



# Návrh optimální výplně protipožárních vrat

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3106 – Textilní inženýrství  
*Studijní obor:* 3106T018 – Netkané a nanovláknenné materiály  
*Autor práce:* **Tomáš Lisner**  
*Vedoucí práce:* Ing. Ondřej Novák, Ph.D.



# Proposal of optimal fillings fire doors

## Diploma thesis

*Study programme:* N3106 – Textile Engineering  
*Study branch:* 3106T018 – Nonwoven and Nanomaterials

*Author:* **Tomáš Lisner**  
*Supervisor:* Ing. Ondřej Novák, Ph.D.



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Novákovi Ph.D. a Ing. Vladimírovi Kovačičovi za konzultace, odborné informace, cenné připomínky.

Poděkování patří taktéž mým rodičům za morální a hmotnou podporu během celého mého studia.

## **Anotace**

Diplomová práce obsahuje několik základních částí, kde jsou detailněji rozebrána vybraná témata. První část obsahuje legislativní část a posuzované parametry protipožární ochrany v České republice. Dále jsou popsána konstrukční řešení protipožárních uzávěrů, která se zaměřují na krycí materiály a výplně uzávěrů a také na testovací metody v reálných podmínkách. Druhá část je teoretická, kde se řeší charakteristika prostupu tepla materiály. V poslední části je realizován experiment, který stanoví protipožární odolnost vybraných nehořlavých materiálů, včetně návrhu a ověření složení skládaných vrstev pro dosažení vysoké odolnosti za přijatelnou cenu.

## **Klíčová slova**

Nehořlavé materiály, protipožární dveře, tepelná vodivost

## **Annotation**

Master thesis includes several basic parts, where the selected topics are analysed in detail. The first part describes legislation and main parameters of fire protection in Czech Republic, structural solution of fire shutters that is focused on their cover materials and stuff and also testing methods under real conditions. The second part is theoretic, where principles of a heat transfer and thermal conductivity through the materials is explained. In the last part the experiment is involved to verifying the non-combustible materials and finding of the optimal composition for stuff of fire doors and gates.

## **Key words**

Nonflammable materials, fireproof doors, thermal conductivity

# Obsah

Úvod .....	6
1. Rešeršní část.....	7
1.1 Požární odolnost .....	7
1.2 Hořlavost .....	8
1.3 Šíření plamene .....	8
1.4 Reakce na oheň .....	8
1.5 Legislativa protipožární ochrany .....	9
1.6 Konstrukce protipožárních vrat.....	10
1.7 Testování požárních uzávěrů .....	18
1.8 Materiály pro protipožární ochranu .....	22
1.8.1 Nevláknenné nehořlavé materiály .....	22
1.8.2 Vlákenné nehořlavé materiály .....	25
2. Teoretická část .....	27
2.1 Charakteristika výměny tepelné energie .....	27
2.1.1 Vedení - kondukce.....	27
2.1.2 Sálání tepla – radiace .....	28
2.1.3 Proudění - konvekce.....	29
2.1.4 Tepelná vodivost .....	29
2.1.5 Prostup tepla vrstvenými materiály.....	30
3. Experimentální část.....	32
3.1 Použitá zařízení .....	33
3.2 Návrh testovací metody.....	34
3.3 Plán experimentu .....	35
3.4 Použité materiály .....	36
3.5 Návrh stanovení tepelné vodivosti .....	37
4. Výsledky zkoušek požární odolnosti testovaných materiálů .....	39

4.1. Výsledky zkoušek požární odolnosti nevláknenných materiálů.....	39
Vzorek 1.....	39
Vzorek 2.....	41
Vzorek 3.....	42
Vzorek 4.....	44
Vzorek 5.....	46
Vzorek 6.....	47
4.2. Výsledky zkoušek požární odolnosti vláknenných materiálů.....	48
Vzorek 7.....	48
Vzorek 8.....	49
4.3. Výsledky zkoušek požární odolnosti složených materiálů .....	49
Skladba 1 .....	50
Skladba 2 .....	52
Skladba 3 .....	53
Skladba 4 .....	55
Skladba 5 .....	57
4.4. Určení tepelné vodivosti vzorků.....	58
Diskuze .....	60
Závěr.....	63
Literatura.....	64

## Seznam použitých zkratk

EN	Evropská norma
ČSN	Česká státní norma
mm	milimetr
kg	kilogram
kg.m <sup>-3</sup>	kilogram na metr krychlový – objemová hustota
m <sup>2</sup>	metr čtvereční
m <sup>3</sup>	metr krychlový
min	minuta
°C	Celsiův stupeň
°K	Kelvin
Obr.	obrázek
RC	ressistance class
log	logaritmus
λ	hodnota prostupu tepla [W.mK <sup>-1</sup> ]



# Úvod

V dnešní době je na trhu mnoho nehořlavých materiálů, které jsou rozděleny do několika bezpečnostních skupin, zejména podle časové výdrže při požáru. U těchto materiálů se stanovuje požární odolnost a měří se součinitel tepelné vodivosti, dále se hodnotí index rychlosti hoření, šíření ohně po materiálu nebo chování materiálu při kontaktu s vysokou teplotou. Všechny tyto faktory jsou důležitou součástí hledání nových typů materiálů. Charakter výplně může být vláknový nebo nevláknový. Pojení může být realizováno různými typy organických nebo anorganických pojiv, případně mechanicky. V protipožárních vratech tyto materiály mají za úkol odolávat vysokým teplotám během požáru objektu, aniž by degradovaly nebo se deformovaly.

Zákon České republiky uvádí přesný postup testování protipožárních vrat a nastavuje přesně definované podmínky testování. Ze zákona také vyplývá povinnost vybavit rizikové prostory protipožárními uzávěry a rozdělit tak prostory na více uzavřených sektorů. Tím se zabrání rychlému rozšíření ohně po celém objektu a předejde se vysokým škodám na majetku či újmě na zdraví člověka. Důležitý je také typ konstrukce vrat, který přispívá k požární odolnosti při požáru.

Tato práce je zaměřena právě na hledání optimální výplně požárních uzávěrů, kde bude zkoumána povaha materiálu, reakce na vysoké teploty a požární odolnost při kontaktu s vysokou tepelnou energií. Všechny tyto údaje budou zaznamenány a vyhodnoceny. Informace byly čerpány z odborné literatury a doplňující informace či výrobky na trhu vyhledány pomocí internetu. Optimální výplň vrat by měla mít dobrou požární odolnost, ale být cenově přijatelná. Pro snížení ceny připadá v úvahu použití vrstvených materiálů, kde na povrchu bude materiál s dobrou požární odolností a uvnitř levnější materiál s nižší požární odolností, ale nízkou cenou. Tím by mohlo dojít ke kompromisu požární odolnosti a výraznému snížení ceny. Tyto vrstvené materiály nejsou dosud používány. V experimentální části výzkumu bude navržen způsob testování protipožárních vlastností materiálů na zmenšených modelech výplní i celé skladby vrat, která zajistí zlevnění a zrychlení výběru. Předpokládá se, že navržené podmínky testu budou blízké normovaným testům, které jsou však velmi finančně náročné (řádově stovky tisíc Kč) a přitom poskytnou srovnatelné výsledky. Dalším významným přínosem tohoto postupu bude i menší spotřeba materiálu nutného pro výrobu testovacích vzorků.

