



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES

## ČÁSTICOVÉ KOMPOZITY V KONSTRUKČNÍCH DETAILECH OBVODOVÝCH PLÁŠŤŮ

PARTICLE COMPOSITES IN THE DESIGN DETAILS OF THE BUILDING ENVELOPE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. DARINA DOSTÁLOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. LIBOR MATĚJKA, CSc., Ph.D., MBA

BRNO 2018

## **Klíčová slova**

Částicový kompozit, polypropylén, mesomechanický model, tepelná izolace, recyklát, tepelný most, creep.

## **Key words**

Particle composite, polypropylene, mesomechanics model, thermal insulation, recycled, thermal bridge, creep.

Rukopis disertační práce je uložen na Ústavu pozemního stavitelství, Fakultě stavební, VUT v Brně.

© Ing. Darina Dostálová, 2018

# Obsah

Úvod .....	3
1 Současný stav použití kompozitů ve stavebnictví.....	3
1.1 Současné nízkoenergetické a pasivní domy.....	3
1.2 Současné konstrukční detaily v oblasti soklu a paty zdiva .....	4
1.3 Detaily založení střední nosné zdi .....	4
1.4 Detaily v oblasti balkónové konzoly.....	5
1.4.1 Detail balkónové konzoly s ISO nosníkem .....	5
2 Cíle disertační práce .....	5
2.1 Výroba tlakově únosného částicového kompozitního prvku z odpadních surovin.....	6
2.2 Experimentální stanovení vybraných vlastností WPPC.....	6
2.3 Možnosti použití kompozitních plastů v konstrukčních detailech pro přerušení tepelného mostu ..	7
2.4 Určení součinitele tepelné vodivosti metodou komparace v kombinaci s experimentálním měřením .....	7
2.5 Vytvoření matematicko-mechanického modelu kompozitu WPPC .....	7
3 Výsledky disertační práce a nové poznatky .....	7
3.1 Výroba tlakově únosného částicového kompozitního prvku z odpadních surovin WPPC.....	7
3.2 Experimentální stanovení vybraných vlastností WPPC.....	12
3.3 Určení součinitele tepelné vodivosti metodou komparace v kombinaci s experimentálním měřením .....	19
3.4 Matematický model kompozitu .....	20
3.5 Možnosti použití kompozitních plastů v konstrukčních detailech pro přerušení tepelného mostu ..	21
4 Závěr.....	25
4.1 Technické a metodické výsledky práce .....	26
4.1.1 Výroba únosného částicového kompozitního prvku z odpadních surovin .....	26
4.1.2 Experimentální stanovení bodů tání, krystalizace a skelného přechodu metodou DSC (diferenčně skenovací kompenzační kalorimetrie).....	26
4.1.3 Určení součinitele tepelné vodivosti metodou komparace v kombinaci s experimentálním měřením .....	27
4.1.4 Matematický model kompozitu .....	27
4.1.5 Možnosti použití kompozitních plastů v konstrukčních detailech pro přerušení tepelného mostu .....	27
4.2 Vědecké výsledky práce.....	27
4.3 Možnosti uplatnění výsledků práce.....	28
5 Seznam použité literatury a zdrojů .....	28
5.1 Patenty.....	29

## Úvod

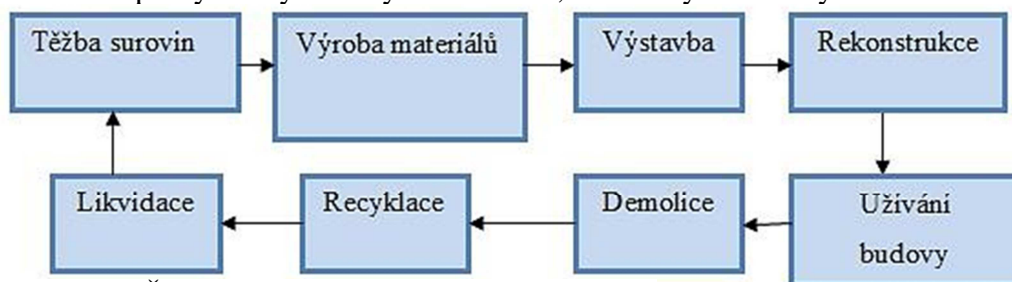
Tématem disertační práce je návrh a výroba částicového kompozitního materiálu z recyklovaných surovin, použitelných jako tlakově únosná tepelná izolace do vlhkého prostředí. Ověření její použitelnosti a její následná aplikace v konstrukčních detailech pro přerušení tepelného mostu.

Díky dobrým fyzikálně technickým vlastnostem a dostupnosti materiálu byl zvolen recyklovaný polypropylen jako matrice – základní nosná část kompozitu a recyklované pěnoklo jako fáze – vhodně doplňující vlastnosti matrice.

Byla provedena řada měření, která popisují chování kompozitu v kombinaci při tlakové a teplotní zátěži během zatížení. Poznatky z takových to mechanických měření byly implementovány do Kafkova mesomechanického modelu kompozitu, který matematicky popisuje a předvídá chování částicového kompozitu v tlaku při vyšších teplotách

### 1 Současný stav použití kompozitů ve stavebnictví

V dnešní době je standardem je nízkoenergetická výstavba s využitím obnovitelných zdrojů energie a konstrukčními prvky z recyklovaných materiálů, nebo recyklovatelných materiálů viz obrázek 1.



Obrázek 1. Životní cyklus stavebních materiálů [6]

Snižovat energii a emise CO<sub>2</sub> je třeba nejen při výrobě a stavbě, ale i během doby užívání budovy. Rozvoj nízkoenergetických a pasivních domů umožnil zajistit komfort vnitřního prostředí budovy a zároveň snížil náklady na její provoz.

#### 1.1 Současné nízkoenergetické a pasivní domy

Jako nízkoenergetické objekty jsou definovány takové, které mají roční plošnou měrnou spotřebu tepla na vytápění  $e_A = 50 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ . Budovy s roční plošnou měrnou spotřebou tepla na vytápění  $e_A = 15 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  jsou označovány jako pasivní.

Srovnání parametrů nízkoenergetického, pasivního a nulového domu viz tabulka 1.

	Charakteristika	Potřeba tepla na vytápění [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	Požadované hodnoty neprůvzdušnosti [h <sup>-1</sup> ]
<b>Nízkoenergetický dům</b>	Otopná soustava o nižším výkonu, využití obnovitelných zdrojů, dobře zateplené konstrukce, řízené větrání.	< 50	< 1,5
<b>Pasivní dům</b>	Řízené větrání s rekuperací tepla, vynikající parametry tepelné izolace, velmi těsné konstrukce.	< 15	< 0,6
<b>Nulový dům, dům s přebytkem tepla</b>	Parametry min. na úrovni pasivního domu, velká plocha fotovoltaických panelů.	< 5	< 0,6

Tabulka 1. Charakteristika nízkoenergetických domů [27]

V konstrukčních detailech je využití kompozitních plastů k eliminaci tepelných mostů tam kde jsou kladeny požadavky na mechanickou odolnost a statickou únosnost tepelného izolantu. Kompozitní plasty jsou nenasákavé, jsou tvořeny odpadovým materiálem, který je i ekologický.

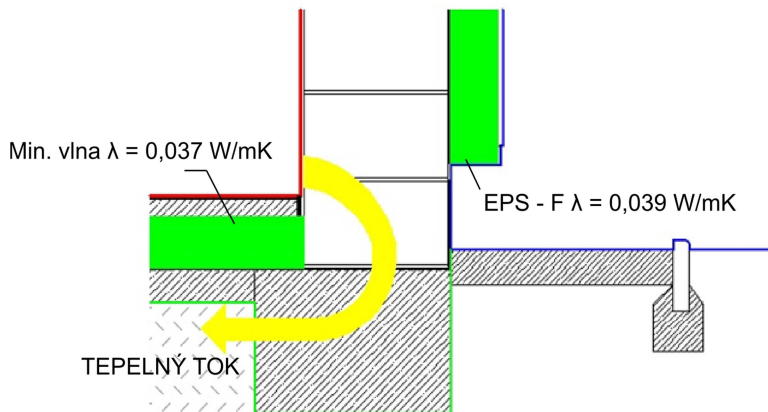
## 1.2 Současné konstrukční detaily v oblasti soklu a paty zdiva

Tepelně technické problémy v oblasti soklu se projevují zejména u starších budov při dodatečné izolaci obvodové pláště konstantním zateplovacím systémem.

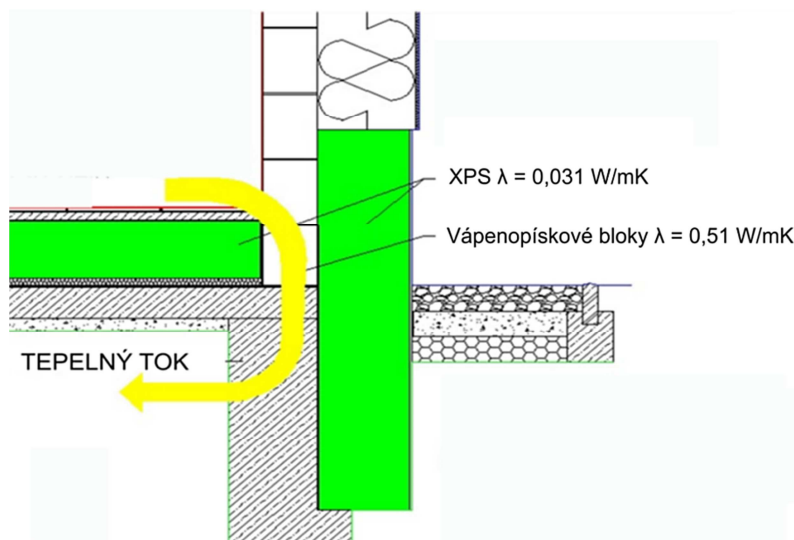
Oblast soklu je namáhána zejména odstřikující vodou ze strany venkovního exteriéru, vlhkostí ze

zeminy a z přilehlého terénu. Jedná-li se o obytnou budovu, tak v přechodu základu a obvodového zdiva (v oblasti paty zdiva) je kritické místo na vznik tepelného mostu [20] viz obrázek 2.

Schéma typického detailu (viz obrázek 2), kdy je dodatečně zateplený obvodový plášť kontaktním zateplovacím systémem a soklová část je vynechána. Tepelné úniky jsou potom nasměrovány přes patu zdiva a soklovou část ven do exteriéru.



Obrázek 2. Schéma nezateplené soklové části budovy při dodatečném kontaktním zateplení obvodového pláště



Detail soklové části nízkoenergetické novostavby (viz obrázek 3, kde jsou provedeny jak vodorovné tepelné izolace soklu, tak vodorovná izolace pod okapovým chodníčkem, která na sokl navazuje. Tepelný únik je nasměrován přes nezateplenou patu zdiva do exteriéru.

Obrázek 3. Řešení návaznosti svislého kontaktního zateplovacího systému s vodorovnou izolací u nízkoenergetického domu.

Problematika tepelného mostu u paty zdiva není většinou řešena vůbec (viz obrázek 2), nebo je řešena zároveň s tepelnou izolací soklu (viz obrázek 3). Přerušení tepelného mostu u paty zdiva je stejně energeticky potřebné, jako přerušení tepelného mostu u vyložených balkónových konzol.

## 1.3 Detaily založení střední nosné zdi

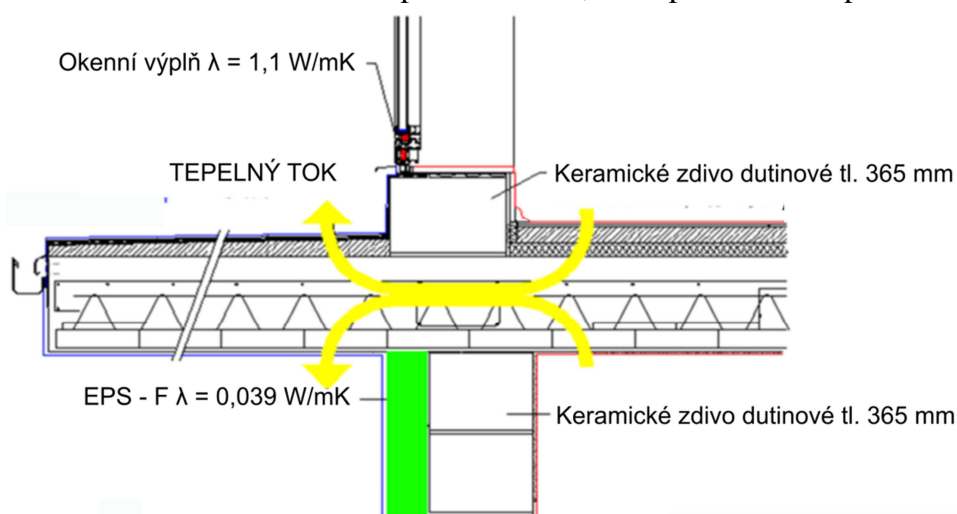
Podobně lze řešit i zvýšený tepelný tok pod střední nosnou zdí, kde energetické ztráty nejsou tak velké, ale i zde může vznikat kondenzát v důsledku nízké teploty na vnitřním povrchu stěny a podlahy. Stejně jako u paty zdiva, u obvodové stěny je potřeba přerušit tepelný most pomocí tlakově únosných materiálů s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Zároveň se musí uvažovat s vyšší vlhkostí, která difundovala z teplejšího prostředí interiéru do vrstev konstrukcí blíže zemině. Vlhkost v zimním období přibližně 15 cm pod izolovanou podlahou se pohybuje okolo 60 – 65% v ideálním případě, kdy konstrukce nevykazuje vady a poruchy.

## 1.4 Detaily v oblasti balkónové konzoly

Problematika tepelných mostů u volně vyložených balkónových železobetonových konzol se řeší buď obalením celé konstrukce tepelnou izolací, nebo přerušением tepelného mostu v místě železobetonové

konstrukce na rozhraní interiéru s exteriérem.

Typický detail, viz obrázek 4, objevující se u starších budov, kde je prováděno dodatečné, nebo nové kontaktní zateplení. Obvodový plášť je zateplen, ale balkónová konzola zůstává bez kontaktního zateplení a tvoří tak tepelný most. Stejně tak práh balkónových dveří.

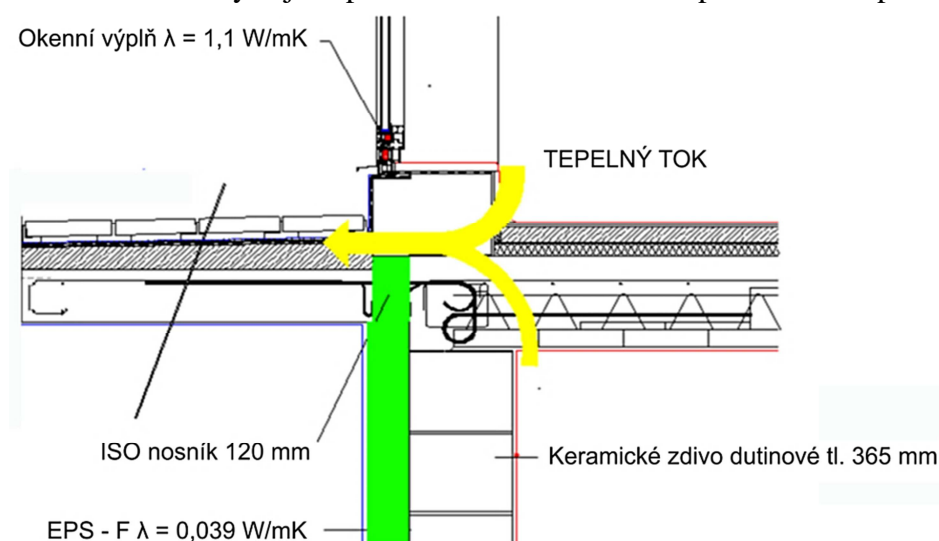


Obrázek 4. Balkónová konzola bez tepelné izolace u budovy s dodatečným kontaktním zateplením

U novějších staveb a nyníšších novostaveb je používán k vynášení předsazených konstrukcí ISO nosník, který přeruší tepelný tok na hranici interiéru s exteriérem.

