Tímto byla zvážena hmotnost m_{84w} .

Dlouhodobá nasákavost při plném ponoření metodou 2B pro jednotlivé dny se vypočítala jako W_{p28} , W_{p56} , W_{p84} . Metodou osušení buničinou se vypočítala dlouhodobá nasákavost W_{p84} .

Dlouhodobá nasákavost je udávána v objemových procentech a vypočítá se ze vztahu: [51]

$$W_p = \frac{m_{28} - m_1}{V_0} \cdot \frac{100}{\rho_w} \quad (\text{Rovnice 10})$$

Kde je:

m_1	hmotnost vzorku s počátečním navlhčením [kg];
m_{28}	hmotnost vzorku po 28 dnech metodou 2B [kg];
V_0	počáteční objem vzorku [m ³];
ρ_w	hustota vody, uvažovaná hodnota 1000 kg/m ³ ;
W_p	se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 objemových procent [%].



Obrázek 23 - Zkouška dlouhodobé nasákavosti při plném ponoření metodou 2B

5.3.4.2 Sada vzorků o rozměrech 200x200 mm

U dlouhodobé nasákavosti pro vzorky rozměrech 200x200x40 mm byla pozměněna metoda. Vzorky se po zvlhčení vždy otřely buničinou z důvodu nepřesného měření zjištěného během měření dlouhodobé nasákavosti u vzorků 100x100x40 mm. [51]

Byly zváženy hmotnosti před měřením jednotlivých součinitelů tepelné vodivosti m_{w1} , m_{w2} , m_{w3} .

Dlouhodobá nasákavost byla vypočtena před samotným měřením součinitele tepelné vodivosti W_{p1} , W_{p2} , W_{p3} .

5.3.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven dle 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, dále dle měřidla tepelného toku ISO 8301. Do přístroje FOX 200 Vacuum byl vložen vzorek a byl vytvořen ustálený teplotní spád. Byla zde zaznamenána hustota tepelného toku pomocí diferenčních termočlánků. Uniklé teplo, které procházelo vzorkem bylo dohříváno. Takto se zjistil součinitel tepelné vodivosti suchého vzorku λ_s a jednotlivých měření nasáklého vzorku $\lambda_{w1}, \lambda_{w2}, \lambda_{w3}, \dots$.

Z odečtu napětí na měřících hustoty tepelného toku byl vypočten součinitel tepelné vodivosti ze vztahu: [52, 53]

$$\lambda_{sam} = \frac{U \cdot k_m \cdot d_m}{\theta_{hd} - \theta_{cd}} \quad (\text{Rovnice 11})$$

Kde je:	λ_{sam}	součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)];
	U	napětí na měřidle hustoty tepelného toku [V];
	k_m	kalibrační konstanta [W/m ²];
	d_m	tloušťka vzorku [m];
	θ_{hd}	povrchová teplota teplé strany vzorku [°C];
	θ_{cd}	povrchová teplota chladné strany vzorku [°C].

5.3.6 Optická mikroskopická analýza

Optická mikroskopie je používána pro pozorování materiálu, a to od mikrostruktur až po makrostruktury. Pohybuje se v rozsahu od milimetrů k nanometrům. Velikost buněk XPS se pohybuje v rozmezí 100 μm až 1 mm. Velikost se odvíjí především od použité technologie výroby. Optická mikroskopie se prováděla v reálném zvětšení od 9,6x až 637x. Analýza XPS byla prováděna optickým mikroskopem Keyence VHX-950f. Optická mikroskopie byla rozdělena na následující části: [54]

- určení velikosti buněk pro jednotlivé výrobky,
- zjištění uzavřenosti buněk vlivem formátování topným drátem,
- určení rozdílných velikostí buněk v různých tloušťkách výrobků,
- zmapování výrobků všemi dostupnými zvětšeními.

6 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ

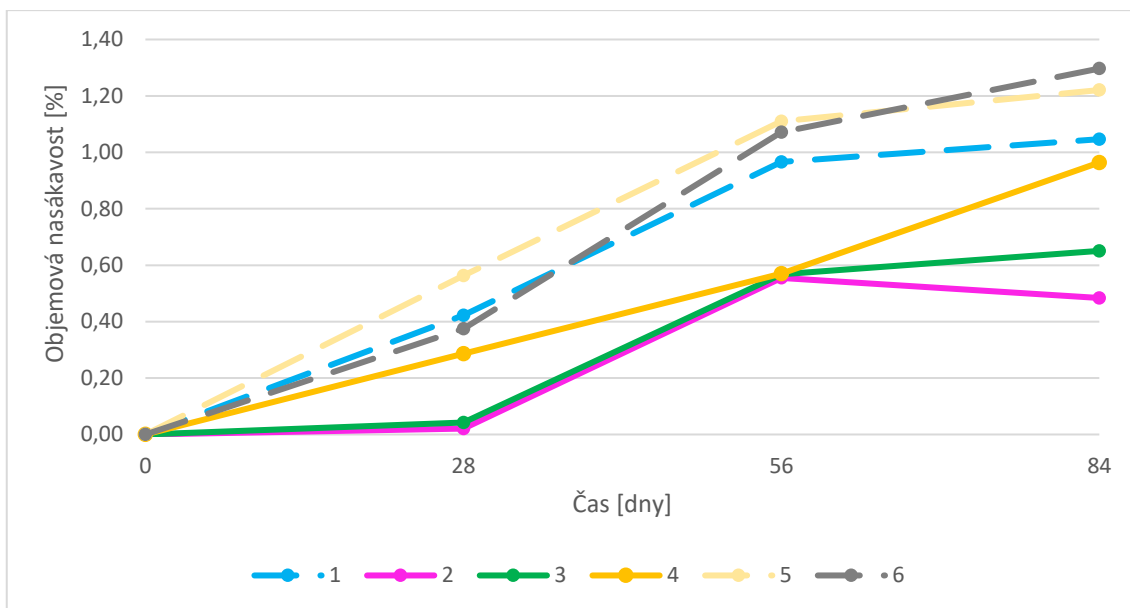
6.1 Dlouhodobá nasákavost při počátečním zvlhčení

Tab. 6 – Naměřené a vypočítané hodnoty

Vzorek	l [mm]	b [mm]	d [mm]	m ₀ [g]	ρ _d [kg/m ³]
1.1	100	100	38,90	13,06	33,6
1.2	101	101	39,00	13,08	32,9
1.3	101	101	38,90	13,04	32,9
2.1	100	100	39,80	11,09	27,9
2.2	100	100	40,30	11,40	28,3
2.3	100	100	40,20	11,46	28,5
3.1	101	101	40,00	11,52	28,2
3.2	100	100	39,90	11,40	28,6
3.3	100	100	40,00	11,46	28,7
4.1	98	99	40,40	12,99	33,1
4.2	99	100	40,30	13,01	32,6
4.3	99	98	40,30	12,97	33,2
5.1	99	99	40,60	12,44	31,3
5.2	99	98	40,60	12,41	31,5
5.3	98	98	40,70	12,37	31,6
6.1	98	100	40,10	13,03	33,2
6.2	99	99	40,10	13,03	33,2
6.3	100	99	40,10	13,08	32,9

Tab. 7 – Změřené a vypočítané hmotnosti a objemové nasákavosti při počátečním zvlhčení

Vzorek	m ₀ [g]	m ₁ [g]	m ₂₈ [g]	m ₅₆ [g]	m ₈₄ [g]	W _{p28} [%]	W _{p56} [%]	W _{p84} [%]
1.1	13,06	15,32	16,76	19,1	20,13	0,37	0,97	1,24
1.2	13,08	15,22	16,97	18,94	19,24	0,44	0,94	1,01
1.3	13,04	15,14	16,92	19,00	18,61	0,45	0,97	0,87
2.1	11,09	13,12	13,16	15,24	14,36	0,01	0,53	0,31
2.2	11,40	13,11	13,23	16,23	15,76	0,03	0,77	0,66
2.3	11,46	13,50	13,59	14,96	15,46	0,02	0,36	0,49
3.1	11,52	13,39	13,67	15,54	15,33	0,07	0,53	0,48
3.2	11,40	13,32	13,46	15,44	16,89	0,04	0,53	0,89
3.3	11,46	13,48	13,57	16,07	15,83	0,02	0,65	0,59
4.1	12,99	15,08	16,22	17,14	19,06	0,29	0,53	1,02
4.2	13,01	15,09	15,97	17,29	18,71	0,22	0,55	0,91
4.3	12,97	15,02	16,37	17,49	18,79	0,35	0,63	0,96
5.1	12,44	14,59	16,85	19,30	19,65	0,57	1,18	1,27
5.2	12,41	14,89	17,51	19,05	19,14	0,67	1,06	1,08
5.3	12,37	14,56	16,32	18,78	19,65	0,45	1,08	1,30
6.1	13,03	15,12	16,49	20,18	20,37	0,35	1,29	1,34
6.2	13,03	15,09	16,37	18,66	19,88	0,33	0,91	1,22
6.3	13,08	15,18	16,96	19,20	20,46	0,45	1,01	1,33