# 1. Rešeršní část

Tato kapitola obsahuje poznatky o požární bezpečnosti, které vyplývají ze zákona České republiky a pojmů v něm uvedených.

Vybrané základní pojmy jsou výňatkem z České státní normy a vysvětlují hodnocení nehořlavých materiálů a jejich chování při požáru. Česká státní norma přesně definuje postup testování, použité prostředky a specifikuje bezpečnostní třídy daných zkoušených materiálů.

## 1.1 Požární odolnost

Požární odolnost je vlastnost dané konstrukce odolávat po určitou dobu působení požáru. Udává se v minutách a je zaokrouhlena na nejnižších bližších 15 minut, teda např. 15, 30, 45, 60, 90, 120 a 180 minut. Pro ověření požární odolnosti se vykonává zkouška dle příslušné normy nebo se matematicky vypočítává. Tzv. mezní stavy stanovují bezpečnostní konstrukci pro požární odolnost. Norma ČSN 730810 přesně specifikuje jednotlivé mezní stavy, které musejí být zajištěny pro bezpečnost stavební konstrukce. V tabulce 1 jsou uvedeny symboly pro označení požárních odolností pro jednotlivé druhy stavebních konstrukcí.

Tabulka 1: Zkratky užívané pro označování mezních stavů požární odolnosti (1)

Zkratky užívané pro označování mezních stavů požární odolnosti	
R	Únosnost a stabilita (Résistance)
E	Celistvost (Etanchéité)
I	Izolační schopnost (Isolation) - mezní teploty na neohřívaném povrchu
W	Izolační schopnost (Radiation) - mezní hustota tepelného toku z neohřívané strany
S	Odolnost proti průniku kouře (Smoke) prostup zplodin kouře
M	Odolnost proti mechanickému působení (Mechanical)
C	Konstrukce opatřené samozavíracím zařízením (Closing)
DP1	Konstrukce obsahující nehořlavé hmoty
DP2	Požadovaný čas nezvyšují intenzitu požáru
DP3	Obsahující dřevo

Bezpečnostní konstrukce požární odolnosti podle ČSN 730810 musí splňovat alespoň jeden parametr mezních stavů, které jsou uvedeny výše, popřípadě jejich kombinaci. Např. u nenosné stěny uvnitř požárního úseku nebo zavěšeného podhledu je vyžadována celistvost a izolační schopnost - tedy mezní stav EI (t). Doba t se udává v minutách a značí, že příslušný mezní stav nebo jeho kombinace, nebude dosaženo dříve, než jaký je číselný údaj písmena t. Značení se provádí na každý výrobek.

## 1.2 Hořlavost

Hořlavost je vlastnost materiálů se vznítit, hořet nebo žhnout, tzn., jakým způsobem materiály podporují intenzitu hoření při požáru. Dle ČSN 730862 "Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot" se tyto materiály dělí podle tabulky 2:

Tabulka 2: Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot (1)

ČSN 730862 - Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot		
A	nehořlavé	nehoří, nežhnou ani neuhelnatí
B	nesnadno hořlavé	převážně žhnou nebo uhelnatí
C1	těžce hořlavé	zapálí se a pozvolna hoří, po odstavení kahanu samovolně uhasnou do 2minut
C2	středně hořlavé	hoří, po odstavení kahanu samovolně uhasnou do 5minut
C3	lehce hořlavé	rychle hoří, zpravidla zcela shoří před uplynutím zkušebních 10min; po odstavení kahanu samovolně hoří déle než 5minut

## 1.3 Šíření plamene

Vlastnost materiálů rozšířit požár po svém povrchu je uvedena v normě ČSN 730863 "Stanovení šíření plamene po povrchu stavebních hmot".

Tato norma určuje, jak stavební materiál přispívá k šíření plamene. V dnešní době se materiály už neposuzují na hořlavost a šíření plamene, ale tyto zkoušky byly nahrazeny zkouškou reakcí na oheň.

## 1.4 Reakce na oheň

Norma ČSN EN 13501-1 (730860) "Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň" nahrazuje dvě předchozí výše uvedené normy ČSN 730862 "Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot" s účinností od 1. 1. 2004 a ČSN 730823 "Stupeň hořlavosti stavebních hmot" s účinností od 1. 1. 2008. Tato nová evropská norma, zahrnutá do soustavy norem ČSN určuje postup klasifikace stavebních výrobků podle jejich reakce na oheň. Pro usnadnění převodu požadavků požárních projektových norem řady ČSN 7308. na třídy dle ČSN EN 13501-1 je v národní příloze této normy uvedena následující převodní tabulka 3: (1).

Tabulka 3: Stupně hořlavosti a třídy reakce na oheň (1)

Stupeň hořlavosti	Třída reakce na oheň
A	A1
B	A2
C1	B
C2	C nebo D
C3	E nebo F

## 1.5 Legislativa protipožární ochrany

Technické podmínky požárních dveří, kouřotěsných dveří a kouřotěsných požárních dveří stanovuje Ministerstvo vnitra České Republiky zákonem § 24 odst. 2 zákona č. 133/1985 Sb., o požární ochraně, ve znění zákona č. 203/1994 Sb. ze dne 31. srpna 1999.

Předmět úpravy:

**(1)** Tato vyhláška stanovuje technické podmínky požárních dveří, kouřotěsných dveří a kouřotěsných požárních dveří pro zabezpečení požární ochrany.

**(2)** Požární dveře, kouřotěsné dveře a kouřotěsné požární dveře musí splňovat požadavky vyplývající z právních předpisů a typem, konstrukcí, provedením, způsobem zabudování do staveb nebo technologií, požární odolností anebo kouřotěsností odpovídat požadavkům na požární bezpečnost staveb odpovídajícím obsahu ČSN 73 0802 + Z1, ČSN 73 0804 a ČSN 73 0810.

**(3)** Požární dveře, kouřotěsné dveře a kouřotěsné požární dveře musí být snadno identifikovatelné.

Technické podmínky:

**(1)** Požární uzávěry musí splňovat technické parametry, které vyplývají z požární odolnosti.

**a)** Celistvost (E), tepelná izolace na neohřívané straně (podle teploty) (I), tepelná izolace (podle radiace) (W).

**b)** Použité funkční vybavení (C) u požárních uzávěrů podle § 4 odst. 2.

**(2)** Kouřotěsné uzávěry musí splňovat technické parametry, které vyplývají z požadavků na kouřotěsnost (S) a funkční vybavení (C).

**(3)** Kouřotěsné protipožární uzávěry musí splňovat technické podmínky podle odstavců 1 a 2.

(4) Ověření technických podmínek podle odstavců 1, 2 a 3 vždy normovaným testem kromě odstavců 5 a 6.