### 1.4.1 Detail balkónové konzoly s ISO nosníkem

Detail kdy je použit ISO nosník k přerušení tepelného mostu viz obrázek 5.



Obrázek 5. Balkónová konzola s ISO nosníkem u budovy s dodatečným kontaktním zateplením.

Jedním z cílů disertační práce je navrhnout termoizolační prvek kompozitního charakteru k přerušení tepelného mostu v kritických oblastech konstrukčních detailů. K nim patří i práh balkónových dveří.

## 2 Cíle disertační práce

Práce se obecně zabývá návrhem a studiem částicového stavebního kompozitního materiálu z recyklovaných surovin. Cílem práce je navrhnout takový kompozit, který by vykazoval zároveň dobré tepelně izolační vlastnosti i mechanickou odolnost.

Disertační práce má pět základních cílů a další dílčí cíle, které vyplynuly během práce s materiálem a z charakteru jeho použití.

## **2.1 Výroba tlakově únosného částicového kompozitního prvku z odpadních surovin**

Cílem je experimentálně stanovit vhodný poměr matrice a fáze tvořící kompozit, tak aby byla zajištěna jejich vzájemná soudržnost a mechanická odolnost a zároveň navrhnout a popsat postup výroby a s ním spojená rizika na jednotlivých úrovních, který je zároveň jedním z dalších dílčích cílů práce.

### **- Technologie výroby kompozitu WPPC na laboratorní úrovni**

Bude vypracován pracovní diagram výroby za účelem eliminace chyb lidského faktoru a některých nedostatků použitých zařízení k tomuto účelu.

## **2.2 Experimentální stanovení vybraných vlastností WPPC**

Pro experimentální stanovení některých fyzikálních vlastností WPPC budou navrženy experimentální metody, které budou simulovat podmínky v reálném prostředí konstrukce, nebo budou použity metody pro testování životnosti polymerních výrobků a stavebních materiálů. Jedná se zejména o vlastnosti uvedené níže.

### **- Experimentální stanovení bodů tání, krystalizace a skelného přechodu metodou DSC (diferenčně skenovací kompenzační kalorimetrie)**

Princip metod DSC je měření tepelného toku, který je nutný pro definované ohřátí nebo ochlazení materiálu. Výsledkem testu je vyhodnocení teploty tání vzorku, teplota skelného přechodu fáze a matrice, krystalizace polypropylenu, závislost tepelné kapacity na teplotě.

### **- Mrazuvzdornost WPPC**

Mrazuvzdornost vyjadřuje životnost materiálu během teplotních cyklů (léto – zima) na stavební konstrukci. Během zmrazovacích cyklů prochází materiál objemovými změnami, které jsou zásadní pro jeho životnost, analogicky i jeho pórovitost a nasákavost.

### **- Stanovení pórovitosti a nasákavosti**

Pórovitost a nasákavost bude stanovena jak pro nová zkušební tělesa před testem mrazuvzdornosti, tak po něm. Míra zvýšení nasákavosti po zmrazovacích cyklech bude demonstrovat míru poškození struktury vzorku v důsledku objemových změn během zmrazovacích cyklů.

### **- Termomechanické zkoušky při vyšších teplotách**

Testy budou probíhat při 3 různých teplotách. Byly zvoleny teploty 22°, 75°C a 100°C. Budou testovány vzorky průmyslově vyráběných sklovláknových kompozitů a částicový kompozit WPPC. Jejich výsledky budou vzájemně srovnány.

### **- Tlakové zkoušky částicového kompozitu WPPC do porušení vzorku**

Pro účely matematického modelu částicového kompozitu WPPC budou otestovány i vzorky vyrobené pouze z polypropylénové matrice a pro inkluze z pěnokla bude vyroben přípravek pro kompresní testování sypkých materiálů. Data budou použita pro matematickou modelaci WPPC v konečně prvkovém softwaru.

### **- Creepové testy**

Vzorky WPPC budou zatíženy konstantním napětím 5MPa po dobu 2 hodin. Testy budou provedeny jak při pokojové teplotě, tak při vyšších teplotách. Deformace bude měřena a vypočtena pomocí optického extenzometru metodou DIC (digital image correlation) a data zpracována pomocí software Matlab.

### **- Termomechanické zkoušky lineárních sklovláknových kompozitů a částicového kompozitu WPPC do porušení vzorků**

Zkoušky budou provedeny při teplotách 22°C, 75°C a 100°C. Na vzorcích bude proveden deformační test do porušení s malým přírůstkem deformace, tj. 0,01% z původní délky vzorku za sekundu. Pro tyto účely budou vyrobeny speciální vložky do samosvorných mechanických čelistí deformačního stroje Instron 8800.

### 2.3 Možnosti použití kompozitních plastů v konstrukčních detailech pro přerušení tepelného mostu

Kompozit WPPC je vhodný zejména pro použití do spodní stavby, nebo jako přechodný prvek pro přerušení tepelného mostu. Cílem je navrhnout konstrukční detaily, kde by částicový kompozit WPPC tento problém řešil. Tepelně technické vlastnosti konstrukčního detailu budou prokázány pomocí modelace stacionárního teplotního pole dle reálných okrajových podmínek. Budou navrženy příklady detailů v oblasti paty zdiva, soklové části obytného domu a balkónové konzoly.

### 2.4 Určení součinitele tepelné vodivosti metodou komparace v kombinaci s experimentálním měřením

Účelem je zjistit reálný průměrný součinitel tepelné vodivosti WPPC dílce na základě porovnání teplotních gradientů na tělese s homogenní tepelnou izolací EPS a tělese s částicovou kompozitní izolací. Základem experimentu je úvaha, že stěna tělesa je z jedné strany ohřívána tepelným zdrojem, druhá strana ohřívána není. Mezi stěnami vzniká gradient teploty, který se v každém okamžiku mění a zároveň se těleso nachází v každém okamžiku v ustáleném teplotním poli. Z porovnání gradientů teplot dvou těles, z nichž jedno je referenční, dostaneme výsledný průměrný součinitel tepelné vodivosti kompozitu WPPC.

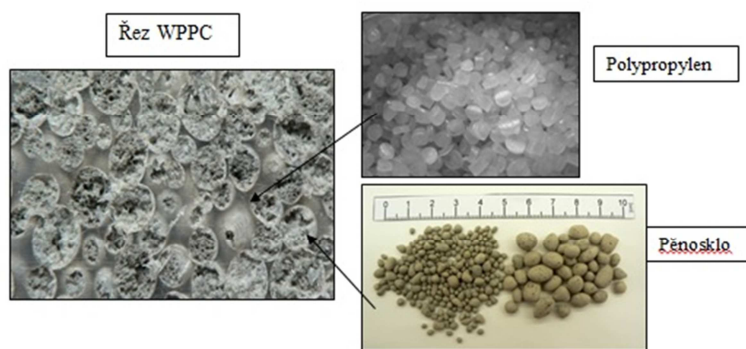
### 2.5 Vytvoření matematicko-mechanického modelu kompozitu WPPC

Cílem je vytvořit pro navržený kompozit matematický model na úrovni mechaniky kontinua pomocí tzv. homogenizace, který by byl schopen predikovat tepelně-izolační a mechanické vlastnosti kompozitu v závislosti na vlastnostech a poměru jednotlivých jeho složek. Ověření modelu bude provedeno jeho implementací do konečně-prvkového programu a následným porovnáním experimentálních a teoretických výsledků.

## 3 Výsledky disertační práce a nové poznatky

Prvním krokem bylo vytvoření přechodového prvku, který přeruší tepelný tok mezi interiérem a exteriérem. Takovýmto přechodovým prvkem je částicový kompozit vyrobený z odpadních surovin (WPPC – Waste Based Particle Polymer Composite). Návrh a výroba tohoto kompozitu, byla prvním praktickým cílem této práce. Další experimentální měření a popis chování tohoto kompozitu navazují v dalších částech.

### 3.1 Výroba tlakově únosného částicového kompozitního prvku z odpadních surovin WPPC

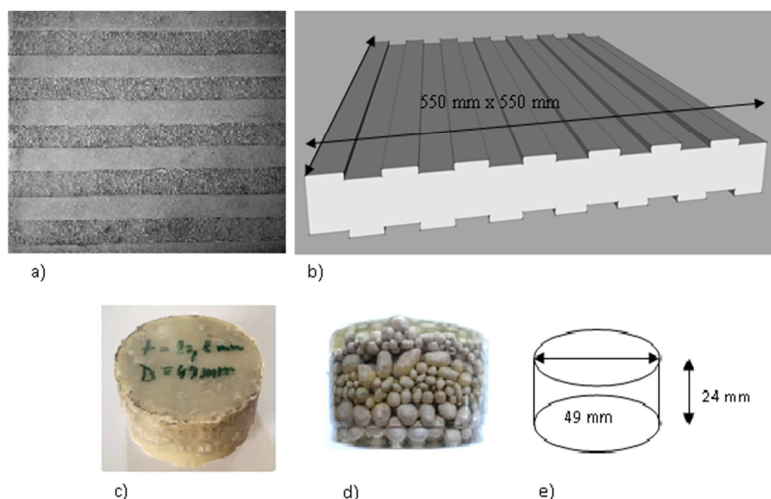


WPPC byl navržen jako částicový kompozit o dvou materiálových složkách viz obrázek 6. Matrici tvoří termoplastický polymer. Byl použit polypropylén se součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda = 0,22$  W/mK. Jako plnivo s tepelně izolační funkcí bylo zvoleno odpadní pěnové sklo se součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda = 0,068$  W/mK

Obrázek 6. Řez kompozitem s makroskopicky viditelným rozhraním

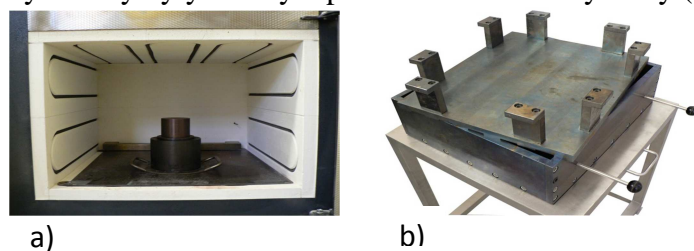
Při výrobě je hlavním zájmem vytvoření kompaktního výrobku bez otevřených pórů na povrchu a bez shluků skleněných frakcí fáze uvnitř kompozitu. První dvě vrstvy byly frakce pěnového skla se dvěma odlišnými velikostmi zrn. Třetí složka byla vytvořena polypropylénovými granulami. Po naplnění formy se vrstvy taví po dobu 2 hodin na teplotu 250°C, aby granulát polypropylénu byl úplně roztaven. Po roztavení všech vrstev se směs spolu s formou krátkodobě lisuje a poté se nechá alespoň 2 hodiny vychladnout. Po ochlazení vzduchem je celý kus WPPC (viz obrázek 7c a obrázek 9b), po odstranění

volného dna formy, hydraulickým lisem vytlačen ven. Tvar vzorku je válec o průměru 49 mm a výšce 24 mm (viz obrázek 7e).



Obrázek 7. Prototyp WPPC ve formě desky, a) textura hotové desky, b) náčrtek desky, c) malý vzorek pro mechanické testy, d) vzorek s průhlednou matricí z epoxidové pryskyřice s viditelnými vrstvami fází pěnoscila, e) schéma vzorků pro mechanické testy

Stejným způsobem byly vyráběny i kompozitní desky. Tvar formy je patrný viz obrázek 8 b), všechny vzorky byly taveny v peci na keramické výrobky (viz obrázek 8a).

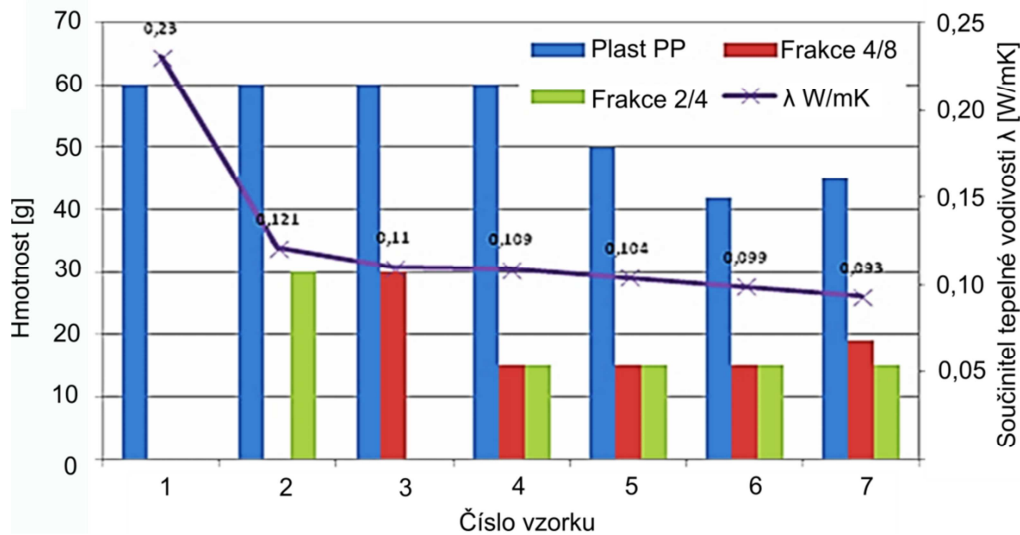


Obrázek 8. a) pec na keramické výrobky uvnitř s formou na vzorky pro mechanické testy, b) forma na kompozitní desky WPPC



Obrázek 9. a) forma na vzorky pro mechanické testy [I], b) větší vzorky WPPC o průměru 100 mm pro testy mrazuvzdornosti a nasákavosti.

Dalším krokem při vývoji kompozitu bylo snižování objemové hmotnosti matrice tak, aby byla homogenita kompozitu zachována, ale součinitel prostupu tepla  $\lambda$  [W/(mK)] se snížil. Dále byly kombinovány, nebo použity samostatně frakce pěnoscila (2 – 4 mm) a (4 – 8 mm). Obecně větší frakce pěnoscila mají nižší součinitel tepelné vodivosti, než menší frakce. Větší frakce obsahují více vzduchově uzavřených pórů, jsou tedy lepším tepelným izolantem. Nakonec byl nalezen vhodný poměr složek, který zajišťuje homogenitu prvku, součinitel tepelné vodivosti se ustálil na čísle 0,096-0,098 W/mK (experimentální měření, příložnou sondou).