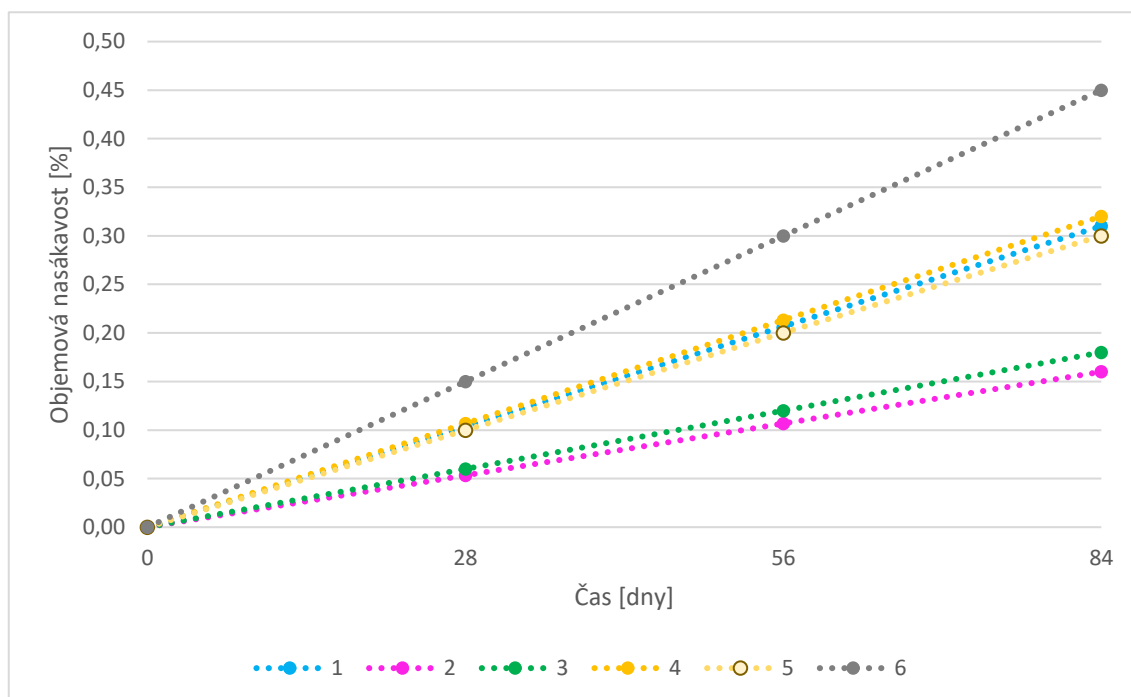
Graf 1- Závislost objemové nasákavosti na čase při počátečním zvlhčení

Hodnoty objemové nasákavosti se zvyšovaly v závislosti na čase, jak je patrné z grafu 1 a byly uvedeny v tab. 7. Nejvyšší nasákavostí dosahovalo XPS s označením 6, kde hodnota objemové nasákavosti po 84 dnech dosahovalo hodnoty až 1,29 %. Výrobky 1, 5 a 6 měly hrubý (vaflový) povrch, který rovněž přispíval k vyšším objemovým nasákavostem než měly výrobky s jemným povrchem.

6.2 Dlouhodobá nasákavost při osušení

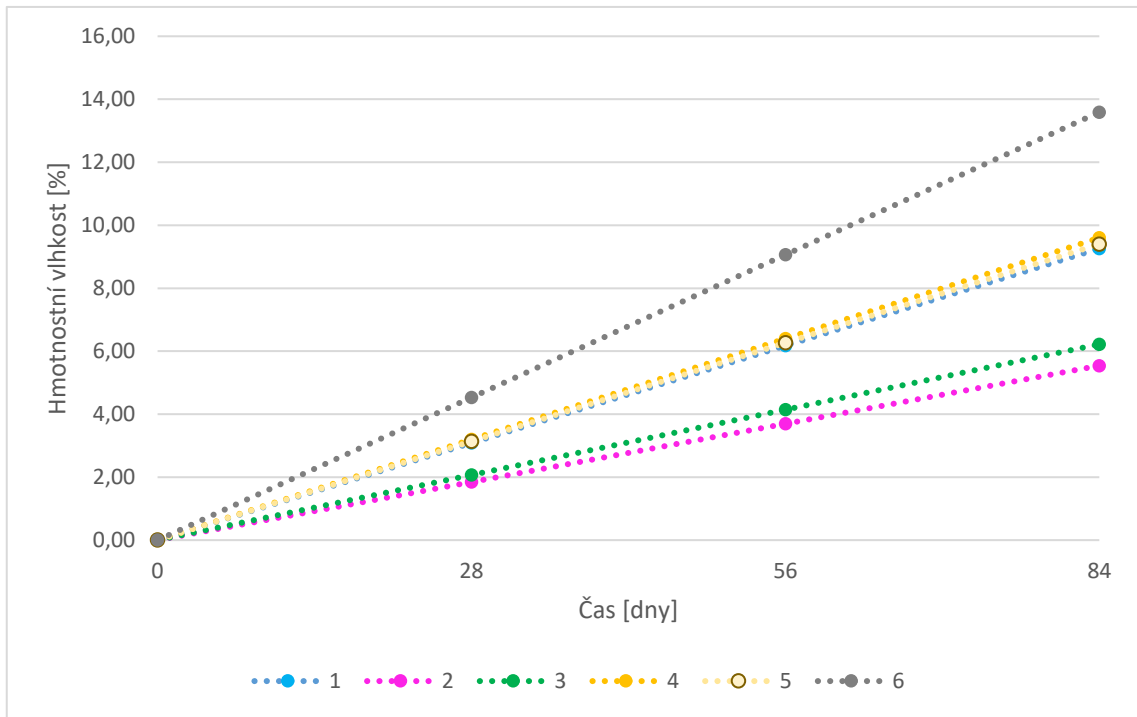
Tab. 8 – Změřené a vypočítané hmotnosti a objemové nasákavosti při osušení

Vzorek	m_0 [g]	m_{84w} [g]	W_{p84} [%]	u_{84} [%]
1.1	13,06	14,34	0,33	9,80
1.2	13,08	14,33	0,31	9,56
1.3	13,04	14,14	0,28	8,44
2.1	11,09	11,71	0,16	5,59
2.2	11,40	12,09	0,17	6,05
2.3	11,46	12,03	0,14	4,97
3.1	11,52	12,35	0,20	7,20
3.2	11,40	12,10	0,18	6,14
3.3	11,46	12,07	0,15	5,32
4.1	12,99	14,15	0,30	8,93
4.2	13,01	14,26	0,31	9,61
4.3	12,97	14,30	0,34	10,25
5.1	12,44	13,78	0,34	10,77
5.2	12,41	13,27	0,22	6,93
5.3	12,37	13,67	0,33	10,51
6.1	13,03	14,65	0,41	12,43
6.2	13,03	14,33	0,33	9,98
6.3	13,08	15,48	0,60	18,35



Graf 2 – Závislost objemové nasákavosti na čase při osušení

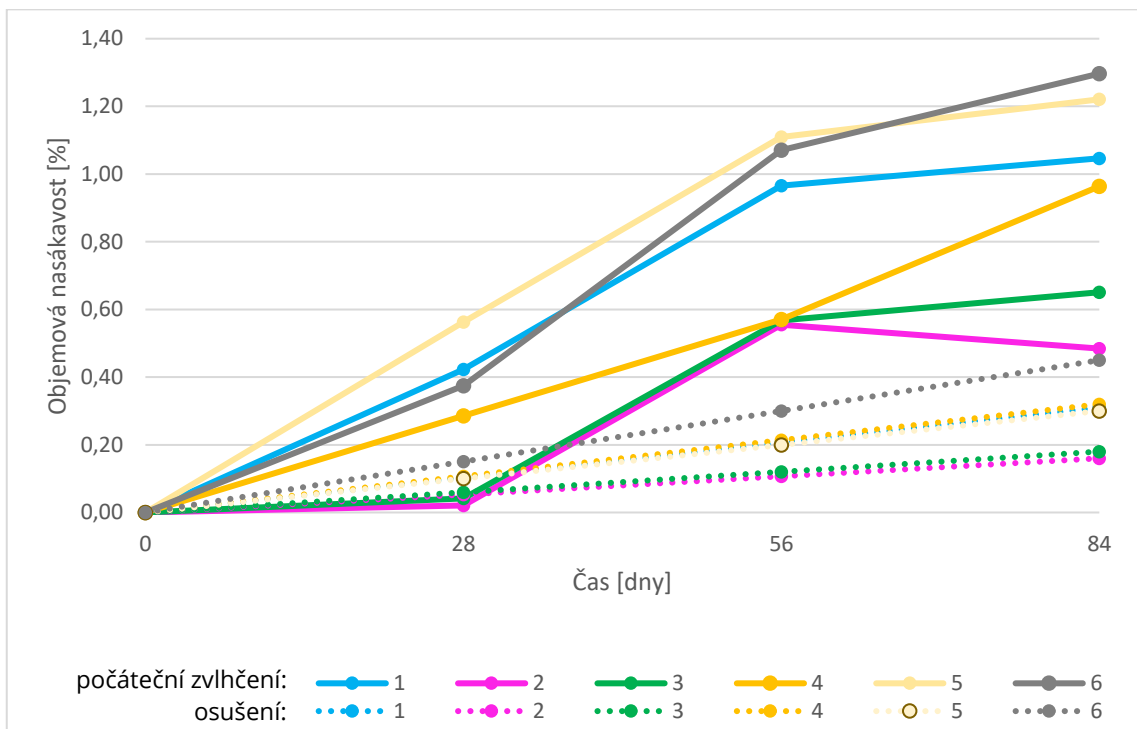
Při této úpravě, kdy byly vzorky osušeny buničinou, vykazovaly nižší objemové nasákavosti. Nejvyšší objemová nasákavost byla 0,6 % po 84 dnech, což bylo uvedeno v tab. 8 a znázorněno v grafu 2.



Graf 3 - Závislost hmotnostní vlhkosti na čase při osušení

Při vypočítání hmotnostní nasákavosti u dlouhodobé nasákavosti po 84 dnech bylo zjištěno, že se hmotnostní nasákavost pohybovala v hodnotách od 4,97 % do 18,35 %, což bylo pozorováno z grafu 3.

6.3 Dlouhodobá nasákavost – porovnání metod při počátečním zvlhčení a osušení



Graf 4 – Porovnání závislosti objemové nasákavosti na čase při počátečním zvlhčení a osušení

Při porovnání obou metod byly pozorovány vysoké odchylky. Plnou čarou byly označeny dlouhodobé nasákavosti s počátečním zvlhčením a tečkovanou čarou dlouhodobé nasákavosti s osušením. Je patrné z grafu 4, že rozdíly nasákavostí dosahovaly až čtyřnásobných hodnot.