(5) Ověření splnění technických podmínek požárních dveří.

a) typ pouze pro danou budovu.

b) speciálně vyráběných replik nejvýše však 15 kusů.

c) v případě větších atypických rozměrů, konstrukčním řešením nebo teplotním namáháním nelze normovaný test provést, lze vykonat rozšířený test na základě výpočtů, které ověří pověřená oprávněná osoba. Početní řešení lze provést jen tehdy, kdy lze všechny výpočty požární odolnosti početně vyjádřit.

(6) Nový test se neprovádí, pokud se jedná o přímou aplikaci výsledků z normovaných zkoušek (2).

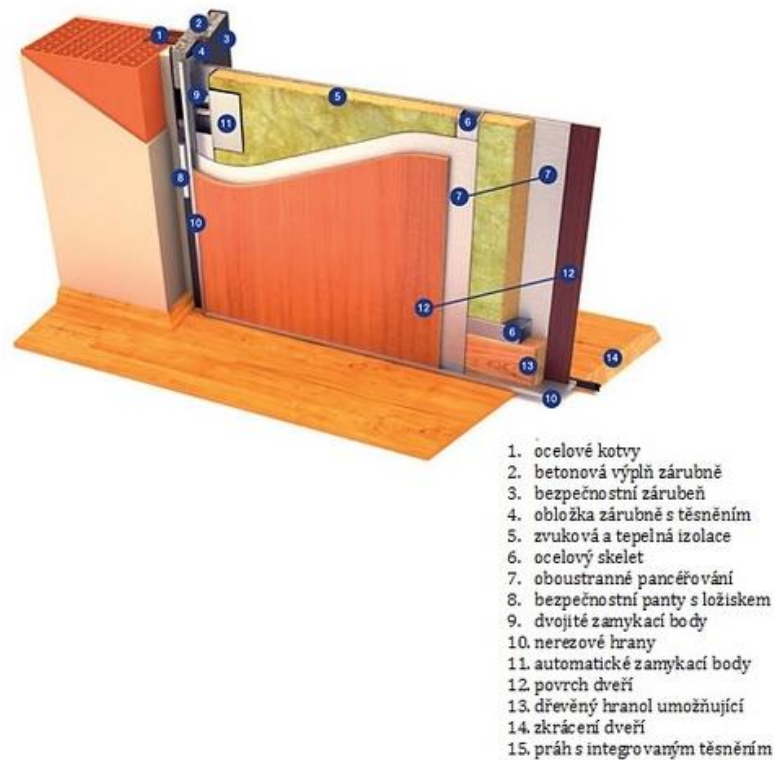
## 1.6 Konstrukce protipožárních vrat

Protipožární vrata je nutné používat v místech, kde je větší riziko vzniku požáru a jeho rozšíření do okolí. Např. mezi kotelnou a obytnou zónou, kde jsou požadovány dveře i zárubně v protipožárním provedení nebo případně i s kouřotěsným rámem. Doba prohoření dveří je při požáru klíčová a rozdíl mezi „obyčejnými“ a protipožárními dveřmi je nejméně 25 minut. Protipožární dveře jsou označeny štítkem, kde se uvádí požární odolnost s časem, za který dveře prohoří, druh konstrukce a jestli jsou dveře kouřotěsné viz obr. 1.



Obrázek 1: Označení protipožárních dveří - štítek (20)

Na trhu existuje celá řada protipožárních uzávěrů, které jsou určeny pro dané umístění v rizikových prostorách. Některé dveře jsou určeny pro méně rizikové provozy a jsou vybavena např. pouze vrstveným požárním sklem. Tyto dveře se umísťují např. do kanceláří ve výrobě s rizikem vzniku požáru. Dveře pro rizikovější oblasti jsou plné s krycím kovovým pláštěm a jsou vyplněny nehořlavými materiály. Na obrázku 2 je schéma složení bezpečnostních požárních dveří.



Obrázek 2: Detailní popsání a rozkreslení bezpečnostních požárních dveří (21)

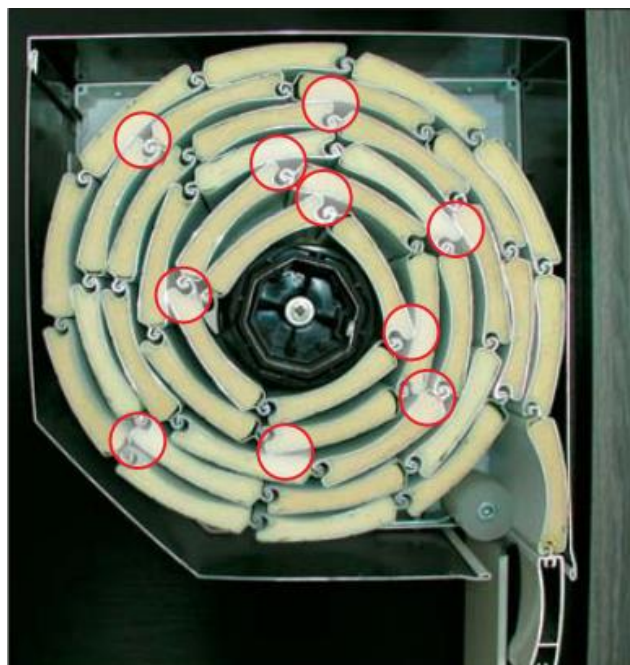
**Protipožární vrata lze dělit podle typu konstrukce do těchto kategorií:**

Spirálová vrata – pro spirálová vrata (obr. 3) je charakteristická bezdotyková technika navíjení, kterou zajišťuje spirálová kulisa určující dráhu návinnu lamel. Vrata lze vybavit tří fázovou řídicí jednotkou s frekvenčním měničem s řetězovým mechanismem a pružinovou kompenzací, čímž vrata mohou dosáhnout rychlosti navíjení až 2,5 m.s<sup>-1</sup>. Jejich použití je pro vnější i vnitřní prostředí. Odpor vrat proti zatížení větrem podle normy EN 12424 třídy 4 je maximálně 133 km.h<sup>-1</sup>. Tepelná izolace při velikosti vrat 25 m<sup>2</sup> je od 1,95 W.m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> a akustická izolace v provedení bez skel 26 dB. Při nouzovém režimu slouží k otevření a zavření vrat ruční řetězový systém.



Obrázek 3: Spirálový mechanismus vrat pro bezkontaktní uložení lamel

Rolovací vrata – lamely (obr. 4) jsou sbaleny do návínu stejně jako u spirálových vrat s rozdílem, že mezi jednotlivými lamelami dochází ke kontaktu. Lamely jsou vyráběny z hliníku v šířce od 5 metrů a krycí výšce 77 mm. Lamely mají výbornou izolační schopnost, díky polyuretanové pěně. Díky malým lamelám jsou velmi hospodárná a tím nezabírají plochu stropu. Pohon vrat může být pomocí elektrického pohonu s dálkovým ovládním nebo ručním ovládním s pomocí pružinového systému pro odlehčení váhy. Vrata lze vybavit bezpečnostními prvky, jako je protipádová brzda, nebo extrudovanými hliníkovými lamelami.