Graf 1. Experimentální stanovení poměrů fáze a matrice

V grafu 1 je znázorněn vývoj hmotnostních poměrů uvnitř kompozitu. Čísla 1 – 7 na vodorovné ose je číslo vyrobeného kompozitu. Modré sloupce jsou množství plastu a zelený a červený sloupec je množství pěnoskla o dvou frakcích. Všechny vzorky, které byly vyrobeny, byly celistvé. Větší frakce pěnoskla má nižší součinitel tepelné vodivosti, než menší frakce. Vzorek s větší frakcí pěnoskla má číslo 3 a vzorek 2 obsahoval pouze menší frakci. Součinitel tepelné vodivosti se liší o setinu v tomto případě. Nakonec byly vybrány 2 poslední receptury 6 a 7, na všechny vzorky, které byly testovány, byla použita receptura 6, protože vzorky vykazovaly nejmenší zmetkovitost. Součinitel tepelné vodivosti se ustálil na čísle 0,096 – 10,098 W/mK.

Během experimentální výroby vzorků WPPC byl vyvinut pracovní postup výroby.

Po nalezení ideálního poměru matrice a fáze v kompozitu, začala výroba experimentálních vzorků pro testování jejich fyzikálních vlastností.

#### **Experimentální měření metodou DSC (diferenčně skenovací kompenzační kalorimetrie)**

Princip metod DSC je měření tepelného toku, který je nutný pro definované ohřátí nebo ochlazení materiálu.

Testovaný vzorek se zahřívá nebo ochlazuje při konstantní(m):

- **Gradientu** teploty min 0,5°C/min a max.10°C/min.
- **Teplotě** v komoře se pohybuje od -100°C do 650°C.

Cíle zkoušky:

- Vyhodnocení teploty tání vzorku.
- Teplota skelného přechodu fáze matrice.
- Krystalizace polypropylenu.

Měření DSC bylo provedeno ve třech krocích. Termické analýze byly podrobeny vzorky kompozitu a posléze i jeho matrice a fáze separátně.

- Z kontrolního vzorku kompozitního termopolymeru o průměru 100 mm a výšce 10 mm byl odebrán vzorek velikostně odpovídající komoře DSC (cca 3 x 3 mm) viz obrázek 10. Vzorek byl uřezán kotoučovou pilou na obrázek 10 a) s vodním chlazením a poté zbrúšen do konečného rozměru na kotoučové brusce – viz obrázek 10 b) taktéž s vodním chlazením.

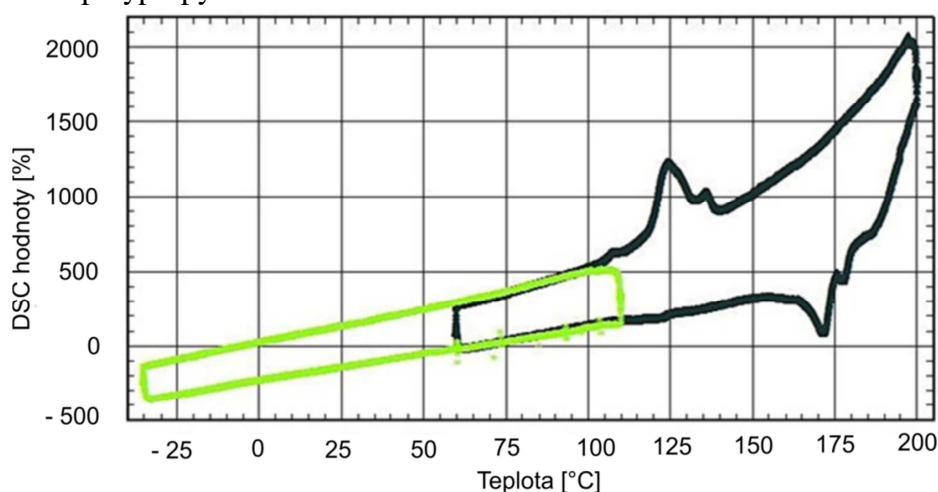


a) b) c)

Obrázek 10. a) kotoučová řezací pila na přípravu vzorků, b) kotoučová bruska s vodním chlazením, c) komora DSC s přívodem dusíku

– Teplotní cyklus pro termickou analýzu byl stanoven v rozsahu od  $-18^{\circ}\text{C}$  do  $+175^{\circ}\text{C}$ .

Na grafu 2 je zobrazen výsledek z analýzy DSC. Jedná se o vzorek WPPC, který je složen z odpadního pěnoskla a polypropylénu.



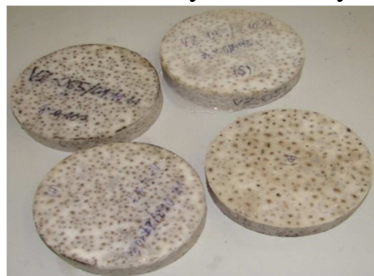
Graf 2. Výsledek měření DSC Kompozitního WPPC

Nejdříve byl realizován ohřev - modrá křivka grafu v pravé části a později ochlazení vzorku v levé části - žlutá křivka. Na modré křivce jsou viditelné 2 vrcholy křivky a více menších vrcholků. Teplota tání odpovídá  $175^{\circ}\text{C}$ . Bod tuhnutí byl odečten při teplotě  $125^{\circ}\text{C}$ . Hystereze mezi bodem tuhnutí a tání je způsobena tím, že materiál má menší tepelnou odezvu z důvodu toho, že má malou tepelnou kapacitu, chová se jako tepelný izolant.

Další zkouška byl test mrazuvzdornosti. Materiál byl zatěžován pouze extrémními teplotami v mokřém prostředí.

### Mrazuvzdornost termopolymerního iso bloku WPPC

Pro zkoušku mrazuvzdornosti byly vybrány dvě skupiny vzorků po třech stejných vzorcích. Všechny vzorky byly zváženy za suchého stavu a dva vzorky z každé skupiny byly namočený po dobu 24 hodin do vody a zváženy znovu. U zkušebních těles se před nasycením vodou a zmrazováním byly zjištěny jejich rozměry a váhy a byla vypočítána jejich objemová hmotnost podle ČSN 73 1315.



Hmotnosti vzorků s vyjádřením jejich nasákavosti jsou uvedeny níže, vzorky (dva z každé skupiny) byly vyjmuty z lázně a umístěny do mrazicího boxu, kde bylo provedeno 25 zmrazovacích cyklů. Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se koná ve zmrazovacích cyklech, při kterých musí být teplota mrazicího prostředí v rozmezí  $-15^{\circ}\text{C}$  až do  $-20^{\circ}\text{C}$ . [1]

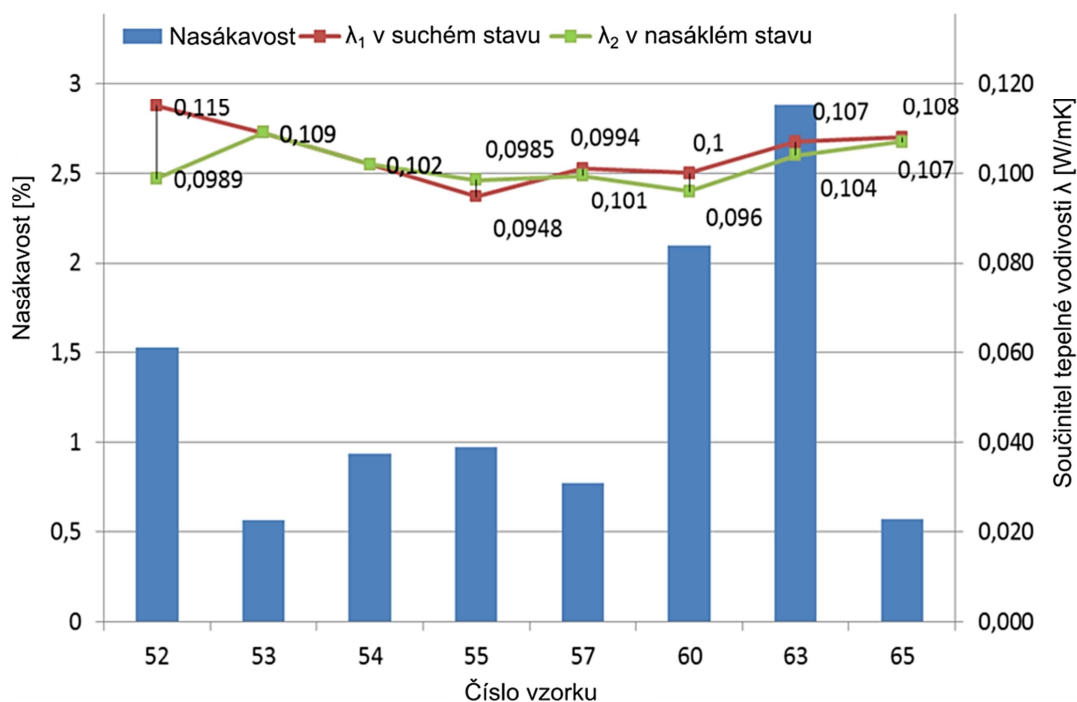
Obrázek 11. Vzorky po 25 mrazících cyklech

Následně je provedeno vizuální posouzení trvanlivosti a trhlin na povrchu vzorku (viz Obrázek 11) a bude provedena zkouška nasákavosti, které byl vzorek podroben i před zkouškou mrazuvzdornosti.

### Stanovení pórovitosti a nasákavosti

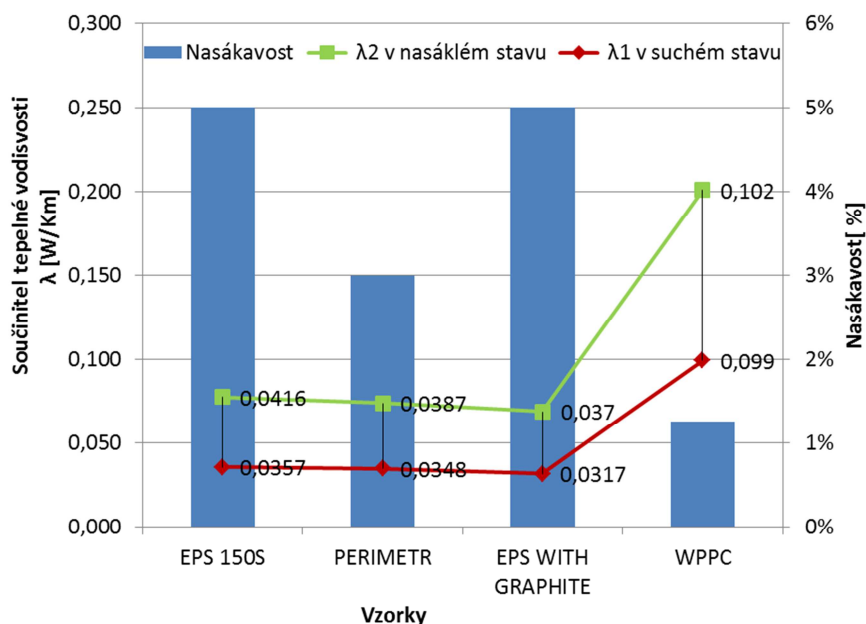
Zkouška nasákavosti byla provedena dle požadavků v normě ČSN ISO 62 (64 0112) – Plasty. Vzorky byly vysušeny v peci pro vypalování keramiky 24 hodin při 50°C, následně byly váženy na analytických vahách s přesností 0,1 mg. Hmotnosti v suchém stavu byly zaznamenány a vzorky ponořeny do destilované vody na 24 hodin. Poté znovu zváženy.

Byla stanovena nasákavost vzorků. Čísla vzorků jsou na vodorovné ose x viz graf 3. Modré sloupčky znázorňují nasákavost vyjádřenou v procentech. Nasákavost u vzorků byla velmi nízká pouze do 3 % a průměrná nasákavost je 1,25 %. V horní části lineární křivky znázorňují součinitel tepelné vodivosti v suchém a nasáklém stavu. V průměru se od sebe tyto dvě hodnoty liší, o jednu setinu tzn., že ve skutečnosti mohou být totožné, protože jedna setina odpovídá chybě měření. Lze říci, že nasákavost do 3 % nemá vliv na součinitel tepelné vodivosti.



Graf 3. Stanovení nasákavosti a její vliv na součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  u kompozitního WPPC  
Pro srovnání byla změřena nasákavost i jiných tepelných izolací. viz graf 4.

U všech těchto izolací, byla nasákavost do 5% jejich objemové hmotnosti, u polymerního kompozitu je průměrná nasákavost 1,25%. U všech vzorků byl měřen součinitel tepelné vodivosti v suchém stavu – modrá linka a v nasáklém stavu – červená linka. Hodnoty součinitelů prostupu tepla se liší o jednu setinu, pokud nasákavost není větší jak 5%.



Graf 4. Stanovení nasákavosti a její vliv na součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  u jiných TI

Další zkoušky, kterým byly vzorky podrobeny, byly deformační testy při vyšších teplotách. Tlak a vyšší teplota je kombinace zatížení, kterým mohou být kompozitní WPPC bloky v reálné stavbě vystaveny.

### 3.2 Experimentální stanovení vybraných vlastností WPPC

#### Termomechanické testy při vyšších teplotách

Pro umístění konstrukčního prvku do stavby je důležitá únosnost v tlaku a mechanická odolnost v kombinaci s vyšší teplotou. Byly provedeny jak kompresní testy do porušení při vyšších teplotách, tak creepové testy za stejných podmínek. Kompresní testy, částicového kompozitu WPPC, jeho polypropylénové matrice a fází pěnoskla, byly provedeny při teplotách 22,5°C, 75°C a 100°C a ty stejné testy byly provedeny i na sklolákových kompozitech od anglické firmy, která tyto kompozity vyvinula se stejným účelem – jako tepelně izolační tlakově únosné prvky do stavební konstrukce.

Vybrané vzorky bylo před začátkem zkoušek třeba upravit. Z velkých vzorků byla vyřezána menší zkušební tělesa; všechny vzorky byly broušeny a leštěny za pomoci vodního chlazení viz obrázek 12. Broušení bylo prováděno zejména pro srovnání povrchu dotýkajícího se tlakových čelistí. Leštěny byly pouze vzorky, které byly podrobeny optické analýze pod mikroskopem.



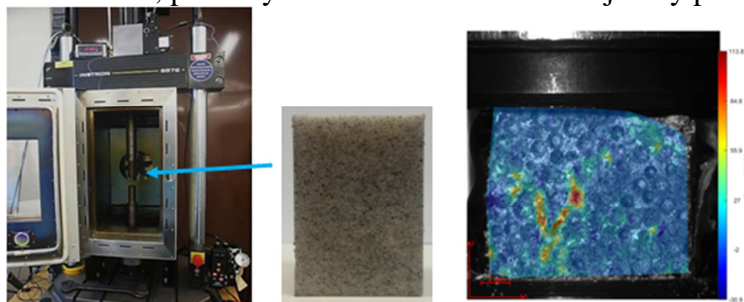
Obrázek 12. a) leštění vzorku b) broušení vzorku c) řezání vzorku

#### Tlakové zkoušky částicového kompozitu WPPC do porušení vzorku

Vzorek je vystaven zatížení, které rovnoměrně narůstá s přírůstkem poměrné deformace vzorku. Rychlost zatěžování je řízeno rychlostí poměrné deformace 0,01% z  $l_0$  (z původní délky vzorku za sekundu). Testy byly provedeny vždy na třech sadách vzorků. Jedna sada obsahovala 3 kusy vzorků. Bylo testováno 5 druhů lineárních kompozitů o různé hustotě skelných vláken, 3 kusy částicového kompozitu WPPC. Pro účely matematického modelu tohoto částicového kompozitu WPPC byly otestovány i vzorky vyrobené pouze z polypropylénové matrice a inkluze pěnoskla byly zatěžovány ve speciálně vyrobeném přípravku pro kompresní testování sypkých materiálů.