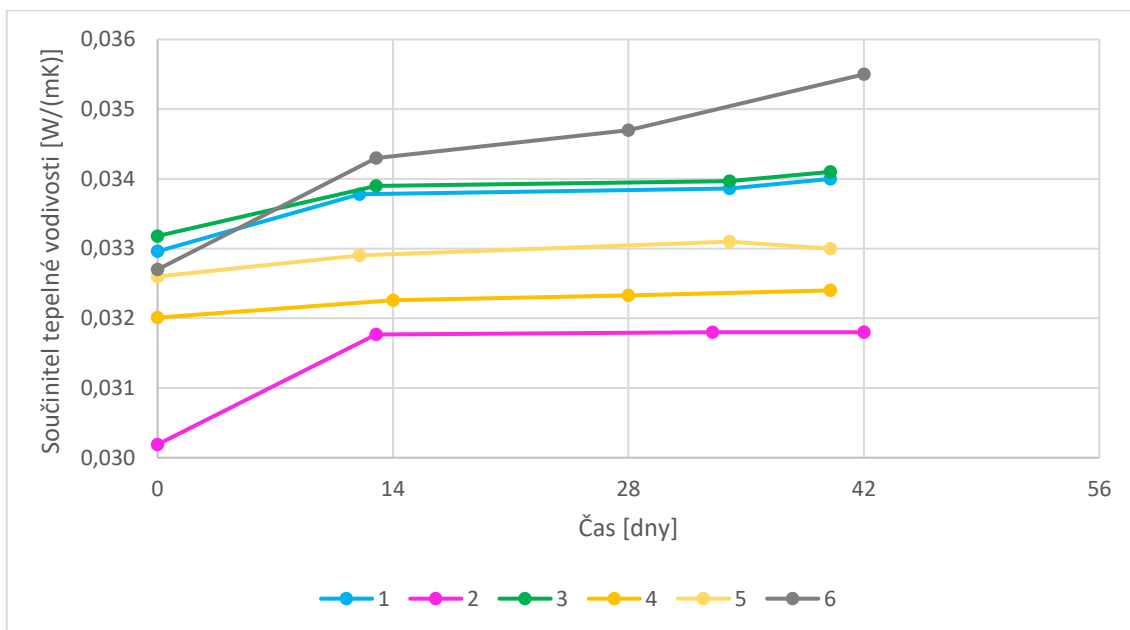
6.4 Stanovení součinitele tepelné vodivosti a dlouhodobé nasákavosti při osušení

Tab. 9- Naměřené a vypočítané hodnoty

Vzorek	l [mm]	b [mm]	d [mm]	m ₀ [g]	ρ _d [kg/m ³]
1.1	201	200	38,90	52,90	33,8
1.2	201	200	38,80	52,44	33,6
1.3	201	201	39,00	52,98	33,6
2.1	199	199	40,40	44,16	27,6
2.2	202	202	39,90	45,19	27,8
2.3	202	198	40,20	44,35	27,6
3.1	201	201	40,10	45,79	28,3
3.2	201	200	40,00	45,45	28,3
3.3	201	200	40,00	45,47	28,3
4.1	201	201	39,53	50,97	31,9
4.2	201	201	39,46	51,58	32,4
4.3	198	200	39,47	51,36	32,9
5.1	200	200	40,19	49,62	30,9
5.2	200	201	40,17	49,76	30,8
5.3	200	200	40,22	49,80	31,0
6.1	201	200	39,48	52,88	33,3
6.2	200	199	39,43	50,43	32,1
6.3	200	201	39,48	52,98	33,4

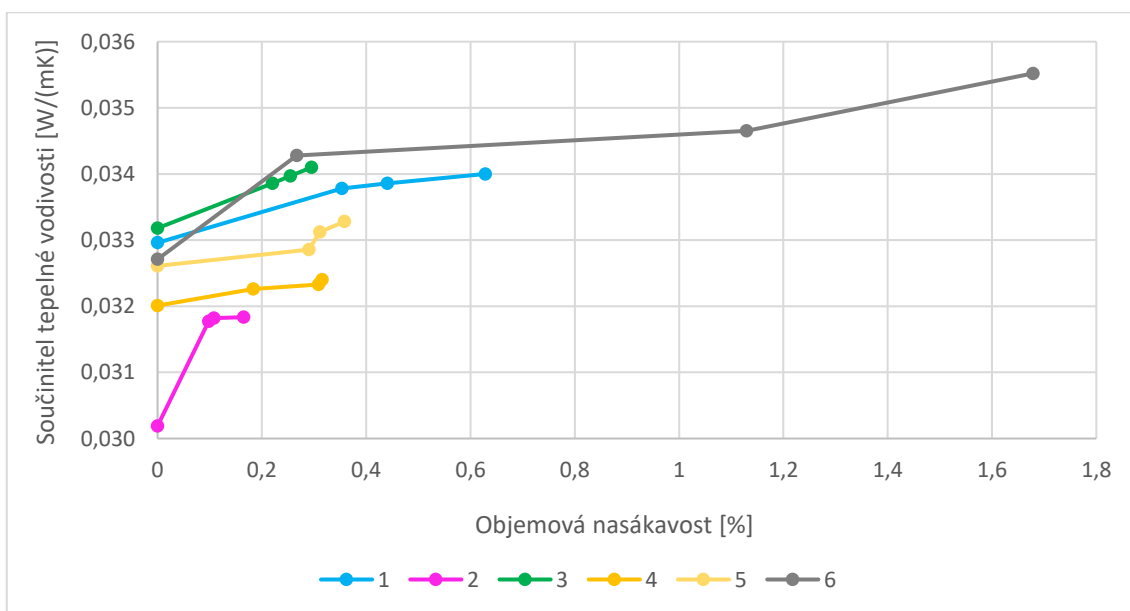
Tab. 10- Změřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti při zkoušce nasákavosti

Vzorek	λ _s [W/(m·K)]	λ _{w1} [W/(m·K)]	λ _{w2} [W/(m·K)]	λ _{w3} [W/(m·K)]	m ₀ [g]	m _{w1} [g]	m _{w2} [g]	m _{w3} [g]	W _{p1} [%]	W _{p2} [%]	W _{p3} [%]
1.1	0,0330	0,0338	0,0339	0,0340	52,918	55,416	62,322	65,271	0,35	0,44	0,63
2.1	0,0302	0,0318	0,0318	0,0318	44,386	44,525	46,235	47,151	0,10	0,11	0,17
3.1	0,0332	0,0339	0,0340	0,0341	45,872	46,034	50,181	50,884	0,22	0,25	0,30
4.1	0,0320	0,0323	0,0323	0,0324	50,965	51,181	56,087	56,278	0,18	0,31	0,32
5.1	0,0326	0,0329	0,0331	0,0333	49,604	50,102	55,554	56,058	0,29	0,31	0,36
6.1	0,0327	0,0343	0,0347	0,0355	52,861	53,691	71,612	80,331	0,27	1,13	1,68



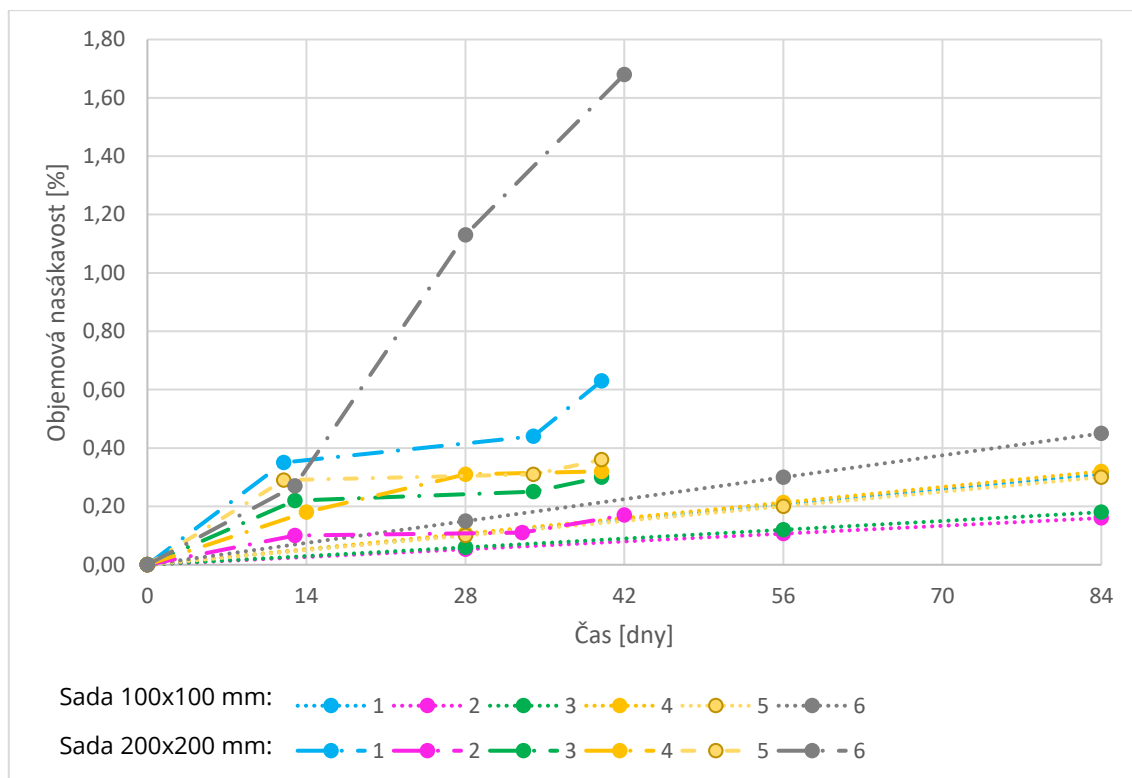
Graf 5 – Závislost součinitele tepelné vodivosti na čase uložení ve vodě

Součinitel tepelné vodivosti se změnil u vzorků nejprve v suchém stavu. Pak byly vzorky ponořeny, následně byly vyjmuty z vody a změřeny v nasáklém stavu. Toto měření se opakovalo ještě dvakrát. Hodnoty byly uvedeny v tab. 10 a graficky znázorněny v grafu 5.



Graf 6 – Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové nasákavosti

Součinitel tepelné vodivosti se zvyšoval se zvyšující se objemovou nasákavostí. Dále je patrné, že každý výrobek měl různé naklonění křivky, což poukazovalo na odlišnou míru degradace pro jednotlivé výrobky. Tento jev byl patrný z grafu 6.