Obrázek 4: Uložení lamel v rolovacích vratech

Rychloběžné vrata – rychlost otevření vrat se pohybuje okolo  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , využívají se pro vnitřní i venkovní prostory z důvodu optimalizace dopravního toku, lepším klimatickým podmínkám ve vnitřních prostorách nebo úsporám energie. Otevírat vrata (obr. 5) lze vertikálně i horizontálně. Řídící jednotka s frekvenčním měničem snižuje mechanické zatížení a zaručuje tichý chod. Pro prodloužení životnosti vrat a řídicí jednotky, lze použít plynule rozjezdy a dojezdy. Pro lepší izolační schopnosti vrat lze vyplnit vrata izolačními materiály a tím snížit tepelnou izolaci o 15 %.



Obrázek 5: Rychloběžné vrata s průhlednými lamelami

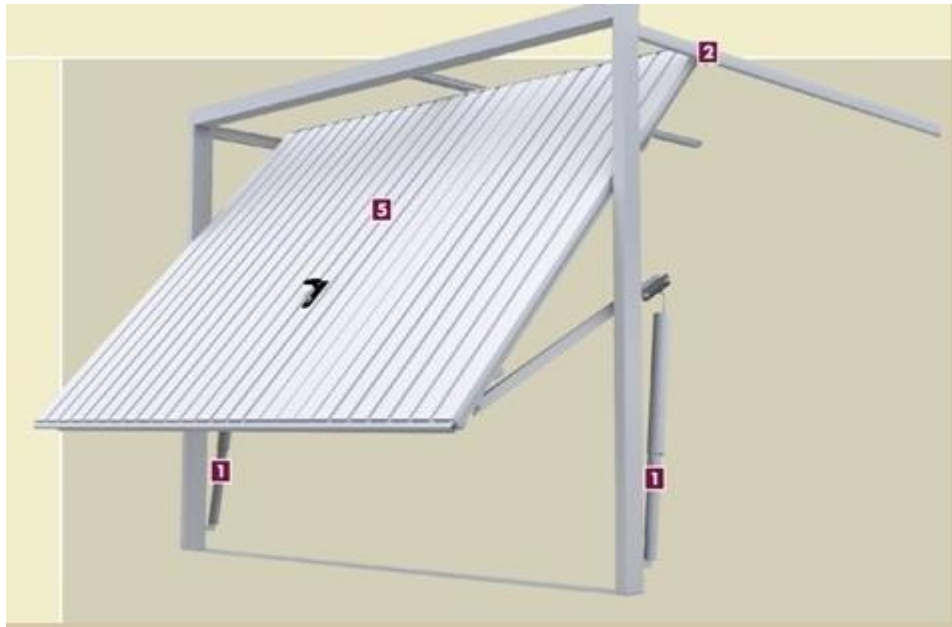
Sekční vrata – Konstrukce (obr. 6) je složena z křídla, systému vyvážení křídla s torzním nebo pružinovým systémem. Křídlo vrat je složeno z horizontálně umístěných složených panelů o síle 40 mm. Panely jsou složeny ze dvou ocelových plechů s pozinkováním. Pro lepší izolační vlastnosti jsou vyplněny polyuretanovou pěnou. Složené panely jsou vzájemně spojeny díky speciálním pantům, a proto nedochází ke vzniku tepelných mostů a promrzání vrat. Pohyb zajišťuje elektrický pohon s vestavěnou logickou jednotkou a přijímačem s dálkovým ovládním. Díky pružinovému systému lze vrata otevírat ručním pohonem.



Obrázek 6: Systém sekčních vrat



Výklopné vrata – Rám (obr. 7) je tvořen třístrannou zárubní z pozinku. Spodní část může být osazena prahovým profilem, který je kvůli větším rozměrům je v rozích plně zavařen a šikmo vyztužen. Pro lepší vyvážení stability vrat je použit pružinový paket s tlumičem. Uzamčení vrat je dvoustranným zablokováním s pomocí výsuvných tyčí. Při manipulaci se vyklápí celá vrata směrem nahoru a jsou uložena pod stropem. Je nutný manipulační prostor při otevírání vrat.



Obrázek 7: Výklopné vrata

#### **Rozdělení podle principu zabránění prostupu požáru:**

Dvoje vrata se vzduchovou mezerou – Za normálního provozu jsou zavřena pouze jedna vrata, v případě požáru se uzavřou oboje dvoje vrata, mezi kterými vzniká vzduchová komora, která funguje jako izolace, a tím zpomaluje prostup tepla (3).

Vrata s roletou a vodním skrápěním – V případě požáru je před běžná vrata spuštěna textilní roleta, která je skrápěná vodou a tím dochází k prodloužení odolnosti proti požáru (3).

Plechová konstrukce vyplněná protipožárním materiálem – Vrata jsou konstruována tak, aby odolávala vysokým teplotám po určitou dobu (3).

#### **Typy pohonů vrat:**

Gravitace – Vrata jsou spuštěna při požáru samovolně pomocí gravitační síly.

Elektrický motor – Vrata jsou ovládána pomocí elektromotoru, v případě výpadku elektrické energie je zapotřebí záložní zdroj.

Hydraulika – Vrata jsou ovládána přes hydraulické písty, které pohybují s vraty.

Pneumatika – Vrata jsou ovládána přes pneumatické měchy, které pohybují s vraty.

Proti závaží – Manuální otevírání vrat s pomocí protizávaží, které odlehčí hmotnost vrat (3).

Příklady protipožárních uzávěrů jsou následující:

Bezpečnostní ocelové dveře třetí třídy odolnosti s automatickým uzamykáním a to v jednokřídlovém, dvoukřídlovém nebo protipožárním provedení. Tyto dveře jsou určeny pro vnitřní a vnější použití se zvýšenými požadavky na uzávěry proti násilnému vniknutí. Splňují normu požární odolnosti EI 60 / EW 90 DP1. Konstrukce se skládá ze zesíleného vnitřního jáklového rámu s dvěma plášti z pozinkovaného plechu o tloušťce 1 – 2 mm, vyplněné protipožární výplní a celoplošným zateplením např. minerální vatou. Pancéřová táhla rozvory křídlo zavírají do podlahy a do nadpraží zárubně. Zátěžový závěs a trny zajišťující vysokou bezpečnost proti vysazení dveří viz obr. 8.



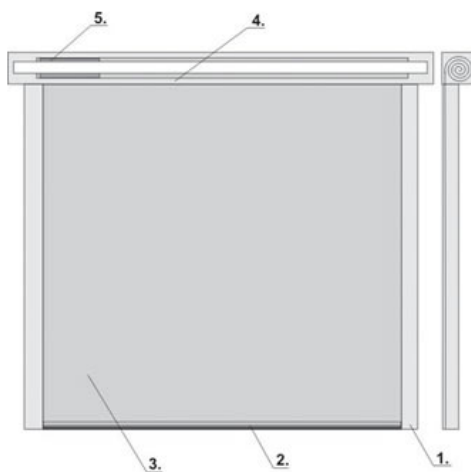
Obrázek 8: Bezpečnostní ocelové dveře RC3 (4)

Prosklené sestavy splňují normu požární odolnosti EL 15-90 DP1 a EW 15-90 DP1. Rám vyplňuje bezpečností vrstvené čiré požární sklo, které může být jednoduché nebo dvojitě. V případě dvojskla, tvoří druhé sklo např. bezpečnostní Stratobel. Povrch dveří může být ošetřen práškovou vypalovací barvou dle odstínů RAL. V nadstandardním požadavku lze rám obložit mosazí nebo nerezí. Tyto dveře (obrázek 9) jsou určeny zejména do občanské zástavby ve firmách, jako jsou dveře od kanceláří atd. (4).