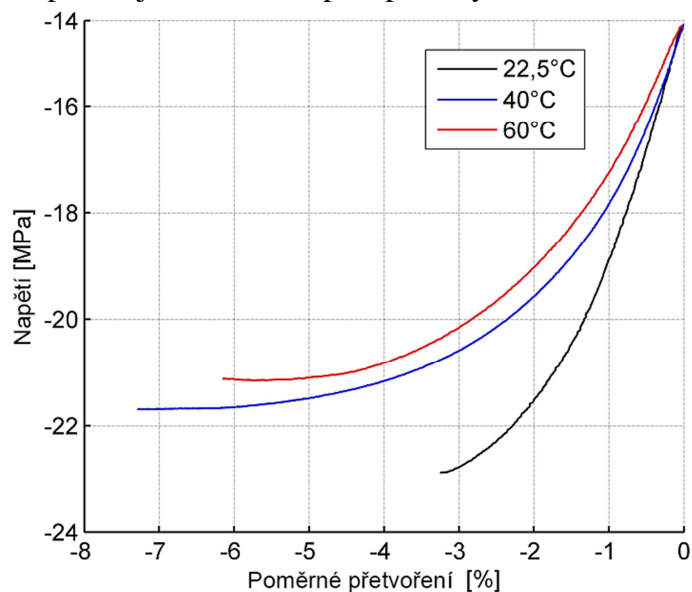
### Kompresní testy do porušení na vzorcích z polypropylénové matrice

Pro kompresní testy byly vyrobeny vzorky ve tvaru válců, které byly následně rozřezány na kvádry o rozměrech 15 x 15 x 30 mm. Při výrobě vzorků bylo nutné dodržet paralelitu obou zatěžovaných čel vzorku. Z toho důvodu, byla čela srovnána přesným obráběním. Při těchto testech byl použit optický extenzometr, proto bylo třeba nanést na vzorek jemný patern s vysokým kontrastem; viz obrázek 13b.



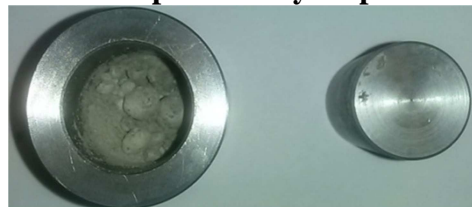
Obrázek 13. a) Testovací deformační stroj Instron b) Detail paternu na vzorku pro DIC c) Barevné znázornění velikosti tenzoru EXX.

Testy probíhaly při třech různých teplotách (22,5°C, 40°C a 60°C). Vzorek byl před započítím každého testu hodinu temperován. Rychlost zatěžování byla definována a řízena rychlostí poměrné deformace vzorku [%] (poměrná deformace = engineering strain). Maximální únosnost polypropylénového vzorku byla 20,94MPa viz graf 5, při pokojové teplotě. Pro srovnání únosnost cihly plně pálené je 15MPa a vápenopískových cihel 2 – 4MPa.



Graf 5. Teplotní závislost termomechanických vlastností polypropylénové matrice

### Kompresní testy do porušení na inkluzích z pěnoskla (fáze kompozitu WPPC)



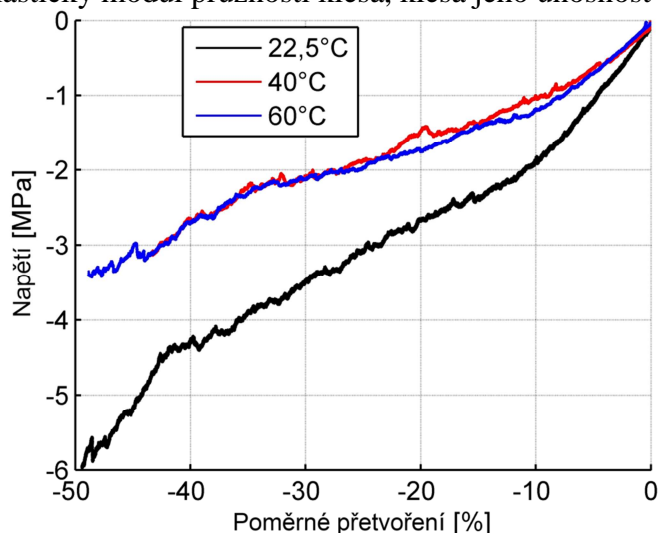
Rychlost zatěžování a metoda testování byla stejná jako u předchozích testů. Pro testování inkluzí pěnoskla byla vyrobena forma s přesným pístem viz obrázek 14.

Částečně rozdrčené frakce pěnoskla po úspěšném testu viz obrázek 14. Ze sady 12 vzorků, elastické moduly pružnosti měly stejný trend viz graf 6.

Obrázek 14. Testovací forma s přesným pístem

Test má dobrou vypovídající hodnotu pro účely sestavení matematického modelu a pochopení termomechanického chování dílčích složek kompozitu.

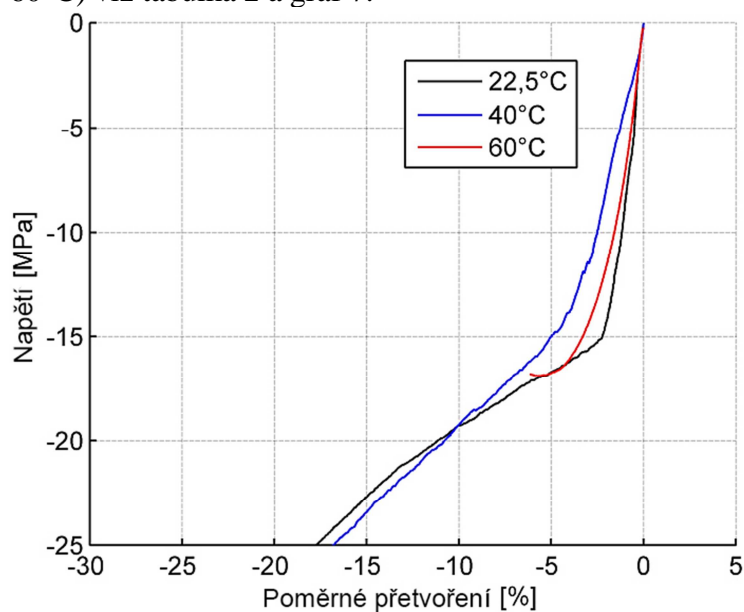
Minimální únosnost inkluzí pěnoskla při pokojové teplotě byla 1,9MPa. Při zvyšující se teplotě jeho elastický modul pružnosti klesá, klesá jeho únosnost viz graf 6.



Graf 6. Teplotní závislost termomechanických vlastností inkluzí pěnoskla

### Kompresní testy do porušení na částicovém kompozitu WPPC (složeného z inkluzí pěnoskla a polypropylénové matrice)

Termomechanické kompresní testy u WPPC prokázaly jeho dobrou únosnost i za vyšších teplot (40 a 60°C) viz tabulka 2 a graf 7.



Graf 7. Teplotní závislost termomechanických vlastností WPPC

Teplota. [°C]	WPPC $\delta_{\max}$ [MPa]	PP $\delta_{\max}$ [MPa]	Pěnosklo $\delta_{\max}$ [MPa]
22,5	15,08	20,94	1,903
40	11,55	15,47	1,023
60	7,58	14,40	0,690

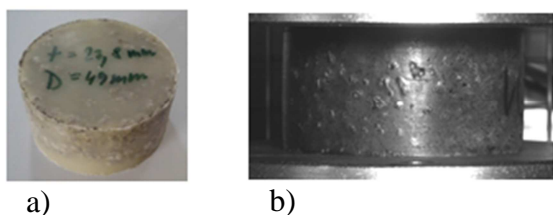
Tabulka 2. Závislost maximálního napětí na teplotě

Kompresní termomechanické testy měly za úkol definovat teplotní závislost maximální deformace a maximální únosnosti vzorků, zejména pro účely vytvoření matematického modelu kompozitu. Reálně je

ale kompozit v konstrukci vystaven stálému zatížení v tlaku o relativně malých hodnotách cca do 5MPa a únavou od nízkých a vysokých teplot během roku.

Termoplasty jsou náchylné na tečení při vyšších teplotách, proto byly na vzorcích provedeny creepové testy.

### Creepové testy

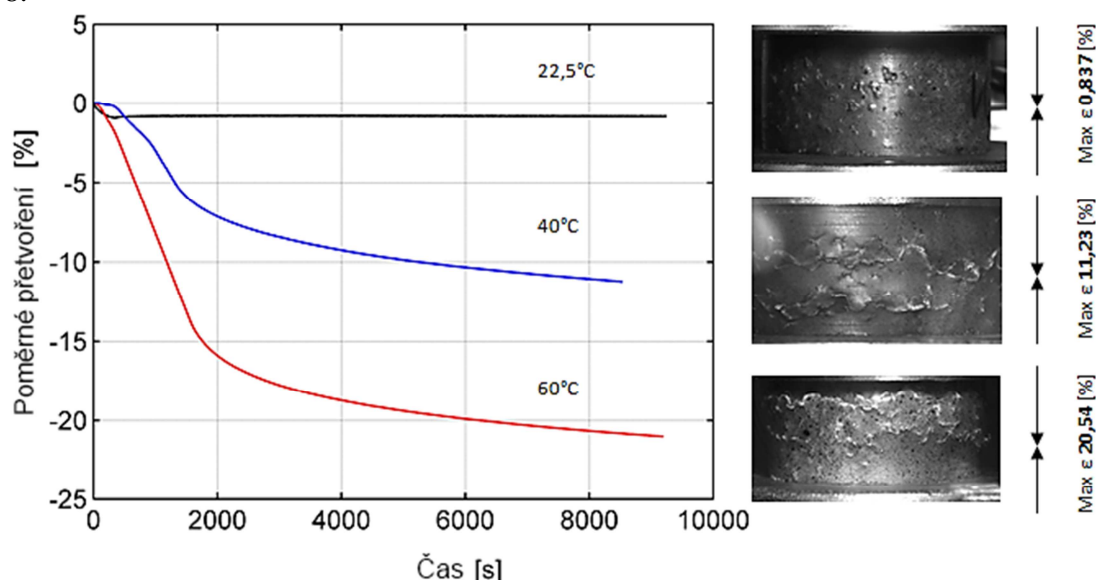


Pro experimentální účely byly vytvořeny vzorky WPPC (Wased based particle polymer composite) ve tvaru válce o průměru 49 mm a výšce 24 mm (stejně vzorky jako v případě kompresních testů do porušení) viz obrázek 15.

Obrázek 15. a) Vzorek WPPC b) Vzorek WPPC s naneseným paternem pro DIC analýzu

Testy probíhaly vždy na jedné sadě při 3 různých teplotách. Jedna sada tvořila 2 ks vzorků. Byly zvoleny teploty 22°C (teplota místnosti), 40°C a 60°C.

Zatížení vzorku do napětí 5MPa probíhalo rychlostí 0,01 % poměrné deformace za 1 sekundu (0,01% strain/ sec.). Po dosažení napětí 5MPa byl vzorek konstantně zatěžován po dobu 2 hodin, viz graf 8.



Graf 8. Závislost creepové deformace WPPC ve směru Y na teplotě

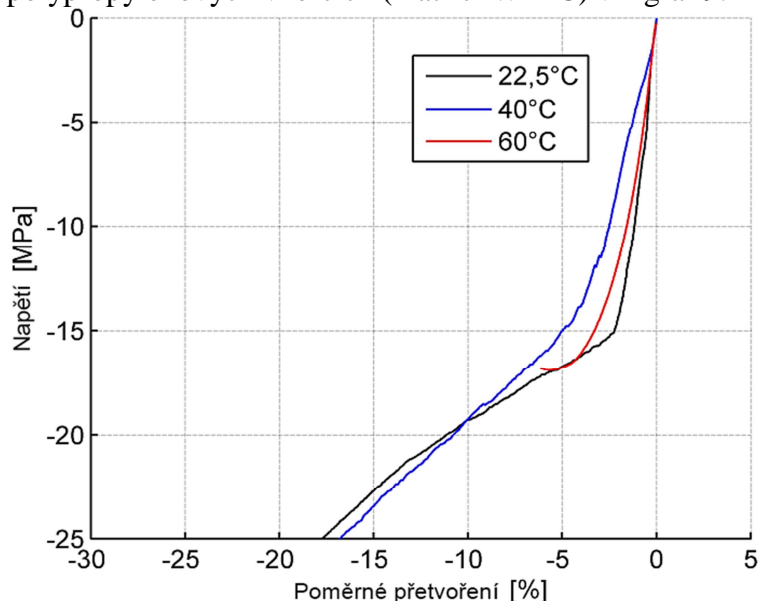
Na mechanické vlastnosti termoplastů a jejich kompozitů má zásadní vliv teplota a dlouhodobé zatěžování tj. creep. Proto byl kompozit zatěžován konstantním napětím 5MPa při vyšších teplotách. Byla měřena maximální poměrná deformace  $\epsilon$  [%], elastický modul pružnosti  $E$  [GPa] Elastický modul pružnosti byl vypočítán z elastické části křivky z grafu poměrné deformace a zatížení, viz graf 8. Elastický modul pružnosti je definován jako tečna k elastické části křivky.

Teplota [°C]	Počet stupňů nad $T_g$ [°C]	$E_C$ [GPa]	$\epsilon$ [%] směr Y
22,5	46,5	120	1,1
40	64	114	11,2
60	84	96	21,01

Tabulka 3. Závislost elastického modulu WPPC na teplotě

S rostoucí teplotou elastický modul pružnosti WPPC klesá. Klesající modul pružnosti znamená, že tuhost materiálu se snižuje. S rostoucí tuhostí, klesá elasticita materiálu. Poměrná deformace vzorků, po 2

hodinách zatěžování, s rostoucí teplotou klesá. Dodatečně byly provedeny creepové testy na polypropylénových vzorcích (matrici WPPC) viz graf 9.



Graf 9. Závislost creepové deformace polypropylénu ve směru Y na teplotě

Výsledné moduly pružnosti (viz tabulka 4) jsou odvozeny z elastické části zatěžovací křivky vzorku WPPC, patrné viz graf 9.

Teplota [°C]	$E_c$ [GPa]	$\epsilon$ [%] směr Y
22,5	129,8	0,46
40	110,53	0,78
60	69,12	1,3

Tabulka 4. Závislost elastického modulu  $E_c$  polypropylénu [GPa] na teplotě

Polypropylénová matrice WPPC byla 2 hodiny zatěžována konstantním napětím 5MPa v tlaku, při teplotách 22,5°C, 40°C a 60°C. Hodnoty poměrných deformací polypropylénové matrice a částicového kompozitu WPPC po 2 hodinovém zatížení viz tabulka 5. Poměrná deformace s teplotou roste, tato závislost není lineární.