Graf 7 - Porovnání závislosti objemové nasákavosti na čase obou formátu

Při porovnání objemové nasákavosti po osušení buničinou pro oba formáty 100x100x40 mm a 200x200x40 mm byly pozorovány drobné odchylky. Formát 200x200x40 mm měl vyšší hodnoty objemové nasákavosti oproti formátu 100x100x40 mm. Odchylky se pohybovaly ve velmi nízkých hodnotách, kromě výrobku s číslem 6. Dlouhodobá nasákavost pro menší formát byl vyznačen v grafu 7 pomocí tečkované čáry, větší formát byl vyznačen pomocí tečkované čáry.

6.5 Porovnání s deklarovanými vlastnostmi

Tab. 11 – Porovnání deklarovaných a naměřených hodnot

Výrobky	Tloušťka [mm]		Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]		Dlouhodobá nasákavost při plném ponoření [%]	
	ČSN EN 826		ČSN EN 12667		ČSN EN 12087	
	Deklarované	Naměřené	Deklarované	Naměřené	Deklarované	Naměřené
1	40±2	38,9	0,035	0,0330	0,7	0,2
2	40±2	40,1	0,032	0,0302	0,7	0,04
3	40±2	40,0	0,032	0,0332	0,7	0,42
4	40±2	40,3	0,035	0,0320	0,7	0,29
5	40±2	40,6	0,033	0,0326	0,7	0,56
6	40	40,1	0,034	0,0327	0,7	0,37

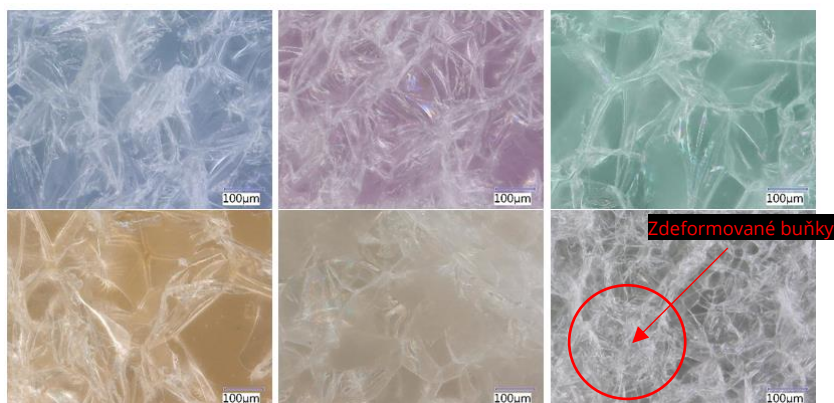
Výrobek 1, 2, 3, 4 a 5 splňují jmenovitou tloušťku d_n s třídou tolerance T1, které byly napsány v Prohlášení o vlastnostech. U výrobku 6 nebyla nalezena třída tolerance. Naměřené tloušťky se stanovovaly podle ČSN EN 826.

Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti splňovaly téměř všechny výrobky kromě výrobku s číslem 3, protože naměřená hodnota u výrobku s číslem 3 překročila hodnotu deklarovanou. Výrobky byly měřeny pětkrát v suchém stavu a poté byla vypočítána průměrná hodnota. Součinitel tepelné vodivosti byl měřen dle ČSN EN 12667.

Deklarovanou dlouhodobou nasákavost splňovaly všechny výrobky. Dlouhodobá nasákavost při plném ponoření se měřila podle ČSN ISO 16535. Výrobky ovšem byly zjišťovány podle ČSN EN 12087, která již není platná.

6.6 Optická mikroskopická analýza

- **Určení velikosti buněk pro jednotlivé výrobky**



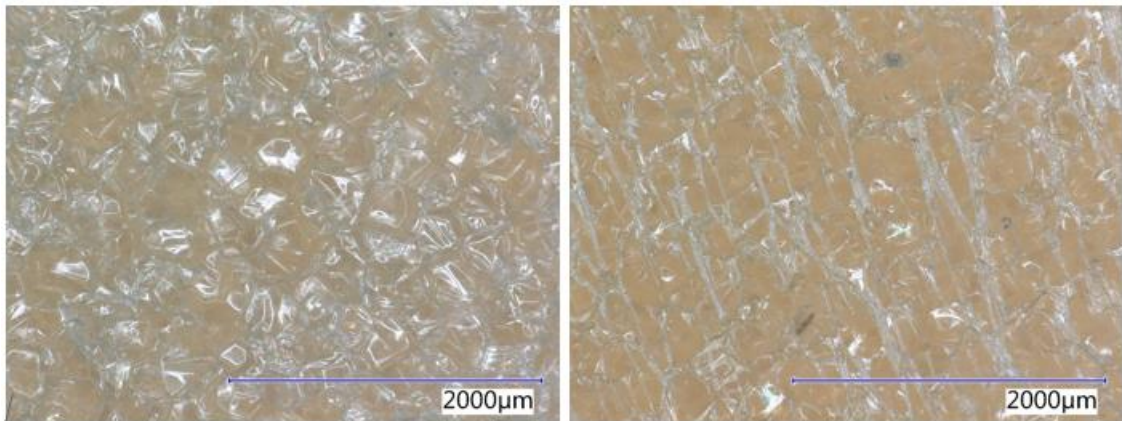
Obrázek 24 – Snímky z optického mikroskopu při reálném zvětšení 159x

Tab. 12 – Velikost buněk pro jednotlivé výrobky

Výrobek	Velikost buněk [µm]
1	100–200
2	80–200
3	50–200
4	80–250
5	120–180
6	30–60

Většina výrobků měla velikost buněk od 80 µm do 200 µm, což bylo uvedeno v tab. 12. U výrobku s číslem 6 bylo zjištěno, že má menší velikost buněk a to od 30 µm do 60 µm. Dále byly objeveny shluky deformovaných buněk u výrobku s číslem 6, jak bylo patrné z obrázku č. 24.

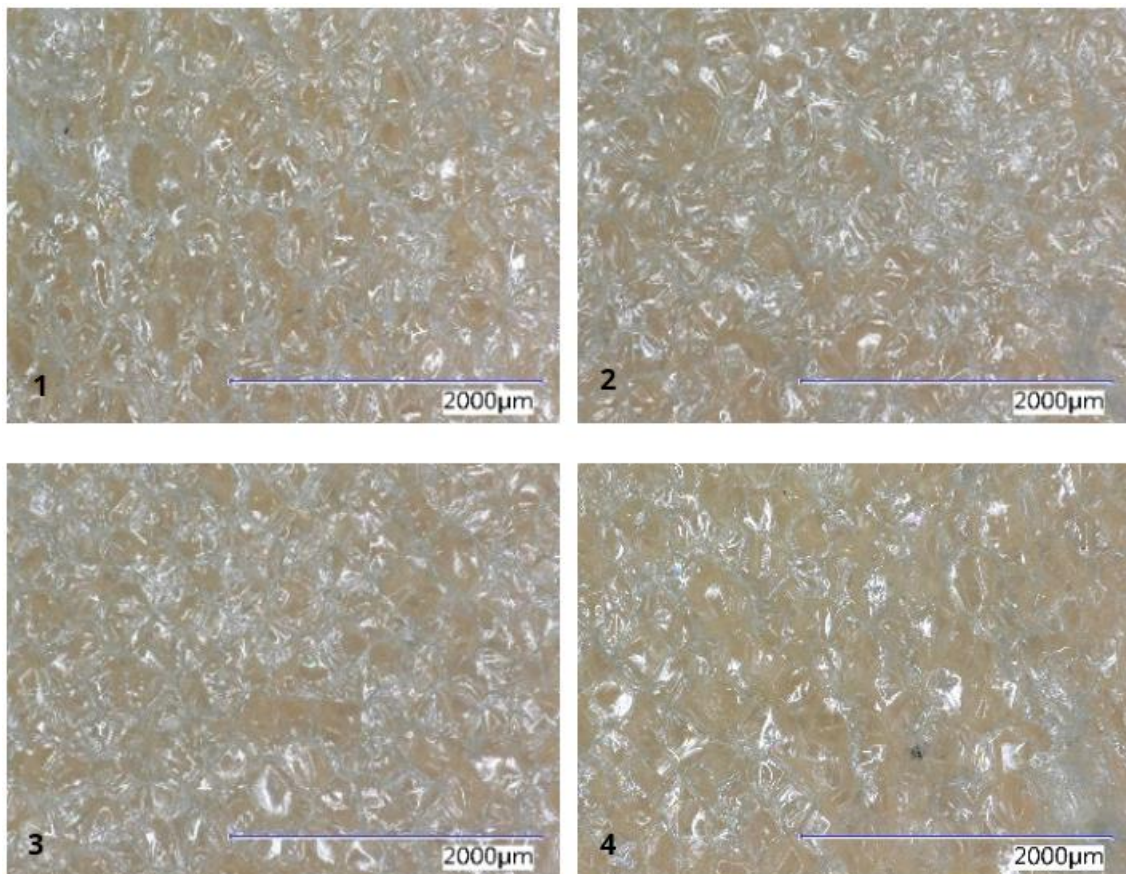
- **Zjištění uzavřenosti buněk vlivem formátování topným drátem**



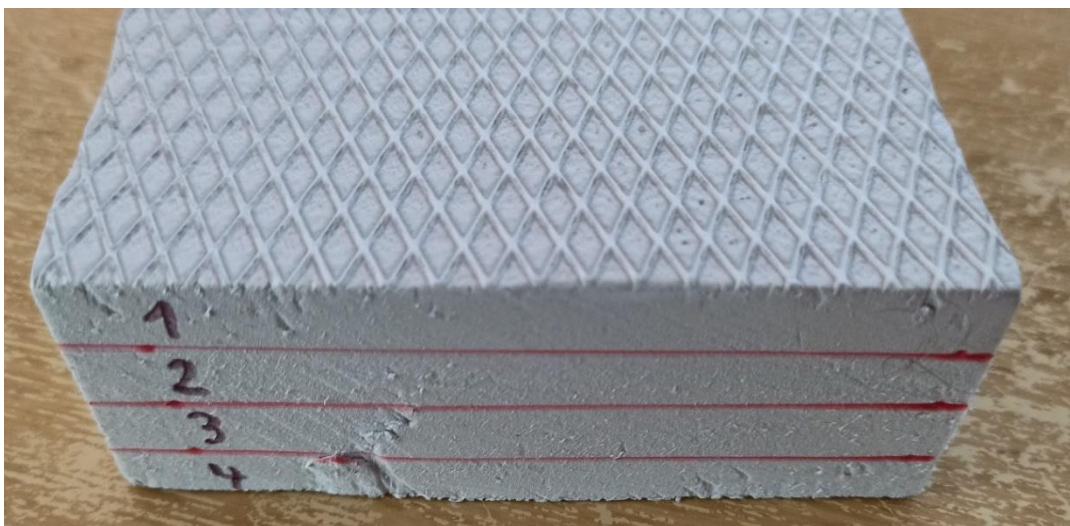
Obrázek 25 - Snímky z optického mikroskopu při reálném zvětšení 32x (řezaná hrana-vlevo, tavená hrana-vpravo)

Z mikroskopických snímků na obrázku č. 25 vyplývá, že tavená hrana neměla jasně rozeznatelné buňky. Byl rovněž pozorován směr formátování topným drátem. Ze snímku z optického mikroskopu nebylo možné určit uzavřené buňky.