Obrázek 9: Prosklené dveře ADORY (4)

Protipožární roletový uzávěr (obr. 10) se v případě spuštění alarmového systému automaticky uzavře, a oddělí tak budovu na bezpečné sektory, čímž zabrání rozšíření požáru. Uzávěr je řízen řídicí jednotkou, která je nainstalována na poplašný systém nebo speciální snímač či senzor kouře/teploty. Za běžného stavu jsou vrata vytažena v horní úvratí a jsou sbalena v nábalu. Při spuštění alarmu se vrata aktivují a řídicí jednotka dá signál k uzavření vrat. Pro případ výpadku elektrické energie jsou vrata připojena k záložnímu zdroji, který v případě ohrožení vrata zavře. Roletový systém splňuje normy EW 15 DP1, EW 30 DP1 – C1 (až do 12 m). Lze přidat vodní skrápění, které navýší požární odolnost na EW 45 DP1 – C1 až EW 120 DP1 – C1 (5).



1. VODICÍ LIŠTY
2. UZAVÍRACÍ SPODNÍ HRANA
3. TEXTILNÍ NEHOŘLAVÁ CLONA
4. NAVÍJECÍ BUBEN
5. POHON

Obrázek 10: Protipožární roletový uzávěr (5)

Požární vrata rolovací (obr. 11) mají povrch z ocelových pozinkovaných lamel a splňují požární odolnost EW 90, EW 60, EW 45, EW 30 DP1. Konstrukce lamel je ze dvoustěnných 1 mm tlustých ocelových plechů s pozinkovou úpravou a jsou vyplněné minerální vatou. Ve spodu jsou zakončeny dvěma L profily z ocelového pozinkovaného plechu a na ně je připevněn C profil (23x8 mm), ve kterém je zasunuté gumové těsnění. Vodící lišty jsou z pozinkovaných ocelových profilů o tloušťce 2,5 mm (82x110 mm) s obložením odolným proti opotřebení. Navinovací ocelový buben je vybaven držáky pro montáž elektrického motoru se zajištěním proti spadnutí vrat. Poháněn může být nástrčným pohonem s integrovanou pojistkou proti pádu vrat nebo řetězovým pohonem s přídatnou pojistkou proti pádu vrat. (5)



*Obrázek 11: Požární vrata rolovací (5)*

Požární vrata sekční (obr. 12) splňují požární odolnost třídy EI – C 15 až 30 DP3 a EW – C 15 – 60 DP3. Izolační obložení vrat se skládá ze speciálních zámků s labyrintem a zpěňujícím profilem, který se při kontaktu s plamenem roztáhne a vyplní dutiny okolo lemu vrat, čímž zabrání prostupu kouře do jiného prostoru. Povrchovou úpravu lze provést v jakémkoli provedení z řady RAL, ve standardním provedení je povrchová úprava pozink. Vrata se pohánějí elektrickým motorem. (5)



Obrázek 12: Požární vrata sekční (5)

## 1.7 Testování požárních uzávěrů

Testování požárních uzávěrů se provádí podle ČSN EN 1634-1,2,3, které stanovují podmínky testování a vyhodnocování výsledků. ČSN EN 1634 má tyto části: Část 1: Požární dveře a uzávěry otvorů, Část 2: Kování požárních dveří a Část 3: Kouřotěsné dveře. Tato první část normy stanoví metodu pro určení požární odolnosti dále uvedených dveřních a uzávěrových sestav určených k osazení do otvorů ve svislých dělicích prvcích: otočné dveře se závěsy nebo čepy; vodorovné a svislé posuvné dveře včetně vícedílných; jednoplášťové ocelové skládací dveře (neizolované); ostatní posuvné a skládací dveře; vyklápěcí dveře; svinovací rolety. Tato evropská norma navazuje na (ČSN) EN 1363-1 (73 0851). Dveře zkoušené podle této normy mohou být uznávány pro určitá použití dveří výtahových šachet. Norma neplatí pro zkoušení požárních klapek a uzávěrů pásových a kolejových přepravních systémů. Norma nestanovuje žádné požadavky na podmiňující mechanické zkoušení nebo funkční trvanlivost, které jsou předmětem příslušných norem výrobců. Normalizovaná metoda může být analogicky použita i pro stanovení požární odolnosti nenosných vodorovných uzávěrů. (6)

Česká norma ČSN EN 1363-1 „Zkoušení požární odolnosti – část 1: Základní požadavky“ přesně definuje zařízení a postup metody zkoušení požární odolnosti.

Zkušební pec je na kapalná nebo plynná paliva a musí být schopna ohřívat svislé nebo vodorovné dělicí prvky z jedné strany, ohřívat sloupy ze všech stran, ohřívat stěny z více než jedné strany a

ohřívat nosníky ze tří nebo čtyř stran podle požadovaného umístění. Pro speciální případy lze požadovat speciální typy pecí.

Vyzdívká pece musí být z materiálu, který má objemovou hmotnost menší než  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$  a nejmenší tloušťku 50 mm a zahrnovat alespoň 70 % vnitřně ohřívaného povrchu pece.

Pece musí být zkonstruovány tak, aby byly schopny pojmout i sestavy zkoušených materiálů za předpokladu, že budou splněny požadavky pro každý jednotlivý prvek.

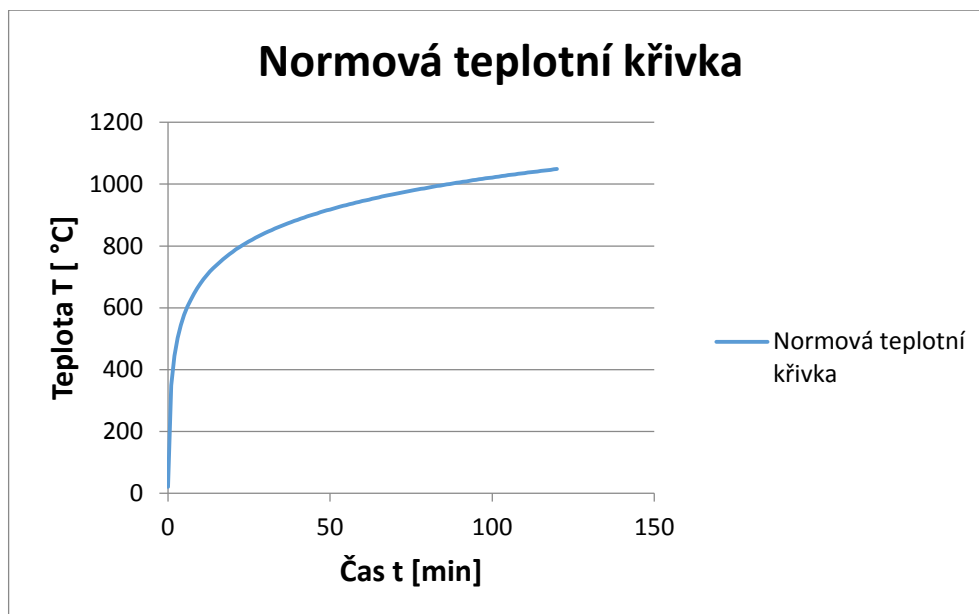
Zatěžovací zařízení lze aplikovat hydraulické, mechanické nebo pomocí závaží. Musí být schopné napodobovat podmínky rovnoměrného zatížení, bodového zatížení, soustředěného zatížení, osového zatížení nebo excentrického zatížení podle konkrétní zkušební konstrukce. Musí udržovat konstantní zatížení ( $\pm 5 \%$  z požadované hodnoty) po celou dobu testování nebo do porušení nosnosti vzorku.