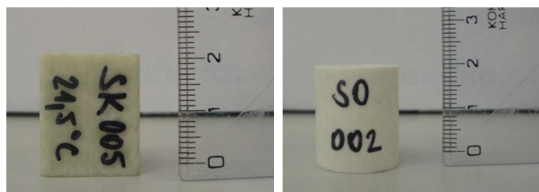
Teplota [°C]	Poměrná def. WPPC po 2 hod $\epsilon_{WPPC}$ [%]	Poměrná def. PP po 2 hod $\epsilon_{PP}$ [%]
22,5	1,10	0,46
40	11,20	0,78
60	21,01	1,3

Tabulka 5. Závislost poměrné deformace kompozitu WPPC a Polypropylénové matrice (PP) na teplotě.

Rozdíly mezi kompozitem WPPC a jeho matricí jsou významné. Vzorky složené pouze z polypropylénové matrice vykazují desetkrát menší deformaci, než kompozit WPPC při stejných zatěžovacích podmínkách.

#### Termomechanické zkoušky lineárních sklovláknových kompozitů a částicového kompozitu WPPC do porušení vzorků

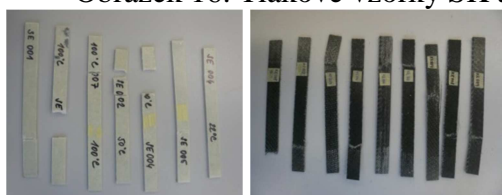
Testy byly provedeny na čtyřech vzorcích (viz obrázek 16 a obrázek 18). Všechny vzorky byly ze stejného materiálu, lišily se pouze hustotou sklených vláken (viz obrázek 17 a).



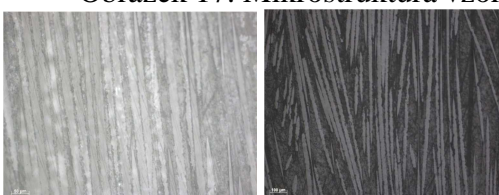
Obrázek 16. Tlakové vzorky SK a SO



Obrázek 17. Mikrostruktura vzorků SK a SO



Obrázek 18. Tahové vzorky KE a SE



Obrázek 19. Mikrostruktura tahových vzorků KE a SE

### Průběh tahové zkoušky do porušení

Při tahové zkoušce je vzorek podroben tahové deformaci, jejíž velikost s časem rovnoměrně roste (rychlost deformace je konstantní). Sleduje se závislost tahového napětí [MPa] na deformaci (prodloužení %) Napětím se rozumí tzv. smluvní napětí, tj. poměr síly  $F$  působící na vzorek k ploše  $S_0$  průřezu nedeformovaného vzorku. Deformace je poměr prodloužení vzorku  $\Delta l$  k nedeformované (původní) délce vzorku  $l_0$ .

Skupina vzorků SE, viz

obrázek 18 a obrázek 19 (oba v pravé části), má nižší Youngův modul pružnosti, který se při teplotách 75 a 100°C značně neliší. Youngův modul pružnosti je přímo úměrný poměrnému přetvoření. Pevnost vzorků není velká, při tahové zkoušce praskají pod hodnotou 50MPa, při vyšších teplotách zůstává tato hranice porušení stejná.

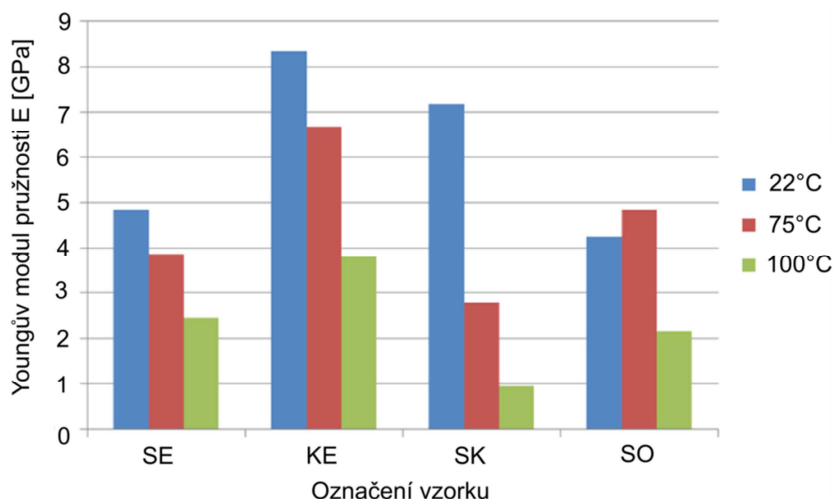
Vzorky KE viz

obrázek 18 a obrázek 19 (oba v levé části), při pokojové teplotě a teplotě 75°C, vydrží dvakrát větší tahové zatížení a mají dvakrát větší relativní prodloužení než vzorky ze skupiny SE. Ale při teplotě 100°C jsou jejich vlastnosti prakticky stejné. Maximální přetvoření při teplotě 75°C klesá (dochází ke smršťování) a při 100°C roste ze 3 na 6%. Vzorek je při teplotě nad 75°C nestabilní a začíná „téct“.

### Průběh tlakové (kompresní) zkoušky do porušení

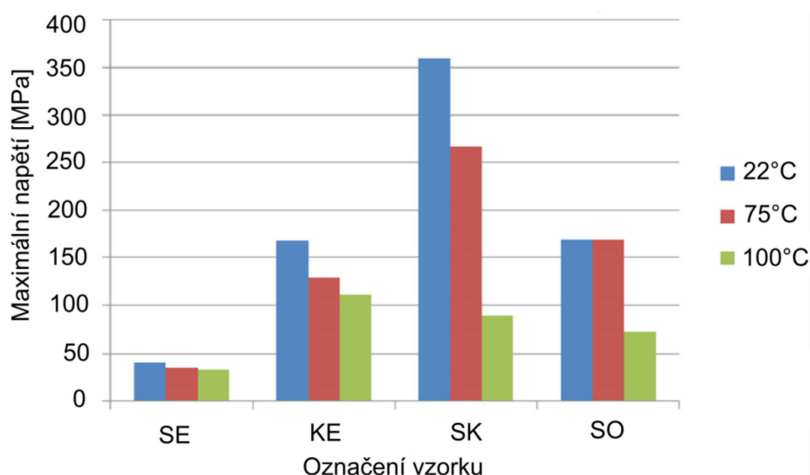
Zkouška probíhala stejným způsobem za stejných podmínek, vzorky byly zatěžovány v tlaku místo

v tahu. Vzorky SK, SO (viz obrázek 16 a obrázek 17) jsou pevnostně srovnatelné jako vzorky SE, KE (viz obrázek 18 a obrázek 19) s tím rozdílem, že byly zatěžovány tlakem do porušení. Tlaková zkouška byla zvolena díky tvaru vzorků. Vzorky jsou při teplotě 21,5°C i 75°C stabilní, při 100°C začíná materiál téct a rychle se bortí. Lom není čistý, dochází k přetrhání výztužných vláken kompozitu v okolí lomu. Při teplotě 100°C se vzorek zborší a vlákna jsou rozlámaná a lehce se drojí. Výztuž zřejmě může za těchto teplot křehnout.



Graf 10. Závislost Youngova modulu pružnosti na teplotě u vzorků SE – SO

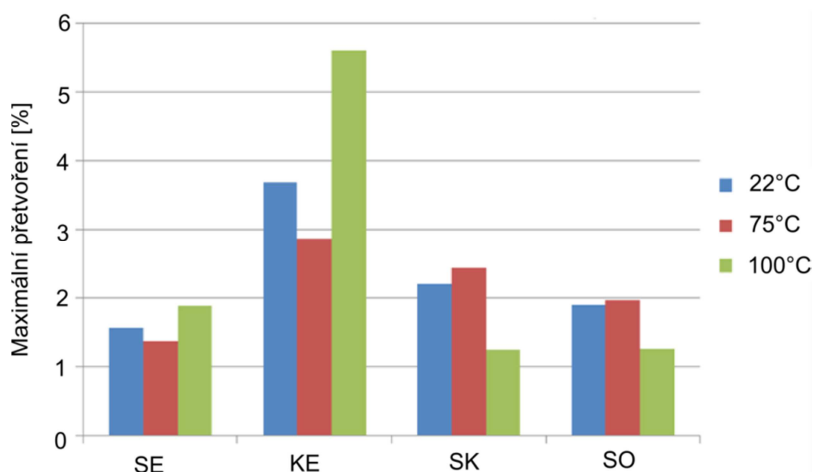
Youngův modul pružnosti byl odvozen jako tečna k elastické (počáteční) části zatěžovací křivky. Závislost modulu pružnosti na teplotě, u čtyř vzorků sklovláknových kompozitů, je lépe patrná z graf 10. Při vyšší teplotě Youngův modul pružnosti klesá, materiál při vyšších teplotách ztrácí svoji pevnost.



Rozdíl mezi 22°C a 100°C je markantní, ale u více vyztužených vzorků, viz graf 10 a, není rozdíl Youngova modulu při teplotě 22°C a 75°C tak viditelný.

Kromě Youngova modulu pružnosti bylo u vzorků sledováno maximální napětí v závislosti na teplotě při porušení vzorku během zatěžování. Výsledky jsou zaznamenány viz graf 11.

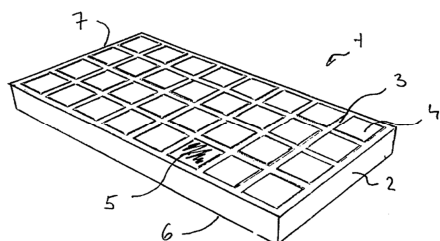
Graf 11. Teplotní závislost maximálního napětí na teplotě [MPa]



Velká únosnost vzorku SK, SO (viz graf 11) je dána jejich kruhovým průřezem, ostatní vzorky měly čtvercové průřezy. Všechny vykazují dostatečnou únosnost pro aplikaci např. jako tepelná izolace do průmyslových a pojízdných podlah. Při použití kompozitů v železobetonové konstrukci jsou žádoucí poměrná přetvoření maximálně do 3%. Těchto přetvoření dosahuje materiál za působení vysoké teploty a tlaku viz graf 12.

Graf 12. Teplotní závislost maximálního prodloužení na teplotě [%]

Na základě části těchto testů byl podán užitný vzor a patenty: přihláška vynálezu s názvem „Tepelně izolační modul pro tlakem namáhané konstrukce“, evidovaná pod spisovou značkou PV 2013-715, přihláška užitného vzoru s názvem „Tepelně izolační modul pro tlakem namáhané konstrukce“, evidovaná pod spisovou značkou PUV 2013-28485, Evropská přihláška vynálezu s názvem „Thermal isolation module for constructions under pressure“, evidovaná pod spisovou značkou EP 13466021.6 [III.]



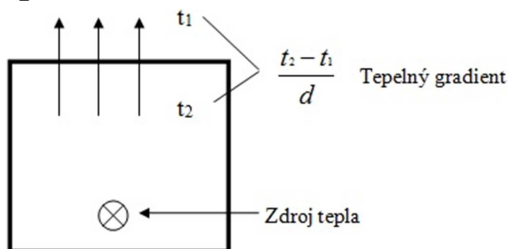
- 1) Tepelně izolační modul.
- 2) Nosný rám.
- 3) Mřížová struktura.
- 4) Mezera.
- 5) Výplňový TI materiál
- 6) Základní deska

Obrázek 20. Tepelně izolační modul pro tlakem namáhané konstrukce

Tepelně izolační modul je tvořen nosným rámem a mřížovou strukturou, kterou tvoří sklovláknové kompozity. Mezi mřížkami je prostor pro výplňový tepelně izolační materiál. Rám i mřížky jsou k základové desce přilepeny.

V následujících kapitolách jsou tímto způsobem modelovány mechanické vlastnosti kompozitu při vyšších teplotách a stanovení součinitele tepelné vodivosti.

### 3.3 Určení součinitele tepelné vodivosti metodou komparace v kombinaci s experimentálním měřením



Pro účely komparační metody byly vytvořeny dva boxy o stranách 450 x 500 x 450mm. V laboratorních podmínkách představují dvě referenční budovy. Nosná konstrukce boxů je z dřevovláknitých desek o stejných tloušťkách. Kontaktní izolaci nosné obálky budou tvořit dva druhy tepelné izolace tj. polystyren (EPS) a částicový kompozitní dílec WPPC (oba o stejných tloušťkách), viz schématický obrázek 21.

Obrázek 21. Metoda komparace schématicky

Box, obložený kontaktní izolací z polystyrenu, bude brán jako referenční a hodnoty naměřené na kvádru s částicovým kompozitem s ním budou porovnávány. Součinitel tepelné vodivosti a tepelná kapacita všech materiálů byla těsně před experimentem změřena přístrojem Isomet.

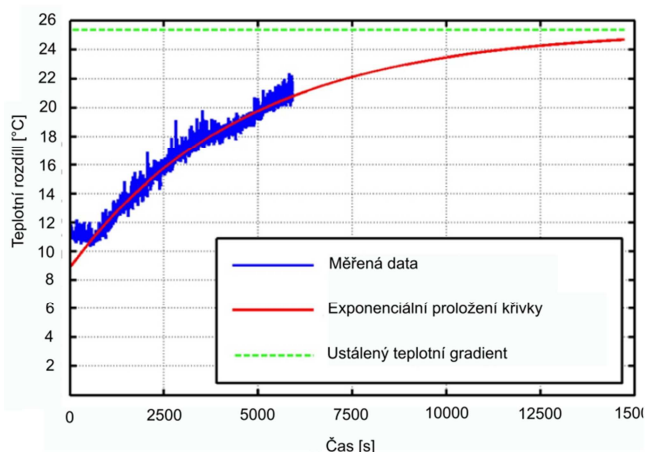
Hodnotí se velikost teplotního gradientu za jednotku času, viz graf 13.

Pro výpočet součinitele tepelné vodivosti byla použita Fourierova rovnice pro šíření tepla. Předpokládáme, že soustava se nachází v každém okamžiku v teplotně ustáleném stavu, nebo změna teploty v čase je vyjádřena diskretním rozdílem teplot. Tepelné toky obou boxů jsou si rovny. Index  $s$  znamená standard. Za standard je považovaný polystyren. Vyjádřením tepelných toků dostaneme:

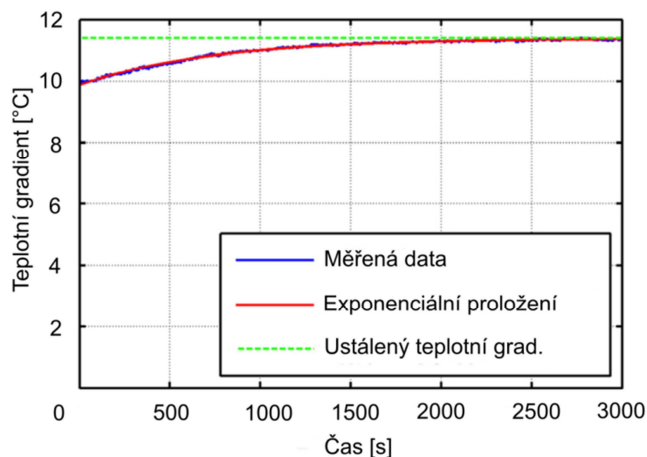
$$\lambda_s S \tau \frac{t_1 - t_3}{\ell} = \lambda S \tau \frac{t_1 - t_2}{\ell}, \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je výsledný průměrný součinitel tepelné vodivosti [W/mK] WPPC.