- **Určení rozdílných velikostí buněk v různých tloušťkách výrobků**



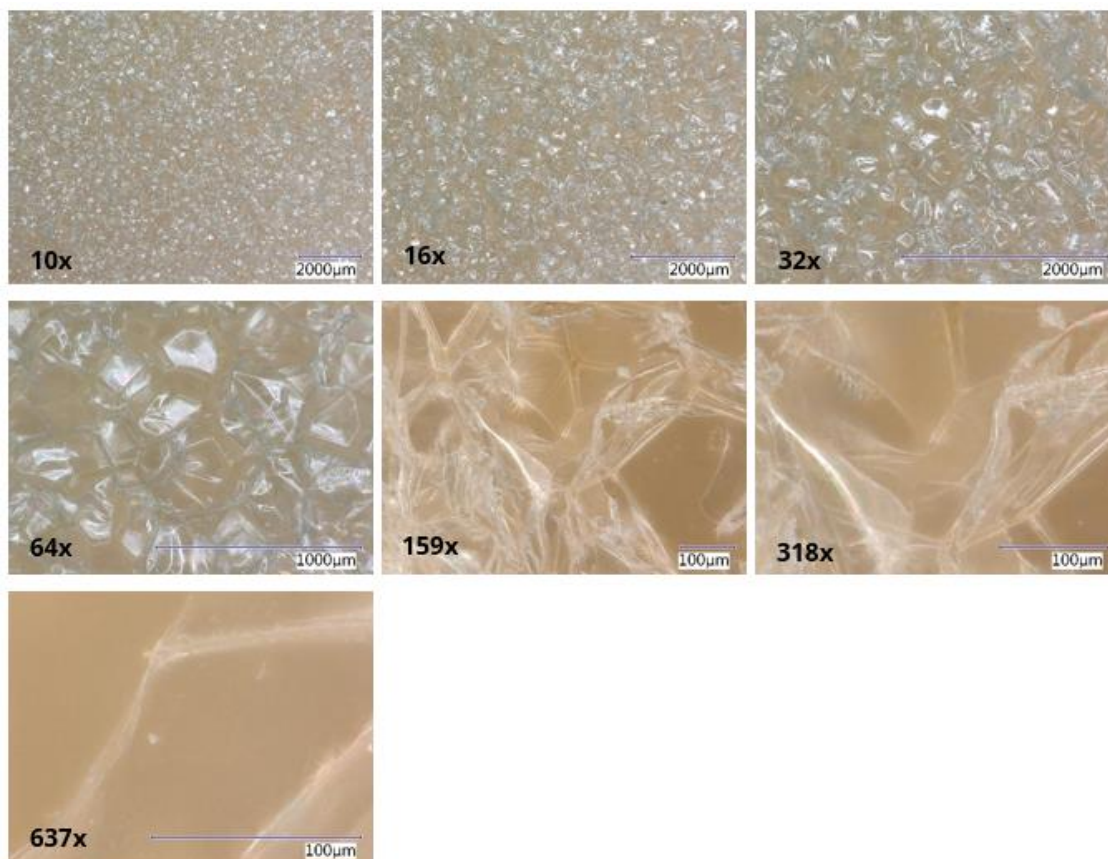
Obrázek 26 - Snímky z optického mikroskopu jednotlivých vrstev při reálném zvětšení 32x



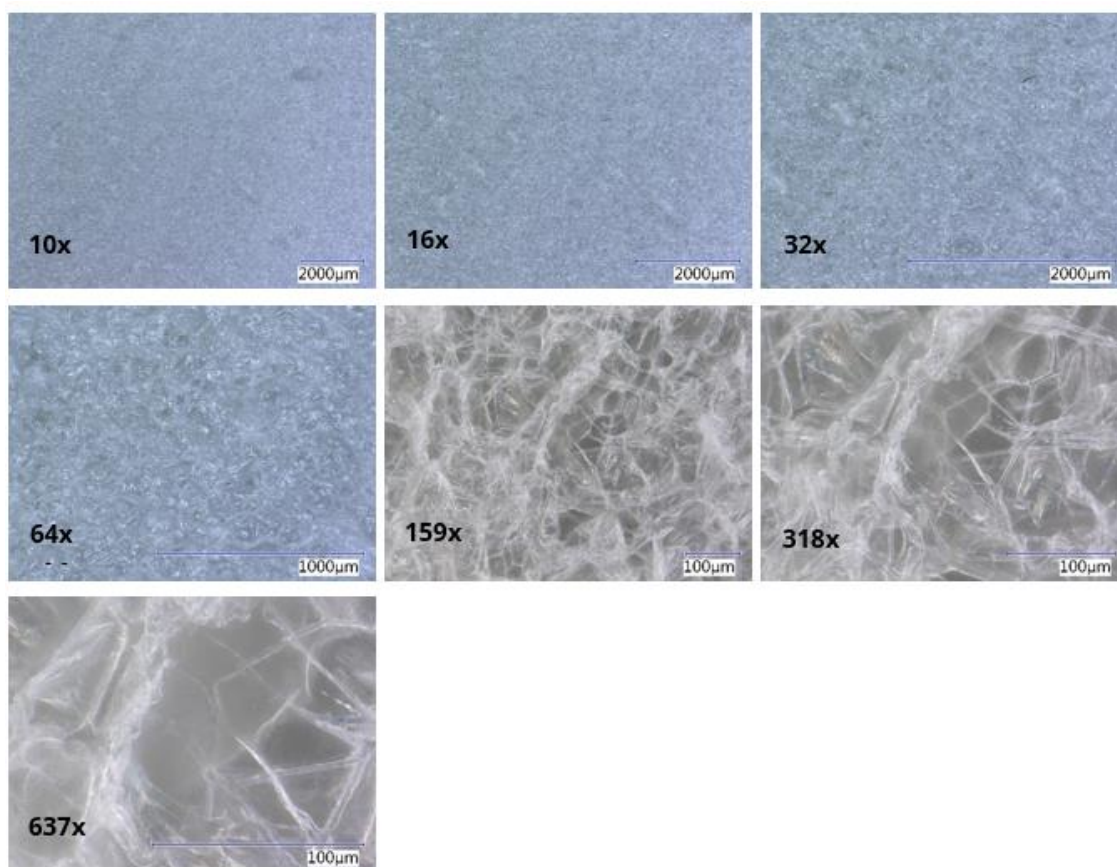
Obrázek 27 – Rozdělení tloušťky vzorku ve čtyřech částech

Z mikroskopických snímků, které jsou na obrázku č. 26 nebyly patrné změny ve velikosti buněk, které by měly být zapříčiněny v důsledku vyrovnávání tlaků extrudovaného polystyrenu při opouštění extrudéru na dopravníkový pás během výroby. Tyto změny nebyly viditelné pravděpodobně z důvodu malé tloušťky vzorku, která činila 40 mm.

- **Zmapování výrobků všemi dostupnými zvětšeními**



Obrázek 28 – Snímky z optického mikroskopu v jednotlivých reálných zvětšení pro výrobek č. 3



Obrázek 29 – Snímky z optického mikroskopu v jednotlivých reálných zvětšení pro výrobek č. 6

U vybraného výrobku 3 byla pozorována pravidelná buněčná struktura s rovnoměrnou velikostí buněk, což bylo znázorněno v obrázku č. 28. Rovněž nebyly pozorované žádné defekty ve struktuře. Výrobky 1, 2, 4 a 5 měly obdobnou strukturu jako výrobek číslo 3. U výrobku s číslem 6 byly pozorovány časté shluky zdeformovaných buněk, které byly dobře pozorovatelné při reálném zvětšení 159x a 318x, což bylo znázorněno v obrázku č. 29.

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Podle naměřených hodnot se vypočtená objemová nasákavost výrobků zvyšovala v závislosti na čase. Pro formát 100x100x40 mm byly použity dvě metody měření. První metodou bylo měření s počátečním zvlhčením a druhou metodu představovalo měření po osušení pomocí buničiny. Hodnoty dlouhodobé nasákavosti po 28 dnech pro výrobky s počátečním zvlhčením dosahovaly v rozmezí od 0,02 % do 0,56 % (viz graf 1). Nicméně bylo pozorováno, že vypočtené dlouhodobá nasákavost vykazovala trend v závislosti na čase. Hodnoty dlouhodobé nasákavosti pro výrobky při počátečním zvlhčení po 84 dnech dosahovaly v rozmezí od 0,49 % do 1,29 % (viz graf 1) a významně převyšovaly hodnoty po 28 dnech. Tento trend demonstroval, že hodnoty vypočtené po 28 dnech nebyly relevantní a zkouška se nejeví jako vhodná pro posuzování dlouhodobé nasákavosti při skutečných podmínkách a době expozice extrudovaného polystyrenu.