Zařízení nesmí bránit ani omezovat vstup tepla materiálem nebo omezovat použité izolační krytky termočlánků. Dále nesmí bránit měření povrchové teploty nebo deformaci a musí umožňovat pozorování celé plochy testovaného vzorku.

Zkušební rámy a jejich použití záleží na testovaném materiálu, protože různé typy vzorků vyžadují různou tuhost rámu. Chování zkušebních rámu se posuzuje podle roztažné síly v rámu v polovině rozpětí mezi dvěma protilehlými prvky a měřením zvětšení vnitřního rozměru. Toto zvětšení nesmí přesáhnout 5 mm při síle 25 kN. Toto posouzení se provádí v obou směrech rámu.

Teplota v peci se monitoruje a řídí tak, aby platil vztah:

$T = 345 \log(8t + 1) + 20$  Na grafu 1 je ukázán průběh teploty v měřené části pece v závislosti na čase.



Graf 1: Normová teplotní křivka

kde je

T průměrná teplota v peci ve stupních Celsia  
t čas v minutách

Z grafu 1 je zřejmý velký nárůst počáteční teploty, protože na začátku testování jsou zapnuty všechny plynové hořáky a tím naroste teplota během 2-3 minut na 800 °C, kde v tento moment teplota pomalu začne stagnovat a roste pozvolněji. Teplota je řízena vhodným způsobem, např. elektronicky regulovanými ventily plynu, popř. vzduchových klapek.

Odchylky v ploše křivky průměrné teploty, vycházející z měření specifikovaných termočlánků v peci v závislosti na čase, z plochy normové teplotní křivky musí být v rozmezí:

- a) 15 % pro  $5 < t \leq 10$ ;
- b)  $(15 - 0,5(t-10))$  % pro  $10 < t \leq 30$ ;
- c)  $(5 - 0,083(t-30))$  % pro  $30 < t \leq 60$ ;
- d) 2,5 % pro  $t > 60$ ;

kde

$$d_e = \frac{A - A_s}{A_s} * 100$$

kde je

$d_e$  procentní odchylka  
A plocha pod skutečnou teplotní křivkou v peci  
 $A_s$  plocha pod normovou teplotní křivkou  
t čas v minutách

Všechny plochy se spočítají sumarizací ploch v intervalech, které nepřesahují 1 minutu a počítají se od nuly. V kterékoliv době po prvních 10 minutách se teplota nesmí lišit od dané křivky v grafu o více, než 100 K. U rychle hořícího vzorku lze akceptovat zvýšení teploty v peci a odchýlení se od dané křivky pod podmínkou, že je to opravdu způsobené hořením materiálu.

Zkušební vzorek je požadován ve své reálné velikosti. V případě, že nelze vyzkoušet vzorek v reálné velikosti, musí být v souladu se specifickou zkušební metodou.

Dělicí prvky mohou být určeny pro jednostranné použití, v tom případě je testována pouze jedna strana, která bude vystavena požáru. U oboustranných dělicích prvků, pokud nejsou symetrické, se zkouší slabší strana vzorku.

Provedení musí reprezentovat včetně tolerancí a montáže, vzorek tak jak bude vypadat v reálných podmínkách. Objednavatel zkoušky musí zaručit, že testovaný vzorek bude vypadat stejně jako provedení v praxi.

Počátek zkoušky začíná tím, že se 5 minut před testem změří teplota povrchu, a ta musí být ze všech termočlánků stejná. Počáteční vnitřní teplota, pokud se zjišťuje, a teplota na neohřívané straně vzorku musí být v rozmezí 10 °C do 40 °C a nesmí se lišit od okolní teploty o více než 5 °C.

Před zahájením zkoušky musí být teplota v peci menší než 50 °C. Zkouška začíná v momentě, kdy jsou zažehnuty hořáky, a program začne sledovat teplotní křivku. Od tohoto okamžiku se měří průběžný čas, přičemž všechny pozorovací přístroje jsou v provozu a pec musí být řízena tak, aby byla v souladu s teplotními podmínkami.

Teploty ze všech termočlánků se zaznamenávají po celou dobu ohřívání v intervalech nepřesahujících 1 minutu.

Celkové chování se pozoruje během celé zkoušky a zaznamenávají se případné děje, jako jsou např. vývin kouře, tavení, měknutí, odlupování, uhelnatění apod.

Ukončení zkoušky lze z jedné nebo více následujících příčin a to, když je ohrožena bezpečnost personálu, hrozí-li poškození zařízení, pokud jsou dosažena požadovaná kritéria pro ukončení zkoušky nebo případně na žádost objednavatele zkoušky.

Zkouška může dále pokračovat pro případné doplňující informace o chování materiálu. V případě, že zkouška byla ukončena předčasně, je nutné zaznamenat důvod o ukončení. Výsledný čas je zapsán od momentu, kdy byl test ukončen.



Protipožární dveře obsahují certifikát výrobku, kde je vyznačena požární odolnost, typ uzávěru, výrobce, místo výroby atd. Obrázek 13 ukazuje testování protipožárních dveří v reálných podmínkách, kdy jsou nainstalována teplotní čidla po obou stranách testovaných dveří, přičemž data jsou odeslána do sběrného počítače. Zároveň je měřen čas, kdy dojde k nějaké větší deformaci dveří např. prohoření dveří, vypadnutí dveří z pantů, zkroucení nebo jeden z dalších uvedených parametrů viz kapitola 3 “Ukončení zkoušky”.



Obrázek 13: Probíhající test protipožárních dveří (7)

## 1.8 Materiály pro protipožární ochranu

Hlavní rozdíl mezi těmito typy materiálů je v jejich složení a to, zejména v charakteru struktury, která je buď vláknenná, nebo nevláknenná. U vláknenných materiálů jsou hlavní stavební jednotkou vlákna a není podstatné, zda přírodní nebo umělá. Bývají často spojena mechanicky nebo organickými pojivy. V případě nevláknenných materiálů jsou použity nehořlavé materiály, které jsou slisované pod vysokou teplotou a tlakem nebo spojeny pojivem.