Z 5 měření jdoucí za sebou byla odborným odhadem stanovena odchylka měření na  $5 \cdot 10^{-3}$  W/mK. Medián výsledného součinitele tepelné vodivosti částicového kompozitního dílce je 0,0878 W/mK.



Graf 13. Průběh teplot na kvádru s EPS TI



Graf 14. Průběh teplot na kvádru s WPPC TI

Hodnoty součinitele tepelné vodivosti, měřené metodou komparace a přístrojem Isomet, se od sebe liší o 11,3% viz tabulka 6. Charakterističtější hodnota součinitele tepelné vodivosti je metodou komparace. Je založena na teplotním gradientu dílce.

	$\lambda$ metoda komparace (medián) [W/mK]	$\lambda$ měření přístrojem Isomet [W/mK]
WPPC	0,0878	0,099

Tabulka 6. Výsledný součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  částicového kompozitu

Kompozit WPPC prokázal, že je použitelný jako tepelný izolant, i když s kompromisy. Největším kompromisem vůči jeho součiniteli tepelné vodivosti bylo zajištění jeho dostatečné únosnosti v tlaku. I přes tuto skutečnost dosáhl součinitele tepelné vodivosti 0,0878 W/mK, obstál v testech nasákavosti, mrazuvzdornosti, v mechanických a termomechanických testech. Může se stát konstrukčním prvkem k přerušení tepelného mostu na hranici interiéru s exteriérem, tepelným izolantem do podzemních částí budov, střech a podlah.

### 3.4 Matematický model kompozitu

Model kompozitu je založen na metodě homogenizace matrice a plniva. Model byl aplikován do konečně prvkového systému. Výsledky numerických analýz termomechanického chování budou srovnány s experimentem. Cílem bylo vytvořit simulační nástroj pro predikci a optimalizaci tepelně-izolačních a termomechanických vlastností kompozitu.

#### Postup aplikace matematického modelu

Nejdříve byl aplikován a adaptován Kafkův mesomechanický model pro dvoufázové kompozity [31]. Model bere v úvahu matici jako jednu složku kompozitu a fázi jako druhou. Druhý typ Kafkova modelu počítá s dvoufázovým kompozitem (fáze a matrice jsou brány jako samostatné složky) a třetí fázi tvoří fáze a matrice spolu dohromady. Třetí fáze je přidáný synergický efekt fáze a matrice, které působí dohromady jako jeden homogenní materiál.

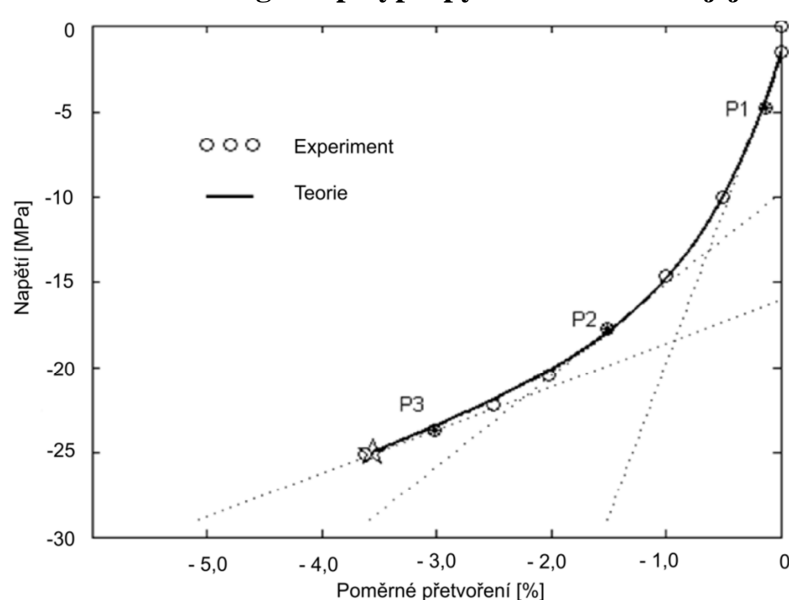
#### Aplikace modelu na polypropylénovou fázi kompozitního WPPC

Částicový kompozit WPPC se skládá z polypropyleny jako pojiva a fáze z inkluzí pěnoskla s následujícími materiálovými vlastnostmi:

	Hustota	Pevnost v tlaku	Youngův modul	Objemové zastoupení frakcí
	kg/m <sup>3</sup>	MPa	MPa	1
<b>Matrice</b>	946	26-38	1100(-1600)	0.1817
<b>Fáze</b>	150(-300)	2.2-2.9	0	0.8183

Tabulka 7. Vlastnosti částicového kompozitu

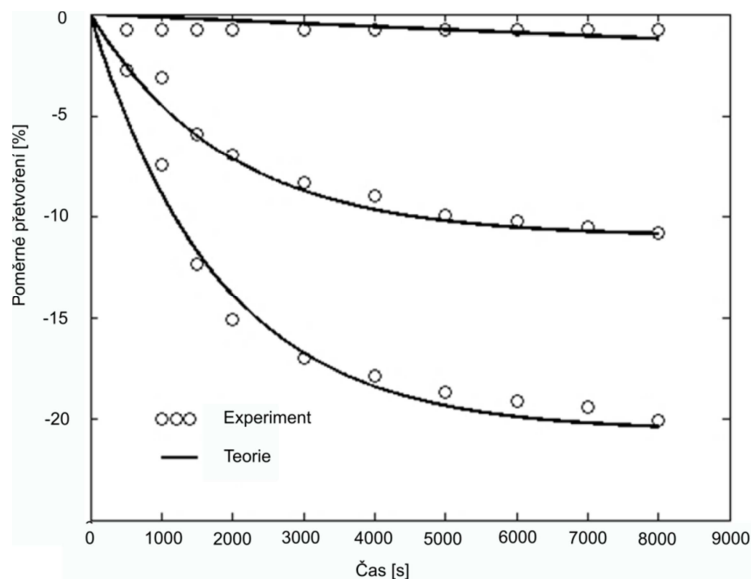
#### Pracovní diagram polypropyleny a stanovení jejích materiálových konstant



Na základě experimentálně získaných dat v diagramu v kompresním testu (viz graf 15) pro propylen, byly jeho materiálové parametry vypočítány. S použitím těchto hodnot byl spočítán teoretický pracovní diagram, viz graf 15.

Graf 15. Závislost poměrného přetvoření na napětí polypropylénové matrice

## Creepové vlastnosti částicového kompozitu WPPC



Creepové křivky byly experimentálně stanoveny pro teploty 22,5 ° C, 40 ° C a 60 ° C. Ze vztahu známých hmotnostních podílů polypropylenu a pěnového skla (42:30) a jejich hustoty (150kg / m<sup>3</sup>, 946 kg / m<sup>3</sup>), mají příslušné objemové frakce (= 0.1817, 0.8183 =>) byly stanoveny a použity v modelu. graf 16 ukazuje shodu mezi experimentálním tečením (creepu) křivky a křivky toku (creepu) vyplývající z modelu pro příslušné hodnoty Youngova modulu polypropylenu a viskozitním  $H_n$  jeho n-složky pro příslušné teploty.

Graf 16. Závislost creepových vlastností kompozitu WPPC při různých teplotách

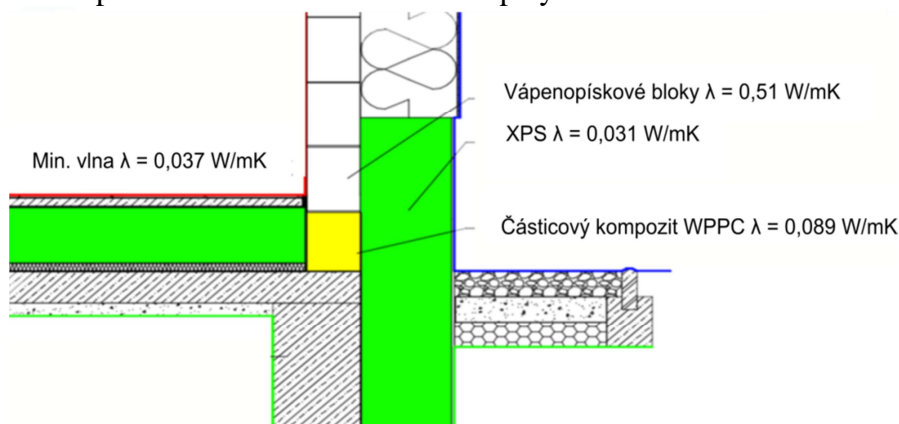
Tento model ukázal, že i když má částicový kompozit WPPC polymerní složku, má přijatelné vlastnosti tečení (creepová vlastnosti). Ve studii je použit Kafkův mesomechanický model pro simulaci změn tečení poměrné deformace v čase pro různé teploty. Získali jsme relativně dobrou shodu mezi naměřenými a vypočtenými daty, a tak lze demonstrovat použitelnost Kafkova mesomechanického modelu pro tento druh kompozitního materiálu.

### 3.5 Možnosti použití kompozitních plastů v konstrukčních detailech pro přerušení tepelného mostu

Možnosti aplikace kompozitu WPPC navazuje na současné konstrukční detaily popsané v kapitole 2. Jedná se především o detaily spodní stavby a předsazených konstrukcí, kde je možné využít mechanickou odolnost a dobré tepelně-izolační schopnosti tohoto kompozitu.

#### Detail v oblasti soklu u novostavby nulového domu s použitím kompozitního WPPC jako tepelného izolantu.

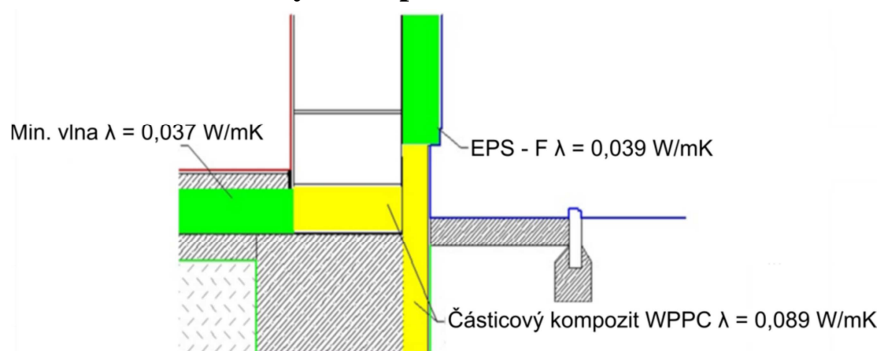
Zateplení spodní stavby je provedeno pomocí kompozitního plastu WPPC (viz obrázek 22 a konstrukční detail). Izolant bude použit z vnější strany soklu a podzemní části základu, izolace bude patřičně tloušťce umístěna i do paty zdiva.



Obrázek 22. Použití kompozitního plastu WPPC pro izolaci stavby v oblasti soklu nízkoenergetického domu.

Kontaktní zateplení nadsoklové části objektu a všechny ostatní části jsou provedeny stejně jakou u předchozího detailu v kapitole 2.

### Detail v oblasti soklu a paty zdiva u s použitím WPPC jako tepelného izolantu u novostavby rodinného domu ze systému porotherm.

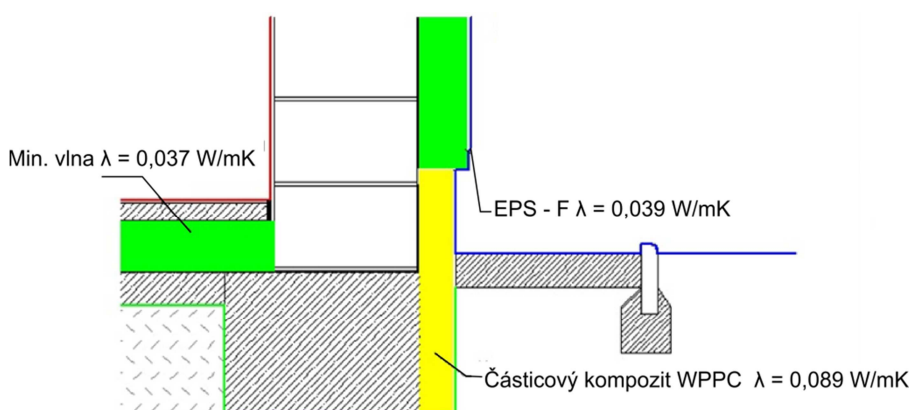


Přerušení tepelného mostu v oblasti soklu je provedeno pomocí tepelného izolantu z WPPC, bez povrchové úpravy (viz obrázek 23). V podzemní části bude tepelná izolace z XPS chráněna nopovou fólií s nakaširovanou geotextilií.

Obrázek 23. Schéma konstrukčního detailu s použitím WPPC pro izolaci stavby v oblasti soklu a paty zdiva.

Provedení detailu je shodné s předchozím detailem, kde obvodové zdivo tvoří vápenopískové cihly.

### Detail v oblasti soklu při dodatečném zateplení s použitím částečného kompozitu WPPC jako tepelného izolantu



Zateplení spodní stavby je provedeno pomocí kompozitního plastu WPPC (viz obrázek 24), V podzemní části bude izolant chráněn nopovou fólií o výšce nopů 8 mm s nakaširovanou geotextilií, Nadzemní část soklu bude kryta keramickým obkladem lepeným vhodným lepidlem např. epoxidové dvousložkové lepidlo.

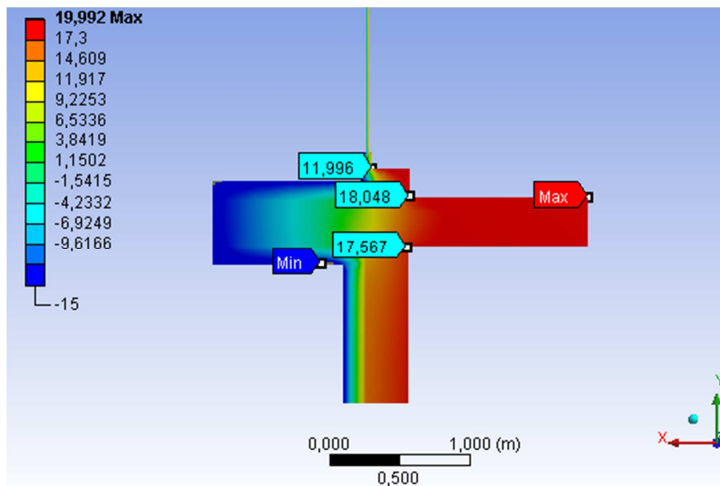
Obrázek 24. Schématický detail použití WPPC pro izolaci stavby v oblasti soklu při dodatečném zateplení.

Stejným způsobem jako u paty zdiva, lze kompozit WPPC použít i jako kotvící prvek pro osazení balkonových dveří.