Měření metodou po osušení dosahovaly hodnoty dlouhodobé nasákavosti v rozmezí od 0,17 % do 0,6 % (viz graf 2). Pro porovnání obou metod se ukázala metoda s osušením po vyjmutí z vody jako přesnější, protože minimalizovala chybu, která vznikala během manipulace s nasáknutým vzorkem (viz graf 4). Ta byla signifikantní zejména u výrobku s číslem 2 mezi 56. a 84. dnem experimentu, kdy se dlouhodobá nasákavost snižovala. Na základě výsledků z grafu 1 bylo zjištěno, že výrobky se strukturovaným (vaflovým) povrchem měly vyšší objemovou nasákavost než vzorky s hladkým povrchem, jelikož více zadržovaly vodu v důsledku vyššího povrchu, než měly výrobky s povrchem hladkým.

Dlouhodobá nasákavost formátu 200x200x40 mm dosahovala hodnot v rozmezí od 0,10 % do 1,68 %. Na základě našeho měření bylo zjištěno, že výrobek 6 vykazoval významný nárůst dlouhodobé nasákavosti v porovnání s ostatními výrobky, což mohlo být zapříčiněno lidským faktorem. Hodnota tohoto nárůstu u výrobku 6 představovala hodnotu 1,68 %. Naproti tomu naměřené hodnoty ostatních výrobků byly v rozmezí od 0,10 % do 0,63 % (viz graf 7).

Porovnáním naměřených dlouhodobých nasákavostí menšího a většího formátu byla pozorována odchylka v hodnotách mezi jednotlivými formáty, která byla způsobena chybou při měření metodou s osušením výrobku (viz graf 7).

Na základě naměřených výsledků u metody s osušením pro formát 200x200x40 mm byla rovněž vypočtena hmotnostní vlhkost v závislosti na čase.

Vypočtená hmotnostní vlhkost se pohybovala v rozmezí hodnot od 4,97 % do 18,35 % (viz graf 3). Vypočtená hmotnostní vlhkost byla řádově vyšší než vypočtená objemová nasákavost z důvodu nízké objemové hmotnosti materiálu.

Z naměřených hodnot tepelné vodivosti výrobků v suchém a nasáklém stavu bylo zjištěno, že se vzrůstající vlhkostí se zvyšovala tepelná vodivost. Nejvyšší přírůstek byl pozorován u výrobku 6 a to navýšení o 0,0028 W/(m·K), což představovalo přírůstek o 8,56 %. Příčinou tohoto jevu bylo vyplňování vzduchových bublin s nadouvadlem v materiálu vodou, která má vyšší tepelnou vodivost než vzduch. Rovněž bylo pozorováno, že každý výrobek měl jiné naklonění křivky, což bylo zapříčiněno odlišnou mírou degradace materiálu (viz graf 6). To mohlo být způsobeno rozdílnou technologií výroby jednotlivých výrobků, která by mohla být zodpovědná za rozdíly v buněčné struktuře, a tedy i rozdíly v jejich degradaci.

Po porovnání výrobcem deklarovaných a námi naměřených hodnot tloušťkové tolerance, součinitele tepelné vodivosti a dlouhodobé nasákavosti při plném ponoření výrobci splnily téměř všechny sledované parametry (viz tabulka 11). Ověření třídy tolerance tloušťky nebylo možné ověřit u výrobku 6 kvůli absenci deklarované hodnoty od výrobce. U naměřených součinitelů tepelné vodivosti pro jednotlivé výrobky přesáhl deklarovanou hodnotu součinitele tepelné vodivosti pouze výrobek 3. Dlouhodobou nasákavost při plném ponoření splnily všechny výrobky.

Po optické mikroskopické analýze bylo zjištěno, že výrobky měly velikost buněk v rozmezí od 80 μm do 200 μm (viz obrázek 24). Pouze u výrobku 6 byla naměřena hodnota velikosti buněk několikanásobně nižší, a to v rozmezí od 30 μm do 60 μm . Navíc byly u tohoto výrobku pozorovány shluky zdeformovaných buněk. Dále bylo pozorováno, že povrch vzorků se lišil při řezání odlamovacím nožem a topným drátem (viz obrázek 25). Bohužel nebylo možné posoudit pomocí optického mikroskopu vliv způsobu řezání na uzavřenost buněk na povrchové vrstvě materiálu. Současně nebylo možné pozorovat změny velikostí buněk napříč tloušťkou materiálu.

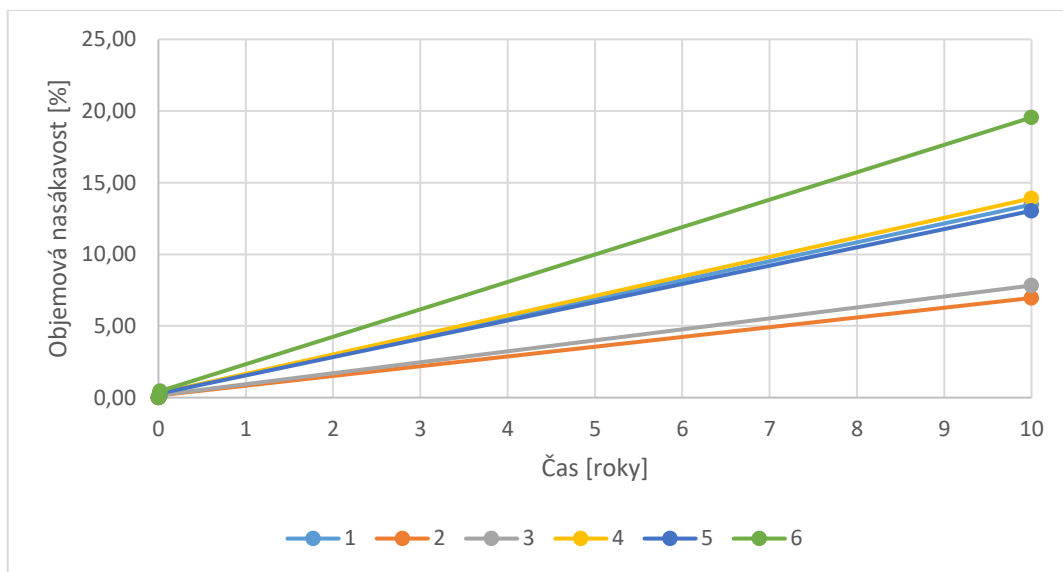
Z již předchozích výzkumných prací bylo zjištěno, že XPS může dosahovat objemových nasákavostí kolem 5 % během 20 až 30 let (viz obrázek 12 a 16). Přičemž tepelná vodivost degradovala s vyšší vlhkostí v XPS (viz obrázek 13).

Dalším významným jevem, který přispíval k vyšším dlouhodobým nasákavostem, bylo zmrazování a rozmrazování (viz obrázek 14). Naměřené a vypočítané hodnoty v této práci se shodují se závěry předchozích výzkumných prací. Objemové nasákavosti dosahovaly hodnot srovnatelným těm z experimentů a vykazovaly obdobný trend. Tepelná vodivost výrobků se rovněž zvyšovala podobným způsobem jako ve výzkumných pracích. [43, 44, 45, 57, 58]

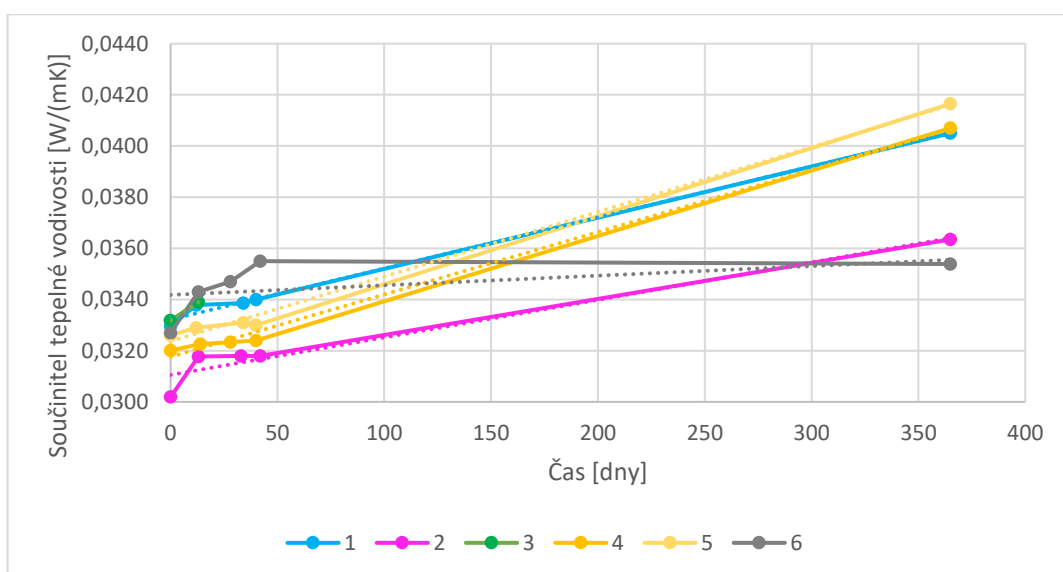
Ve výzkumné práci, kde byly vytvořeny experimentální inverzní střechy bylo zjištěno několik faktorů, které mají přímý vliv na objemovou nasákavost XPS. Do těchto faktorů se řadí typ krycí vrstvy, difúzní odpor materiálu, klimatické podmínky a vnitřní teplota pod střešní konstrukcí. V této práci byla ovšem zjišťována míra nasákavosti během přímého styku materiálu s vodou a například nebylo možné posoudit vliv difúze vodní párou z důvodu technické vybavenosti laboratoře. [57]