### 1.8.1 Nevláknenné nehořlavé materiály

*Perlit* je ryolitová vulkanická sklovina, která vznikne okamžitým zchlazením ve vodném prostředí. Typická vlastnost tohoto materiálu je schopnost až 5krát zvětšit svůj objem následkem žíhání při teplotě 850-1150 °C. Tím vzniká expandovaný perlit. Skládá se z alkalických látek a kyslíčků

železa a titanu. Perlit má zrnitou strukturu, která se rozděluje do třech skupin (EP 100, EP 150, EP 180). Má velmi dobré tepelné a akustické izolační vlastnosti při nízké hmotnosti. Je nehořlavý a odolný proti mikrobům a plísním. Lze ho použít při teplotách od -200 °C do 900 °C. Součinitel tepelné vodivosti je od 0,040 do 0,049 W.mK<sup>-1</sup> dle zrnitosti (8).

Keramzit je umělý materiál, který se nevyskytuje v přírodě, ale získává se ze zvláštního druhu jílu výrobou za vysokých teplot okolo 1100 °C v rotačních pecích. Díky rotační peci získává keramzit tvar koule a dobré mechanické vlastnosti s nízkou objemovou hmotností od 500 do 1500 kg.m<sup>-3</sup> a malou tepelnou vodivostí od 0,09 W.mK<sup>-1</sup>. Jedná se o nehořlavý, mrazuvzdorný materiál s dobrými izolačními a filtračními schopnostmi (9).

Zeolit je hydratovaný krystalický alumosilikát alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Zeolit má prostorově uspořádané kanálky na atomové úrovni, které jsou konstantních rozměrů. V těchto kanálcích se zachytávají tuhé, kapalné nebo plynové částice. Díky mikrostruktuře má dobré izolační a akustické vlastnosti. Zeolit je nehořlavý materiál s nízkou tepelnou vodivostí od 0,2 W.mK<sup>-1</sup> a objemovou hmotností od 1100 kg.m<sup>-3</sup> (10).

Grenamat AL je složen z expandovaného vermikulitu a anorganického pojiva, které neobsahuje minerální, skleněná ani azbestová vlákna. Je ekologicky nezávadný a odolává vysokým teplotám až do 1200 °C. Má velmi dobré tepelné a zvukově izolační vlastnosti. Reakce na oheň bez povrchové úpravy splňuje normu ČSN EN 1350-1, třídy A1 a s úpravou povrchu CPL nebo dýhou splňuje třídu A2 – s1, d0. Je snadno opracovatelný běžnými dřevoobráběcími nástroji. Používá se k ochraně stavebních konstrukcí před požárem. Objemová hmotnost je 400-800 kg.m<sup>-3</sup> (11).



Obrázek 14: Grenamat AL (11)

Grenaboard je vyroben z expandovaného vermikulitu a anorganického pojiva. Je velmi lehký, pevný, z obou stran je potažen papírem. Splňuje certifikát pro zvýšení požární odolnosti na stropní konstrukce s odolností až 180 minut. Objemová hmotnost je 480 kg.m<sup>-3</sup>. Podle normy splňuje bezpečnostní třídu A1 a index šíření plamene 26,80 mm.min<sup>-1</sup>. Tepelná vodivost je 0,17 W.mK<sup>-1</sup> při 20 °C (12).



Obrázek 15: Grenaboard (12)

Grenaisol je složen z expandovaného vermikulitu a speciálního anorganického pojiva, který odolává vysokým teplotám do 1250 °C a tepelným šokům. Je zdravotně nezávadný a neobsahuje skleněná, minerální ani azbestová vlákna. Je dostatečně pevný, má velkou odolnost s vysokým

elektrickým odporem a nízkou tepelnou vodivostí  $0,152 \text{ W}\cdot\text{mK}^{-1}$  při  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $0,211 \text{ W}\cdot\text{mK}^{-1}$  při  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Splňuje požární odolnost třídy A1 s objemovou hustotou  $430 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (13).



Geopolymer se skládá z bezcementového betonu, který je spojen úletovým popílkem. Tento materiál je zajímavý tím, že se při jeho výrobě využívají odpadní materiály, jako jsou například struska, metakaolin nebo drobný skleněný odpad. Hlavní výhodou je snižování ekologické zátěže na životní prostředí ve využívání odpadních materiálů. Díky tomu je příznivá cena vstupních materiálů, která je podstatně nižší než u klasických betonových pojiv (14).



Obrázek 16: Grenaisol (13)

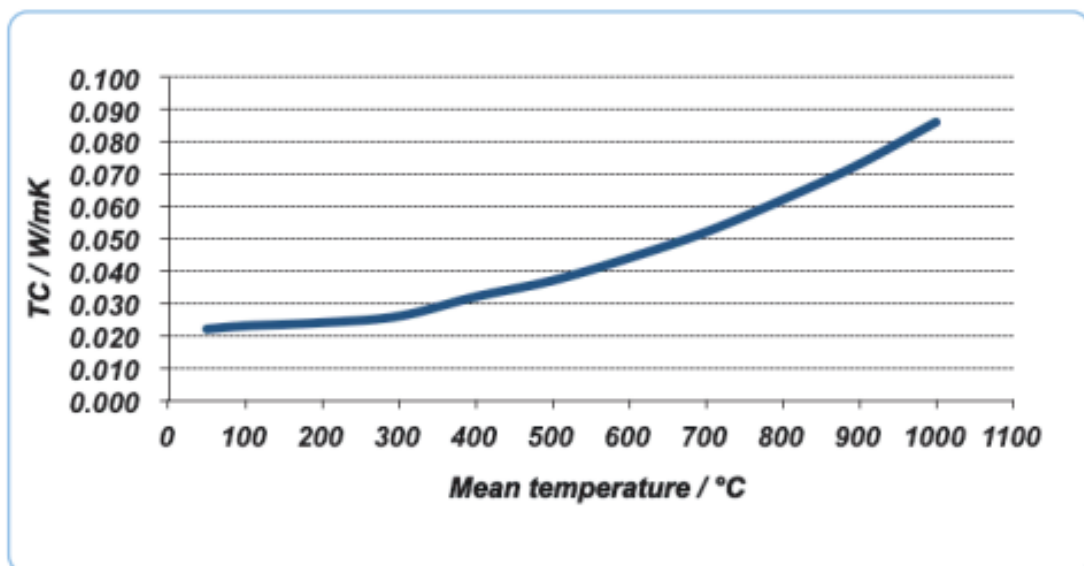
Obrázek 17: Geopolymer (14)

WDS® High je izolační materiál, který je mikroporézni a má extrémně nízkou tepelnou vodivostí  $0,022 \text{ W}\cdot\text{mK}^{-1}$  při  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $0,060 \text{ W}\cdot\text{mK}^{-1}$  při  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Objemová hustota materiálu je  $250\text{--}310 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Skládá se z anorganických silikátů a hlavní složkou je pyrogenní oxid křemičitý. Tabulka 4 ukazuje závislost tepelné vodivosti na teplotě. (15)



Obrázek 18: WDS® High (15)

Tabulka 4: Křivka tepelné vodivosti - WDS® High (15)



## 1.8.2 Vláknenné nehořlavé materiály

FireMaster® 350Board se skládá z bio-persistentních alkalických silikátových vláken, žáruvzdorného plniva a malého množství organických pojiv. Tato deska je doporučena pro aplikaci protipožárních lehkých panelů. Má výborné tepelné vlastnosti s vysokou hustotou 350 kg.m<sup>-3</sup>. Rozměr desky může být 1200x1000 mm s tloušťkou 13, 20, 25, 40, 50 mm. Tepelná vodivost je 0,07 W.mK<sup>-1</sup> při 200 °C a 0,12 W.mK<sup>-1</sup> při 600 °C (16).