### Detail v oblasti balkonové konzoly s přerušением tepelného mostu pomocí kompozitního WPPC a ISO nosníku (DET. 1)

Železobetonová konzola je tvořena ISO nosníkem, který sám o sobě částečně přerušuje tepelný most na přechodu mezi interiérem a exteriérem. Rám balkonových dveří je kotven do bloku WPPC o tloušťce 70 mm. Pěnosklo je umístěno pod vápenopískovými tvárnicemi tvořících práh (viz konstrukční detail na obrázek 24). Konzola je navíc obalena tepelnou izolací, XPS na horní straně konzoly, která je pochozí a EPS-F ze spodní strany a z pohledové strany, kde je navržena k zabránění kondenzace na hlavní betonové výztuži konzoly. V programu Ansys byla zpracována modelace teplotního pole viz obrázek 25.

Modelace 3D teplotního pole v oblasti kritických detailů byla provedena pro zjištění nejnižší povrchové teploty v koutech, kde by mohlo docházet k vzniku tepelného mostu.

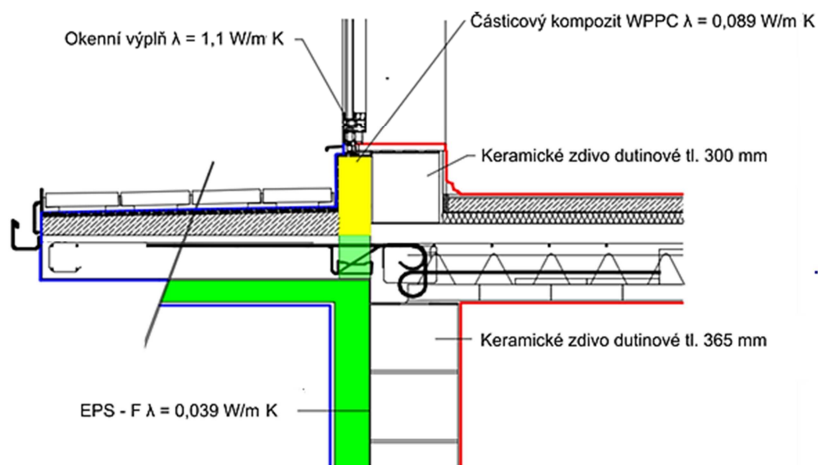


Ke kondenzaci na povrchu konstrukce dojde při povrchové teplotě 10,21°C, je-li teplota v místnosti 21°C a relativní vlhkost vzduchu 50%. K růstu plísní může dojít i v případech, kdy povrchová teplota nedosahuje hodnoty rosného bodu, ale relativní vlhkost v místnosti se zvedne na 80%. Z detailu modelace teplotního pole (viz obrázek 25) je patrné, že povrchová teplota konstrukce na straně interiéru nedosáhla hodnot rosného bodu, tj. pro tuto konstrukci 10,2°C, ale při změně vlhkosti z 50 na 80% by teplota rizika vzniku plísní dosáhla hodnoty 17,42°C.

Obrázek 25. Modelace teplotního pole při přerušení tepelného mostu v oblasti konzoly pomocí ISO nosníku a v oblasti prahu pomocí WPPC v kombinaci s obalením celé konzoly tepelnou izolací (DET.1)

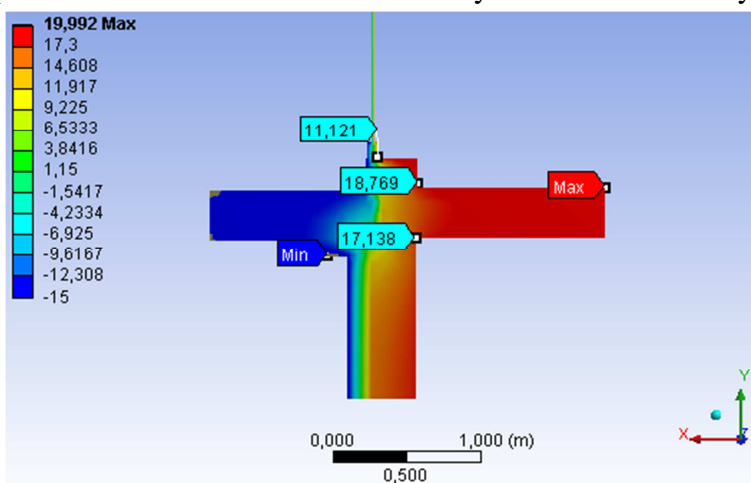
Při správném použití ISO nosníku, není třeba dodatečné izolace balkónové konzoly. Vhodné je použití přechodového prvku pro kotvení balkónových dveří.

**Detail v oblasti balkónové konzoly s částečným přerušením tepelného mostu pomocí kompozitního WPPC a ISO nosníku v kombinaci s částečným obalením celé konzoly (DET.2)**



Konstrukční detail je tvořen, stejně jako v předchozí variantě, v oblasti prahu kompozitním WPPC o stejné tloušťce jako pěnoklo. Konzola balkónu je tepelnou izolací obalena pouze částečně. Ze spodní strany je izolace EPS o tloušťce 100 mm lepena na délku 1000 mm od obvodové stěny (viz schématický obrázek 26).

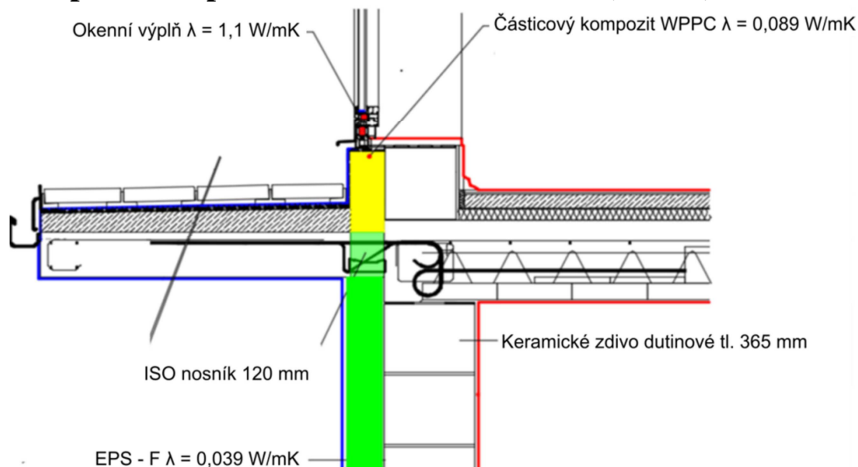
Obrázek 26. Částečné přerušení tepelného mostu v oblasti konzoly pomocí ISO nosníku a v oblasti prahu pomocí WPPC v kombinaci s částečným obalením konzoly tepelnou izolací (DET.2)



Následující konstrukční detail využívá k přerušení tepelného mostu kompozit WPPC v oblasti prahu – jako kotvícího prvku pro osazení rámu balkónových dveří. A ISO nosníku, pro přerušení tepelného mostu mezi vyloženou balkónovou konzolou.

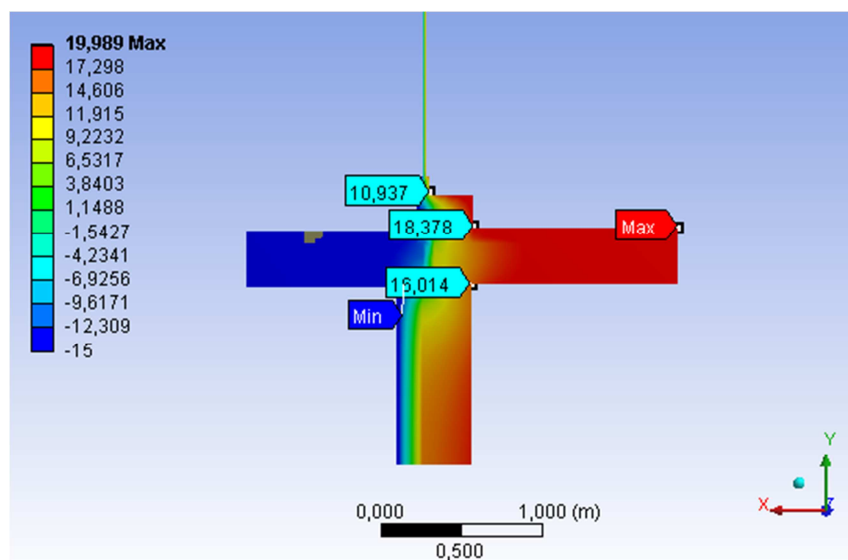
Obrázek 27. Částečné přerušení tepelného mostu v oblasti konzoly... (DET.2)

### Detail v oblasti balkónové konzoly s částečným přerušением tepelného mostu pomocí kompozitního prvku WPPC a ISO nosníku (DET.3)



Konstrukční detail je tvořen, stejně jako v předchozí variantě. Konzola balkónu není dodatečně izolována kontaktním zateplovacím systémem (viz obrázek 28)

Obrázek 28. Schéma přerušení tepelného mostu pomocí ISO nosníku a kompozitního WPPC v podprahové oblasti (DET.3)



Na obrázku 29 je znázorněna modelace konstrukčního detailu v ustáleném teplotním poli.

Obrázek 29. Schéma teplotního pole při přerušení tepelného mostu pomocí ISO nosníku a kompozitního WPPC v podprahové oblasti (DET.3)

Konstrukční detaily balkon. konzol byly hodnoceny na základě povrch. teplot v koutech (viz tabulka 8)

#### Závěrečné hodnocení detailů balkonových konzol

	$T_1 [^{\circ}\text{C}]$	$T_2 [^{\circ}\text{C}]$	$T_3 [^{\circ}\text{C}]$
<b>DET 1</b>	18,048	17,567	11,996
<b>DET 2</b>	18,769	17,138	11,121
<b>DET 3</b>	18,378	16,014	10,937

Tabulka 8. Hodnoty teplot v jednotlivých kritických místech konstrukčního detailu

Celkové hodnocení jednotlivých detailů balkonových konzol dle nastavených parametrů od 1 (nejlepší) až 3 (nejhorší), R-rekonstrukce, N-novostavba, viz tabulka 9.

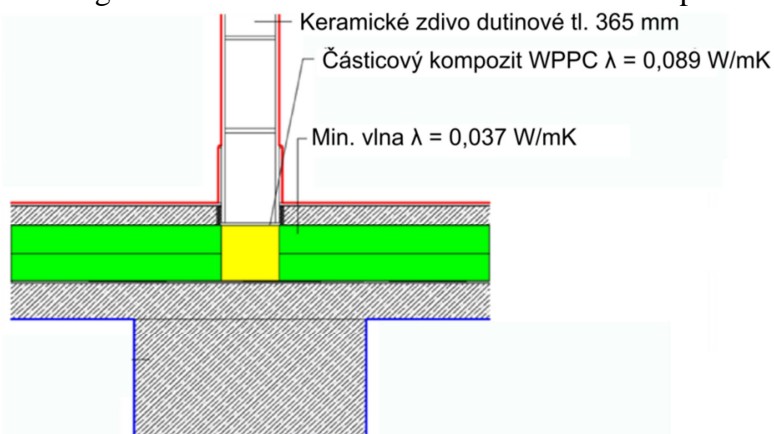
Číslo detailu	Náročnost provedení	Tepelně tech. parametry	Nákladnost	Vhodnost provedení Rekonstrukce X Novostavba	Celkový součet hodnotících parametrů
DET 1	1	3	3	R	7 (3. místo)
DET 2	2	2	2	N	6 (2. místo)
DET 3	2	1	1	N	4 (1. místo)

Tabulka 9. Výsledné hodnocení konstrukčních detailů balkonových konzol dle třech nastavených parametrů

Nejvýhodnější, z hlediska tepelné techniky, je použití ISO nosníku v oblasti detailů balkonových konzol v kombinaci s tepelně izolačním blokem z částicového kompozitu WPPC. Toto řešení lze využít pro novostavby. Při rekonstrukci je třeba obalit celou konzolu tepelnou izolací a při výměně balkonových dveří použít v oblasti prahu tepelně izolační blok WPPC.

#### Detaily založení střední nosné zdi s přerušením tepelného mostu.

Přerušení tepelného mostu pod střední nosnou zdí má význam jen u novostaveb pasivního, nebo nízkoenergetického standardu. Více než omezení tepelného toku směrem do zeminy je důležitější



omezení zvýšené vlhkosti v koutě střední zdi a podlahy. Tak jako u každého konstrukčního detailu, je důležité věnovat čas výpočtům kondenzačních zón a množství kondenzátu v jednotlivých vrstvách konstrukce, pokud možno umožnit difundaci vodních par do prostorů, nebo vrstev konstrukce, kde může být kondenzát odpařený, odvětraný, nebo do konstrukce vůbec nevnikne a bude odvětrán už v interiéru.

Obrázek 30. Přerušení tepelného mostu pomocí kompozitního WPPC pod patou střední nosné zdi

Číslo detailu	$T_1$ [°C]	Relativní vlhkost v koutě [%]	Maximální tepelný tok [W/m <sup>2</sup> ]
DET 1 Bez přerušení tepelného mostu	17,62	63%	35
DET 2 s přerušením tepelného mostu	18,89	56%	13

Tabulka 10. Přehled vypočtených hodnot dle nastavených okrajových podmínek pomocí programu Area od Svoboda software ®

## 4 Závěr

V disertační byl představen nový částicový kompozitní materiál z odpadních materiálů WPPC, který může sloužit jako tlakově únosná tepelná izolace do vlhkých prostor. Disertační práce navazuje a práce na ní byla součástí výzkumného záměru VVZ MSM 0021630511 „Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí“, kterého se účastnil můj školitel Libor Matějka se svými Ph.D. studenty. Kromě vývoje samotného materiálu a určení jeho bližší aplikace v konstrukci, byl v rámci tohoto výzkumného záměru vyvinut částicový kompozit s konečným poměrovým složením fází, které je používáno nyní. Vývoj kompozitu zahrnoval i vývoj a užití

nekonvenčních testovacích metod a součástí testovacích zařízení, především k určení jeho reálných tepelně technických vlastností a k popisu jeho mechanického chování v tlaku. Díky experimentálním výsledkům byl vytvořen numerický model pro dvou a třífázový kompozit vycházející z Kafkova Mesomechanického modelu, popisující creepové vlastnosti částicového kompozitu při vyšších teplotách. Sám autor Kafkova mesomechanického modelu – pan Ing. Vratislav Kafka, DrSc, tento model ověřil dle experimentálních měření.

#### **4.1 Technické a metodické výsledky práce**

V následujících odstavcích jsou shrnuty výsledky práce, které jsou podrobněji popsány v kapitole 4.

##### **4.1.1 Výroba únosného částicového kompozitního prvku z odpadních surovin**

Byl navržen a vyvinut částicový kompozit z odpadních materiálů (WPPC), byly vyrobeny experimentální vzorky ve tvaru nízkých válců a obdélníkových desek s prolisy. Vzorky ve tvaru válce sloužily pro experimentální činnost na laboratorní úrovni. Obdélníkové desky s prolisy, o stejném složení jako válce, představují konečný produkt, který může být použit v konstrukci.

##### **Realizace technologie výroby kompozitu WPPC na laboratorní úrovni**

Byl navržen pracovní postup a pracovní diagram výroby vzorků WPPC. Z těchto zkušeností bylo učiněno v laboratorním provozu opatření, aby k těmto chybám nedocházelo. Po každém výrobním kroku se zavedla výstupní kontrola a bylo vytyčeno zvláštní pracovní místo s materiálem a pomůckami pro přípravu vzorku, přípravu formy a lisování vzorku.