Z výsledků práce bylo zjištěno, že měření vlhkosti v extrudovaném polystyrenu je problematické a to z několika důvodů. Prvním důvodem je malé množství přijaté vody v extrudovaném polystyrenu, které je složitě měřitelné. Druhým důvodem je doba měření, jelikož z řady dlouhodobých experimentů je vidět, že extrudovaný polystyren nasákává do relativně vysokých hodnot (viz obrázek 12 a 16). V grafu 2 je vidět, že hodnoty dlouhodobé nasákavosti pro všechny výrobky po 84 dnech je vyšší než ta po 28 dnech. Pokud naměřené hodnoty objemové nasákavost extrapolujeme na dobu 10 let v lineární závislost, dostáváme hodnoty v rozmezí od 6,95 % do 19,55 % jak je vidět v grafu 8. Je nutné zdůraznit, že skutečný trend není lineárního charakteru a v průběhu let spíše klesá. Vypočtené hodnoty se nicméně pohybují v podobných hodnotách jako zmiňované dlouhodobé experimenty ve světě. [49, 57] Se zvyšující vlhkostí degraduje i součinitel tepelné vodivosti, je tedy vhodné extrapolovat i tyto hodnoty. Pokud obdobně extrapolujeme součinitel tepelné vodivosti z již naměřených hodnot součinitelů tepelné vodivosti, dostáváme se po 1 roku expozice ve vodě do hodnot v rozmezí od 0,035 W/(m·K) do 0,055 W/(m·K), jak je patrné z grafu 9. Hodnoty jsou vyšší než původní hodnoty suchého vzorku a to v rozmezí od 8,21 % do 27,76 %. Míra degradace tedy není zanedbatelná a je potřeba ji zohlednit při navrhování konstrukcí. Třetím důvodem je, že při zkoušení nejsou zohledněny všechny vlivy, které působí na extrudovaný polystyren v konstrukci, jak je popsáno v podkapitole 4.4. Posledním důvodem je samotná zkouška dlouhodobé nasákavosti, kde bylo

zjištěno, že se metody s okapáním a počátečním zvlhčením nejevily jako vhodné. Dále by bylo vhodné vystavit extrudovaný polystyren takovým podmínkám, které by mohly simulovat vystavení extrudovaného polystyrenu ve stavební konstrukci. Těchto podmínek by mohlo dosaženo vyšší teplotou vody, ve které je extrudovaný polystyren uložen, což bylo zkoušeno v experimentu firmy Dow Chemical Company (viz obrázek 13). Další možností by bylo vystavování zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů extrudovaného polystyrenu, což bylo popsáno v odborné literatuře a je znázorněno na obrázku 14. [44]



Graf 8 – Závislost objemové nasákavosti na čase po extrapolaci naměřených objemových nasákavostí po 10 letech



Graf 9 Závislost součinitele tepelné vodivosti na čase po extrapolaci naměřených součinitelů tepelných vodivostí po 1 roku

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zmapovat reálné zatížení izolantů v konstrukcích s vyšším vlhkostním namáháním, především inverzních a zelených střech. Výstupem bylo navrhnout vhodnou metodiku pro zkoušení extrudovaného polystyrenu ve vysokém vlhkostním namáhání, která by lépe odpovídala skutečným podmínkám ve stavební konstrukci namáhané vysokým vlhkostním zatížením. Z výsledků práce vyplývá, že materiál XPS je nasákavý. Dle provedených experimentů z odborné literatury zmíněné v této práci může po několika desítkách let zabudovaný v konstrukci dosahovat objemových nasákavostí kolem 5 %.

Testované výrobky měly po 84 dnech objemové nasákavosti u metody s počátečním zvlhčením dvakrát až třikrát vyšší hodnotu než u metody s osušením materiálu po vyjmutí z vody. Bylo zjištěno, že metoda zkoušky dlouhodobé nasákavosti při plném ponoření s počátečním zvlhčením se nejeví jako vhodná zkouška z důvodu volné vody na povrchu vzorku, která může stéct při neobratné manipulaci, což může vést k vážným chybám při měření. Po tomto zjištění došlo k úpravě metody, při které se výrobek osušil pomocí buničiny před zvážením v 84. dnu experimentu. Metoda s osušením pomocí buničiny se jeví jako vhodnější a přesnější metoda, která lépe zachycuje skutečný obsah vody ve vzorku. Hmotnostní vlhkost byla řádově vyšší než objemová nasákavost, z důvodu nízké objemové hmotnosti extrudovaného polystyrenu. Patrná byla i vyšší míra nasákavosti pro výrobky s vaflovým povrchem, který měl tendenci více zadržovat vodu na strukturovaném povrchu.

Bylo ověřeno, že zvyšující nasákavost u XPS snižuje jeho tepelný odpor. Dále bylo zjištěno, že u každého výrobku došlo k degradaci tepelné vodivosti v odlišné míře. Odlišná míra degradace byla nejspíš zapříčiněna rozdílnou technologií výroby. Odlišnost může být v použitých surovinách, nadouvadle, teplotě či tlaku v extrudéru nebo době a způsobu uložení vyrobených desek v továrně.

Zkouška dlouhodobé nasákavosti při plném ponoření, která probíhá 28 dní, nemusí být vhodná ke zjištění skutečného chování XPS ve stavební konstrukci vystavené vlivům vlhkostního namáhání. Důvody jsou detailně probrány v diskuzi výsledků, kde jsou naměřené a vypočtené hodnoty z této práce extrapolovány do delšího časového horizontu. Zkouška dlouhodobé nasákavosti při plném ponoření má spíše porovnávací či kontrolní charakter.

Inverzní střechy jsou osvědčené konstrukční systémy, které chrání hydroizolační vrstvu před mechanickými a klimatickým vlivy. Tepelná izolace je nicméně vystavěna právě těmto vlivům a je třeba počítat s její degradací, která může být znatelná. Zajímavým jevem, který má vliv na objemovou nasákavost XPS, je zmrazovací a rozmrazovací cyklus. V budoucnu by bylo zajímavé tento jev více prozkoumat, například posoudit jeho vliv v různých podnebí. V současné době byl tento jev zkoumán jen v klimatických podmínkách Německa, Finska a Portugalska.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROHSENOW, Warren M., et al. *Handbook of heat transfer*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [2] BERGMAN, Theodore L., et al. *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [3] Cai, Shanshan, Boxiong Zhang, and Lorenzo Cremaschi. "Review of moisture behavior and thermal performance of polystyrene insulation in building applications." *Building and Environment* 123 (2017): 50-65.
- [4] Zach, J. Speciální izolace, Brno: VUT Brno, 2006.
- [5] HALAHYJA, M. Stavební tepelná technika, akustika a osvetlenie. Bratislava: ALFA, 1985
- [6] VAVERKA, J. Stavební tepelná technika a energetika budov. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-2910-0.
- [7] ČSN 73 0540-1. *Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, 2005. Třídící znak 730540.
- [8] KÜNZEL, Hartwig M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. *One-and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB-Verlag Stuttgart, 1995, 65.
- [9] ŠŤASTNÍK, S. Fyzika stavebních látek: Modul M01. Brno, 2006.
- [10] ROUQUEROL, J., et al. Is the BET equation applicable to microporous adsorbents. *Stud. Surf. Sci. Catal*, 2007, 160.07: 49-56.
- [11] AZIZIAN, Saeid. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal of colloid and Interface Science*, 2004, 276.1: 47-52.
- [12] HORIKAWA, Toshihide; DO, D. D.; NICHOLSON, D. Capillary condensation of adsorbates in porous materials. *Advances in colloid and interface science*, 2011, 169.1: 40-58.
- [13] CLEUREN, B.; VAN DEN BROECK, C.; KAWAI, R. Fluctuation theorem for the effusion of an ideal gas. *Physical Review E*, 2006, 74.2: 021117.
- [14] SHUTTLEWORTH, W. James. Evaporation. 1979.
- [15] EHRLICH, Gert; STOLT, Kaj. Surface diffusion. *Annual Review of Physical Chemistry*, 1980, 31.1: 603-637.
- [16] MEDVEĎ, Igor; ČERNÝ, Robert. Surface diffusion in porous media: A critical review. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2011, 142.2-3: 405-422.

- [17] Rundt, L. Analýza teplotní odolnosti izolačních systémů z pěnových plastů ve skladbách střech, Brno 2018
- [18] Žídek, O. Analýza účinku koncentrace slunečního záření na degradaci tepelných izolací ve skladbách plochých střech, Brno 2016
- [19] BRYDSON, John Andrew. *Plastics materials*. Elsevier, 1999.
- [20] KOCH, Christoph, et al. Review of hexabromocyclododecane (HBCD) with a focus on legislation and recent publications concerning toxicokinetics and-dynamics. *Environmental Pollution*, 2015, 199: 26-34.
- [21] NGUGI, Hannah Nyambara; KALULI, James Wambua; ABIERO-GARIY, Zachary. Use of expanded polystyrene technology and materials recycling for building construction in Kenya. *American Journal of Engineering and Technology Management*, 2017, 2.5: 64-71.
- [22] EPS ČR – Sdružení pěnového polystyrenu v ČR a SR. *EPS ČR – Sdružení pěnového polystyrenu v ČR a SR* [online]. Copyright © Copyright [cit. 16.05.2022]. Dostupné z: <https://epscr.cz/>
- [23] STAV-INVEST: *prodáváme střechy, střešní krytiny a okna – Praha, Kladno* [online]. Copyright ©hggG [cit. 16.05.2022]. Dostupné z: https://www.stavinvest.cz/wpcontent/uploads/2017/12/extrudovany_polystyren.pdf
- [24] Řehořka, P. Report z výroby BASF Ludwigshafen, červen 2008, ATELIER DEK
- [25] Řehořka, P. Zápis z návštěvy ve výrobě FIBRAN v Sodražici, srpen 2010, ATELIER DEK
- [26] SAUCEAU, Martial, et al. Effect of supercritical carbon dioxide on polystyrene extrusion. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2007, 43.2: 367-373
- [27] HAN, James H.; DAE HAN, Chang. Bubble nucleation in polymeric liquids. I. Bubble nucleation in concentrated polymer solutions. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 1990, 28.5: 711-741.
- [28] CAI, Shanshan; ZHANG, Boxiong; CREMASCHI, Lorenzo. Review of moisture behavior and thermal performance of polystyrene insulation in building applications. *Building and Environment*, 2017, 123: 50-65.

- [29] GARCÍA, María Teresa, et al. Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Waste management*, 2009, 29.6: 1814-1818.
- [30] LLANTOY, Noelia; CHÀFER, Marta; CABEZA, Luisa F. A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 2020, 110323.
- [31] HILL, Callum; NORTON, Andrew; DIBDIAKOVA, Janka. A comparison of the environmental impacts of different categories of insulation materials. *Energy and Buildings*, 2018, 162: 12-20.
- [32] SULEMAN, Shoaib, et al. A comprehensive short review on polyurethane foam. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 2014, 12.1: 165-169.
- [33] DELEBECQ, Etienne, et al. On the versatility of urethane/urea bonds: reversibility, blocked isocyanate, and non-isocyanate polyurethane. *Chemical reviews*, 2013, 113.1: 80-118.
- [34] YANG, Wenqing, et al. Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 16: 167-175.
- [35] MISAR, Ivan; NOVOTNÝ, Marek. Defects and behaviour of inverted flat roof from the point of building physics. In: *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017. p. 02002.
- [36] ČSN 73 1901-1. *Navrhování střech – Část 1: Základní ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 32 s. Třídící znak 73 1901.
- [37] ČSN 73 1901-3. *Navrhování střech – Část 1: Střechy s povlakovými hydroizolacemi*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 24 s. Třídící znak 73 1901.
- [38] Izolace plochých střech – URSA CZ. *Tepelná izolace, zvuková izolace, protipožární izolace – URSA CZ* [online]. Copyright © 2022 [cit. 16.05.2022]. Dostupné z: <https://www.ursa.cz/aplikace/izolace-plochych-strech/>
- [39] MISAR, Ivan; *Stavebně fyzikální chování střešních plášťů s obráceným pořadím vrstev (plochá střecha)*. Bratislava, 2010. Autoreferát disertační práce. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta,

Katedra konštrukcií pozemných stavieb. Vedoucí práce prof. Ing. Jozef Oláh, PhD.

- [40] BROOKS, R. a kol. Effect of moisture absorption mechanisms on in-service design R-value of polystyrene insulation, 2021.
- [41] KUNZEL, H. M.; KIEBL, K. Moisture behaviour of protected membrane roofs with greenery. *CIB W40 Proceedings*, 1997.
- [42] OWENS CORNING FOAM INSULATION, LLC. *For Foam Plastic Insulation, Extrusion Matters Performance Equals Resisting Water XPS Performs Better Than EPS: Technical Bulletin*. U.S.A.: E PINK PANTHER™ & © 1964-2015 Metro-Goldwyn-Mayer Studios In, 2015, (Pub. 10018681-A.), 1-10.
- [43] KUNZEL, H. M.; KIEBL, K. Moisture behaviour of protected membrane roofs with greenery. *CIB W40 Proceedings*, 1997.
- [44] DECHOW, F. J.; EPSTEIN, K. A. *Laboratory and field investigations of moisture absorption and its effect on thermal performance of various insulations*. ASTM International, 1978.
- [45] CAI, Shanshan; ZHANG, Boxiong; CREMASCHI, Lorenzo. Review of moisture behavior and thermal performance of polystyrene insulation in building applications. *Building and Environment*, 2017, 123: 50-65.
- [46] EN 13164+A1. *Tepelněizolační výrobky pro budovy – Průmyslově vyráběné výrobky z extrudovaného polystyrenu (XPS) - Specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 48 s. Třídící znak 72 7203.
- [47] 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. Třídící znak 73 0569.
- [48] ČSN EN 12085. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení lineárních rozměrů zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 12 s. Třídící znak 72 7054.
- [49] ČSN EN 823. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 12 s. Třídící znak 72 7042.

- [50] ČSN EN 1602. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 12 s. Třídící znak 72 7046.
- [51] ČSN EN ISO 16535. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 16 s. Třídící znak 72 7056.
- [52] 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. Třídící znak 73 0569.
- [53] ISO 8301:1991. *Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus*. Geneva: International Organization for Standardization, 1991, 38 s.
- [54] DUFKA, A. *Laboratorní experimentální metody*. Brno, 2007.
- [55] ČSN 72 7221-1. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Část 1: Typy konstrukcí a kategorie použití*. Praha: Český normalizační institut, 2008, 24 s. Třídící znak 80 432.
- [56] ČSN 72 7221-3. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Část 3: Průmyslově vyráběné výrobky z extrudovaného polystyrenu (XPS)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 24 s. Třídící znak 87 455.
- [57] ZIRKELBACH, Daniel; SCHAFACZEK, Beate; KÜNZEL, Hartwig. Thermal performance degradation of foam insulation in inverted roofs due to moisture accumulation. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components–XII DBMC, Porto, Portugal*. 2011. p. 529-36.
- [58] ZEHENDNER, H. Einfluss von Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen im Bereich von -30 bis + 30 C. *Kunststoffe im Bau*, 1979, 14: 18-22.
- [59] TAOUKIL, Driss, et al. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 104-115.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Graf závislosti změny tepelné vodivosti oproti vysušenému stavu na vlhkosti [59]	15
Obrázek 2 - Graf závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti pro EPS [4]	16
Obrázek 3 - Graf závislosti tepelné vodivosti na teplotě pro EPS s objemovou hmotností 20 kg/m ³ [4]	16
Obrázek 4 - Průběhy sorpčních izoterm pro jednotlivé typy podle IUPAC [10]	20
Obrázek 5 - Schéma výroby EPS [4]	26
Obrázek 6 - Proces CreaSolv® [22]	27
Obrázek 7 - Změna struktury XPS při různých teplotách a) T=175 °C; b) 185 °C; 200 °C [26]	29
Obrázek 8 - Struktura XPS při různých teplotách a různých koncentracích CO ₂ [26]	30
Obrázek 9 - Zkušební krychle pro výpočet LCA: a) referenční krychle; b) krychle s PUR izolací; c) krychle s MW izolací; d) krychle s PS izolací [30]	31
Obrázek 10 - Inverzní střecha se zobrazením vlhkostního namáhání XPS [38]	36
Obrázek 11 - Zobrazení struktury XPS (vlevo) a EPS (vpravo), 25x zvětšeno [42]	37
Obrázek 12- Trend závislosti nasákavosti XPS na čase ze studie University of Alaska [43] ...	39
Obrázek 13 - Graf závislosti tepelné vodivosti na objemové vlhkost (XPS-křivka D) [44]	39
Obrázek 14 - Rozmístění vlhkosti po celé délce vzorku při F-T cyklech [44]	40
Obrázek 15 - Graf závislosti objemové vlhkosti na čase pro jednotlivé objemové hmotnosti XPS dle ASTM 2842 [45]	41
Obrázek 16 - Naměřené a simulované hodnoty objemové nasákavosti pro všechny střechy během 20 let [57]	42
Obrázek 17 - Simulovaná objemová nasákavost XPS pro inverzní zelenou střechu a inverzní střechu se štěrkovým násypem v Holzkirchenu, Espoo a Lisabonu [57]	43
Obrázek 18 - Simulovaná objemová nasákavost XPS pro inverzní zelenou střechu a inverzní střechu se štěrkovým násypem pro vnitřní teplotu 18 °C, 22 °C, 26 °C [57]	43
Obrázek 19 - Metodika práce - blokové schéma	45
Obrázek 20 - Výběr extrudovaného polystyrenu	46
Obrázek 21 - Formátování vzorků topným drátem	46
Obrázek 22 - Měření tloušťky úchylkoměrem	47
Obrázek 23 - Zkouška dlouhodobé nasákavosti při plném ponoření metodou 2B	49
Obrázek 24 - Snímky z optického mikroskopu při reálném zvětšení 159x	59
Obrázek 25 - Snímky z optického mikroskopu při reálném zvětšení 32x (řezaná hrana-vlevo, tavená hrana-vpravo)	60
Obrázek 26 - Snímky z optického mikroskopu jednotlivých vrstev při reálném zvětšení 32x	
Obrázek 27 - Rozdělení tloušťky vzorku ve čtyřech částech	60
Obrázek 28 - Snímky z optického mikroskopu v jednotlivých reálných zvětšení pro výrobek č. 3	
Obrázek 29 - Snímky z optického mikroskopu v jednotlivých reálných zvětšení pro výrobek č. 6	61

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1- Souhrn dat nasákavosti XPS ze studie University of Alaska [43]	38
Tab. 2 – Skladby měřených inverzní střech [57]	41
Tab. 3 – Naměřená objemová nasákavost v [%] během testovacího období [57]	42
Tab. 4 – Nasimulované objemové nasákavosti pro různé vnitřní teploty po 30 letech [57]..	43
Tab. 5- Výběr extrudovaného polystyrenu	45
Tab. 6 – Naměřené a vypočítané hodnoty	51
Tab. 7 – Změřené a vypočítané hmotnosti a objemové nasákavosti při počátečním zvlhčení	51
Tab. 8 – Změřené a vypočítané hmotnosti a objemové nasákavosti při osušení	53
Tab. 9- Naměřené a vypočítané hodnoty	56
Tab. 10- Změřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti při zkoušce nasákavosti	56
Tab. 11 – Porovnání deklarovaných a naměřených hodnot	58
Tab. 12 – Velikost buněk pro jednotlivé výrobky	59

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1- Závislost objemové nasákavosti na čase při počátečním zvlhčení	52
Graf 2 – Závislost objemové nasákavosti na čase při osušení	53
Graf 3 - Závislost hmotnostní vlhkosti na čase při osušení	54
Graf 4 – Porovnání závislosti objemové nasákavosti na čase při počátečním zvlhčení a osušení	55
Graf 5 – Závislost součinitele tepelné vodivosti na čase uložení ve vodě	57
Graf 6 – Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové nasákavosti	57
Graf 7 - Porovnání závislosti objemové nasákavosti na čase obou formátu	58
Graf 8 – Závislost objemové nasákavosti na čase po extrapolaci naměřených objemových nasákavostí po 10 letech.....	66
Graf 9 Závislost součinitele tepelné vodivosti na čase po extrapolaci naměřených součinitelů tepelných vodivosti po 1 roku	66

12 SEZNAM ROVNIC

(Rovnice 1) - První Fourierův zákon	14
(Rovnice 2) - Součinitel tepelné vodivosti	17
(Rovnice 3) - Hustota tepelného toku	17
(Rovnice 4) - Relativní vlhkost vzduchu	22
(Rovnice 5) - Faktor difúzního odporu	22
(Rovnice 6) - Hmotnostní vlhkost	23
(Rovnice 7) - Objemová vlhkost	23
(Rovnice 8) - Dlouhodobá navlhavost při difuzi	23
(Rovnice 9) - Objemová hmotnost	48
(Rovnice 10) - Dlouhodobá nasákavost při úplném ponoření	49
(Rovnice 11) - Součinitel tepelné vodivosti dle ISO 8301	50