##### **4.1.2 Experimentální stanovení bodů tání, krystalizace a skelného přechodu metodou DSC (diferenčně skenovací kompenzační kalorimetrie)**

Experimentálně byl na reprezentativním vzorku změřen bod tání a tuhnutí (175°C a 125°C resp.) Fázový přechod, který by naznačoval krystalizaci polypropylénové matrice za nízkých teplot okolo 0°C se neprokázal. Bližší vysvětlení a popis chování kompozitu WPPC je popsán v kapitole 4.

##### **Mrazuvzdornost a nasákavost termopolymerního kompozitu WPPC**

Vzorky byly ve zkoušce mrazuvzdornosti vystaveny v 25-ti zmrazovacích cyklech teplotám od -20°C do 20°C. Po provedení této zkoušky nejevily žádné známky poškození. Byly proto na nich provedeny testy nasákavosti dle stanovené metodiky pro keramické stavební výrobky. Vzorky, které prošly zmrazovacími cykly, vykazovaly nasákavost do 1,5% a vzorky referenční do 0,5%. Lze proto říci, že kompozit WPPC je mrazuvzdorný s minimální životností 25 let.

##### **Termomechanické zkoušky při vyšších teplotách**

Byl navržen způsob termomechanického testování vláknitých a částicových kompozitů z polymerních materiálů. K tomuto způsobu testování bylo uzpůsobeno a navrženo příslušenství deformačního stroje Instron a navrženo příslušenství pro experimentální měření Youngova modulu pružnosti sypaných materiálů.

Kompresní testy částicového kompozitu WPPC byly provedeny při teplotách 22,5°C, 40°C a 60°C a ty stejné testy byly provedeny i na sklovláknových kompozitech od anglické firmy, která tyto kompozity vyvinula se stejným účelem – jako tepelně izolační tlakově únosné prvky do stavební konstrukce. Vzhledem k charakteru vláknitých kompozitů byly provedeny tahové testy. Deformace z kompresních testů kompozitu WPPC byla odečtena pomocí metody DIC. Bližší specifikace metody, příprava vzorků a příprava zkušebních těles a zařízení je popsána v kapitole 4.

Kompozit WPPC vykazoval pevnost v tlaku do porušení při pokojové teplotě 15MPa a při teplotě 60°C 7MPa. Pevnost v tlaku byla definována jako doba, kdy se projeví první trhлина a začne se šířit. Na základě těchto testů lze říci, že výrobek vykazuje dobrou únosnost a lze jej umístit do základové konstrukce závislosti na charakteru objektu a způsobu zakládání. Některé vzorky sklovláknitých kompozitů vykazovaly až desetkrát větší pevnost v tahu s maximálním přetvořením 3%. Jsou vhodné k původnímu předpokládanému použití jako tepelná izolace pro podlahy.

Byl podán užitečný vzor a patenty: přihláška vynálezu s názvem „Tepelně izolační modul pro tlakem namáhané konstrukce“, evidovaná pod spisovou značkou PV 2013-715, přihláška užitečného vzoru s názvem „Tepelně izolační modul pro tlakem namáhané konstrukce“, evidovaná pod spisovou značkou

PUV 2013-28485, Evropská přihláška vynálezu s názvem „Thermal isolation module for constructions under pressure“, evidovaná pod spisovou značkou EP 13466021.6. Autory jsou R. Brzoň, M. Ostrý, M. Bodnárová, L. Horák, T. Klubal, P. Žítt, D. Dostálová.

### **Creepové testy**

V rámci termomechanických testů byly provedeny i creepové testy. Vzorky WPPC byly 2 hodiny zatěžovány konstantním napětím 5MPa v tlaku, při teplotách 22,5°C, 40°C a 60°C. Hodnota poměrné deformace po 2 hodinovém zatížení je 1% při pokojové teplotě. Poměrná deformace s teplotou roste, tato závislost není lineární, ve 40°C je deformace už 11% a při 60°C 21%. Použitelnost kompozitů WPPC v konstrukci je omezena nejenom únosností, ale i maximální přípustnou deformací. Vzhledem k výsledkům creepových testů za vyšších teplot je nezbytné, aby kompozit WPPC nebyl vystavován vyšším teplotám než je pokojová teplota cca 22°C, jestliže v konstrukci zastává i nosnou funkci. Proto je vhodný pro umístění do spodní stavby.

### **4.1.3 Určení součinitele tepelné vodivosti metodou komparace v kombinaci s experimentálním měřením**

Na základě porovnání teplotních gradientů na tělese s homogenní tepelnou izolací EPS a tělese s částicovou kompozitní izolací, byl spočítán součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  částicového kompozitního dílce WPPC. Z 5-ti měření jdoucí za sebou byla odborným odhadem stanovena odchylka měření na  $5 \cdot 10^{-3}$  W/K.m. Medián a vážený průměr součinitele tepelné vodivosti byl téměř shodný. Medián výsledného součinitele tepelné vodivosti částicového kompozitního dílce je 0,0878 W/K.m. Odchylka od měření přístrojem Isomet je 11 setin. Lze říci, že reálný součinitel tepelné vodivosti kompozitu WPPC je 0,09 W/K.m.

### **4.1.4 Matematický model kompozitu**

Model kompozitu je založen na metodě homogenizace matrice a plniva. Výsledky numerických analýz termomechanického chování jsou srovnány s experimentem. Matematický model umožnil predikovat a v budoucnu řídit vlastnosti kompozitu WPPC. Je to možnost dále vyvíjet a zdokonalovat jeho vlastnosti s větší efektivitou. Zároveň může být model aplikován na jiné částicové kompozity s termoplastickou maticí, které jsou částečně elastické. Matematická modelace může v krátkém čase najít další využití pro recyklované materiály v kompozitních systémech. Autorem Kafkova mesomechanického modelu, je Vratislav Kafka, který model sám upravil a výsledky ověřil pro kompozit WPPC, viz citovaná literatura [31] a [32].

### **4.1.5 Možnosti použití kompozitních plastů v konstrukčních detailech pro přerušení tepelného mostu**

Byly navrženy a teplotně namodelovány konstrukční detaily s použitím částicového kompozitu WPPC v oblasti soklu, paty zdiva, střední nosné zdi a balkónové konzoly. Pro ověření tepelně technických vlastností byly detaily namodelovány ve 3D ustáleném teplotním poli. Byla stanovena kritéria hodnocení konstrukčních detailů a na jejich základě bylo určeno pořadí detailů od nejvhodnějšího (1. místo) po nejméně vhodné (3. a další místo). Detailnější výsledky jsou uvedeny v kapitole 4.

### **4.2 Vědecké výsledky práce**

1. Bylo prokázáno metodou DIC, že při zatížení částicového kompozitu v tlaku se akumuluje napětí na okrajích zrn fáze, které postupuje k jejich středu a později dochází ke zhroucení fáze uvnitř matrice. Pole koncentrované deformace se šíří ve válcových vzorcích ve vodorovných rovinách, v hranolech pod úhlem 45°C. Díky směru šíření dislokačních rovin jsou výhodnější termoizolační bloky ve tvaru válce, deformace je v rovině přibližně stejnoměrná.
2. Nebyl, pomocí metody DSC, prokázán růst krystalů v semikrystalickém odpadním polyetylénu při teplotách od 0 do -40°C. Zvyšující se tepelný odpor pod bodem mrazu souvisí se snižující se tepelnou kapacitou materiálu, která je teplotě nepřímo úměrná. Závislost tepelné kapacity na teplotě byla pro tento materiál experimentálně změřena.

### 4.3 Možnosti uplatnění výsledků práce

1. Částicový kompozit WPPC lze použít jako tlakově únosný tepelný izolant do spodní stavby, nebo do vlhkých prostor.
2. Uplatní se v konstrukčních detailech s požadavky na zvýšenou mechanickou odolnost tepelné izolace, jako jsou balkónové konzoly, izolace u paty zdiva, podprahová izolace balkónových dveří, izolant pod střední nosnou zdí, izolant základové desky.

## 5 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Polyetylen-a-Polypropylen. [online]. s. 303-305, 11. 6 2008 [cit. 2012-08-17]. Dostupné z: <http://ireferaty.lidovky.cz/303/4851/Polyetylen-a-Polypropylen>
- [2] TRIPATHI, D. Practical guide to polypropylene. Shrewsbury: RAPRA Technology, 2001. ISBN 1859572820.
- [3] Recycling ..: možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin : sborník přednášek .. ročníku konference. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 1996. ISBN 978-80-214-5141-4.
- [4] Foamglass. Foamglass. [Online] 12. 4 2011. Dostupné z: <http://www.foamglas.cz>.
- [5] RŮŽIČKA, Jan. Stavební materiály na bázi obnovitelných zdrojů surovin. Stavebnictví. 2007, 3.
- [6] OSTRÝ, Milan a Sylva KLÍMOVÁ. Trvale udržitelná výstavba. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007. 1
- [7] MAŠEK, Miloslav. Trvale udržitelné stavění. Stavitel. 2008, 2008, 1
- [8] JAROŠ, Petr. Lze recyklovat ETICS. In: IMateriály [online]. 2010 [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://imaterialy.dumabyt.cz/>
- [9] Svět ropy. In: Petroleum.cz [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz>.
- [10] HÁJEK, Petr. Udržitelná výstavba budov a její uplatňování ve střední Evropě. Stavebnictví. 2007, 2007, 2.
- [11] Pu-europe: excellence in insulation. Pu-europe [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: [www.pu-europe.eu](http://www.pu-europe.eu)
- [12] REMEŠ, Michal. Možnosti aplikace recyklovatelných materiálů ve stavebnictví. Bydlení. 2009, 2009, 2-5.
- [13] STRAŇÁK, Vít. Polyuretanová budoucnost. Dům a byt [online]. 2011 [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: [http://www.dumabyt.cz/rubriky/dum/materialy-a-technologie/polyuretanova-budoucnost\\_19944.html](http://www.dumabyt.cz/rubriky/dum/materialy-a-technologie/polyuretanova-budoucnost_19944.html).
- [14] Rozdělení plastů a jejich průmyslové zpracování. Sweb [online]. 2011 [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: [sweb.cz](http://www.sweb.cz)
- [15] NUTSCH, Wolfgang. Příručka pro truhláře. 2., přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-14-1.
- [16] DROCHYTKA, Rostislav. Plastické látky ve stavebnictví. Brno: CERM, 1998. ISBN 8021411481.
- [17] Polyethylén. Plastpartner [online]. 2015 [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: [www.plastpartner.cz/produkt/detail/polyetylen-500](http://www.plastpartner.cz/produkt/detail/polyetylen-500).
- [18] Polypropylén. Wikipedia [online]. [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- [19] BODNÁROVÁ, Lenka. Kompozitní materiály ve stavebnictví. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-214-2266-1.
- [20] RYDLO, Pavel. Tepelná izolace soklu a spodní stavby chyby v praxi: Nízkoenergetické domy. Setrime-energie [online]. Olomouc: S-Therma Olomouc, 2010 [cit. 2017-02-18].

Dostupné z: <http://www.setrime-energie.cz/clanky/nizkoenergeticke-domy/tepelna-izolace-soklu-a-spodni-stavby-chyby-v-praxi..>

- [21] PEXOVÁ, Jana. Konstrukce převislé. Skoleni-kurzy [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: [www.skoleni-kurzy.eu/ke\\_stazeni/1/./13\\_PST-Kce-previsle.pdf](http://www.skoleni-kurzy.eu/ke_stazeni/1/./13_PST-Kce-previsle.pdf).
- [22] Metodologie: Varianty výzkumu. Karlova Univerzita FTVS [online]. 1999 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: [http://www.ftvs.cuni.cz/hendl/metodologie/typy\\_vyzkumu.htm](http://www.ftvs.cuni.cz/hendl/metodologie/typy_vyzkumu.htm)
- [23] Ministerstvo průmyslu a obchodu: Odpad je energie. Ministerstvo průmyslu a obchodu: Energetika [online]. Praha, 2009 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument60104.html>
- [24] Ministerstvo průmyslu a obchodu: Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů. Ministerstvo průmyslu a obchodu: Energetika [online]. Praha, 2013 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument120572.html>
- [25] Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem: Roční těžba dřeva v ČR. Informace o lesích: Roční těžba dřeva v ČR [online]. Brandýs nad Labem, 2017 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.uhul.cz/rychle-informace/444-rocne-se-v-cr-tezi-cca-16-mil-m3-dreva>
- [26] HOLAN, Jan. Ekologické stavění: Pasivní dům Centra Veronica Hostětín. 2. Brno: Veronica, 2010. ISBN 978-80-904109-7-8.
- [27] Co je pasivní dům. Pasivní domy [online]. Brno: Centrum pasivního domu, 2012 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/co-je-pasivni-dum/t2>
- [28] MORÁVEK, Petr a Jan TYWONIAK. Pasivní domy v Českém ráji. Stavebnictví [online]. Praha, 2010, 2010(07) [cit. 2017-04-02]. ISSN 1802-2030. Dostupné z: [http://www.casopisstavebnictvi.cz/pasivni-domy-v-ceskem-raji\\_A458\\_I10\\_07](http://www.casopisstavebnictvi.cz/pasivni-domy-v-ceskem-raji_A458_I10_07)
- [29] Pasivní dům. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Pasivní\\_dům](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pasivní_dům)
- [30] PONCAROVÁ, Jana. Kondenzace voda. In: Ekolid [online]. 2013 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: [http://www.ekolid.cz/wp-content/uploads/kondenzace\\_voda.jpg](http://www.ekolid.cz/wp-content/uploads/kondenzace_voda.jpg)
- [31] V. Kafka, Inelastic mesomechanics, Wspc, January 1, 1988, ISBN-10: 9971505053
- [32] Kafka, V. Inelastic Mesomechanics, World Scientific, Singapore.(1987).
- [33] VOYIADJIS, G. Z. a Peter Issa KATTAN. Mechanics of composite materials with MATLAB. Berlin: Springer, c2005. ISBN 3-540-24353-4.
- [34] LIENHARD, John H. A heat transfer textbook. 4th ed. Mineola, N.Y.: Dover Publications, c2011. ISBN 978-0486479316.
- [35] JONES, Robert M. Mechanics of composite materials. 2nd ed. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, c1999. ISBN 1-56032-712-x.
- [36] ERIAN A. ARMANIOS a EDITOR. Composite materials: fatigue and fracture. Philadelphia, PA: ASTM, 1997. ISBN 0803124112.

## 5.1 *Patenty*

- I. patent MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; KUČERA, J.; VUT v Brně: Způsob výroby izolačních desek proizolační blok z kompozitního materiálu a lisovací forma k jeho výrobě. 302 658, patent. Praha (2011)
- II. patent MATĚJKA, L.; PĚNČÍK, J.; VUT v Brně: Tepelně izolační kompozitní plast. 302 851, patent. Praha (2011)
- III. patent BRZOŇ, R.; OSTRÝ, M.; BODNÁROVÁ, L.; HORÁK, D.; KLUBAL, T.; ŽÍTT, P.; DOSTÁLOVÁ, D.: tlakový modul\_ IA5; Tepelně izolační modul pro tlakem namáhané konstrukce