Obrázek 19: FireMaster® 350Board (16)

FireMaster® Marine Plus Blanket je vysoce lehký izolační materiál speciálně navržený pro protipožární aplikace. Je velmi flexibilní a lze ho formátovat klasickými nůžkami. Jeho objemová hmotnost je 48-128 kg.m<sup>-3</sup>. Tepelná vodivost je závislá na objemové hmotnosti kde při 64 kg.m<sup>-3</sup> má tepelnou vodivost 0,06 W.mK<sup>-1</sup> při 200 °C a 0,38 W.mK<sup>-1</sup> při 1000 °C a při 128 kg.m<sup>-3</sup> má 0,04 W.mK<sup>-1</sup> při 200 °C a 0,25 W.mK<sup>-1</sup> při 1000 °C viz tab. 5 (16).



Obrázek 20: FireMaster® Marine Plus Blanket (16)

Tabulka 5: Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti - FireMaster® Marine Plus Blanket (16)

Objemová hustota	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
64 kg.m <sup>-3</sup>	0,06	0,11	0,17	0,26	0,38
96 kg.m <sup>-3</sup>	0,05	0,10	0,15	0,21	0,29
128 kg.m <sup>-3</sup>	0,04	0,09	0,13	0,19	0,25

Isover FireProtect 150 se skládá z minerálních vláken a používá se jako výplně pro mnoho aplikací. Pro jeho snadné použití a malé váze má velké uplatnění např. jako výplně protipožárních dveří nebo jako ucpávky v konstrukcích, které oddělují požární úseky. Má vysokou teplotní odolnost až do 700 °C, velmi dobré izolační schopnosti a pohltivost zvuku. Je vodoodpudivý a ekologický s hygienickou nezávadností. Při teplotě 100 °C je tepelná vodivost



Obrázek 21: Isover FireProtection 150 (17)

0,047 W.mK<sup>-1</sup> a při 700 °C je 0,192 W.mK<sup>-1</sup>. Objemová hmotnost je výrobcem uváděna na 165 kg.m<sup>-3</sup> a reakce na oheň třídy A1 (17)

## 2. Teoretická část

Při prostupu tepla materiálem dochází k následujícím dějům, které jsou rozepsány v kapitolách níže. Při hledání optimálního materiálu pro výplň protipožárních dveří, je zapotřebí tyto jevy znát a při návrhu zohledňovat.

### 2.1 Charakteristika výměny tepelné energie

Tepelná energie je část vnitřní energie, kterou těleso vymění při kontaktu s jiným tělesem o jiné tepelné energii, což lze nazvat tepelnou výměnou. Tepelnou energii neboli teplo nelze sledovat nebo měřit, jelikož se odehrávají chaotické děje. Jednotky tepla jsou shodné s jednotkami energie a práce. Měřením tepla se zabývá kalorimetrie a měří se kalorimetrem.

Tepelný izolant je materiál, který má špatnou tepelnou vodivost. Veličina, díky které lze porovnávat materiály podle tepelné vodivosti, se nazývá součinitel tepelné vodivosti. Tepelný izolant má nízký tepelný součinitel. Plyny patří mezi nejlepší tepelné izolanty, které nepřenášejí teplo vedením ale prouděním. Z pevných látek jsou nejlepšími tepelnými izolanty minerální vlny, peří, srsti atd., a to v důsledku vysokého obsahu vzduchu uvnitř látky. Z ostatních látek, které v sobě neuzavírají vzduch, jsou dobrými tepelnými izolanty plasty, jako jsou polystyren, polyuretan a řada dalších. Tepelné izolanty se používají k zabránění předávání tepla do okolí (18).

Čím větší tepelný odpor, tím menší prostup tepla. U materiálů se značí součinitel tepelné vodivosti symbolem  $\lambda$ .  $\lambda$  uvádí, kolik tepla prostoupí daným materiálem za jednotku času. Platí, že čím je  $\lambda$  větší, tím je tepelná izolace lepší (3).

#### 2.1.1 Vedení - kondukce

Kondukcí lze dělit na ustálenou (stacionární), kdy se teplota v určitém místě s časem nemění a neustálenou (nestacionární), kdy se teplota v určitém místě mění s časem.

Stacionární vedení tepla – jestliže těleso nemá stejnou teplotu ve všech místech, teploty se vyrovnávají v důsledku kinetických energií molekul vzduchu. Tento děj, při kterém se teploty v tělese vyrovnávají díky působení molekul, se nazývá vedení tepla.

Základní zákon vedení tepla – Fourierův zákon

$$q = -\lambda * \frac{dt}{dx} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (1)$$

V rovnici (1) veličina  $q$  vyjadřuje tepelné množství, které projde jednotkou plochy, která je kolmá na směr proudění za jednotku času a nazývá se hustota tepelného toku. Tepelný tok je vyjádřen v  $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$ .

Teplotní gradient (2) je poměr  $dt / dx$  a udává elementární přírůstek teploty  $dt$  k elementární vzdálenosti  $dx$  mezi izotermními plochami (izotermní plocha je geometrické místo bodů o stejné teplotě) ve směru rovnováhy.

$$\text{grad } t = \frac{dt}{dx} \quad [\text{K}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (2)$$

Míru změny teploty v daném místě značí teplotní gradient. Ten se ve směru poklesu teploty  $t$  značí se záporným znaménkem a je nazýván teplotním spádem ( $-dt / dx$ ). V rovnici (1) záporné znaménko vyplývá z proudění tepelného toku proti směru teplotního gradientu. Vztah (3) udává množství prošlého tepla za čas.

$$Q = \vartheta * A = \lambda * \frac{dt}{dx} * A \quad (3)$$

kde  $A$  je plocha  $[\text{m}^2]$

### 2.1.2 Sálání tepla – radiace

Radiace je fyzikální proces, kdy materiál emituje energii do prostoru ve formě elektromagnetického záření. Radiace se může díky proudění šířit i ve vakuu narozdíl od kondukce a konvekce. Každé těleso vyzařuje elektromagnetické vlnění o různé vlnové délce. Existují různé typy záření, přičemž v šíření tepla má největší význam infračervené záření, jelikož tělesa jsou ho schopna pohlcovat a tuto energii přeměnit na teplo. Vlnová délka infra záření je  $0,8 - 360 \mu\text{m}$ . Lze toto záření taktéž nazývat tepelným zářením nebo sáláním. Energie radiace závisí na několika faktorech a to teplota tělesa, která je popsána Planckovým vyzařovacím zákonem. Barva povrchu, kde černá barva vyzařuje největší množství tepla a naopak stříbrné lesklé povrchy vyzařují nejméně tepelné energie. Obsah plochy vyzařujícího tělesa je přímo úměrný vyzařované energii radiace. Často se setkáváme s případy výměny tepla sáláním mezi rovnoběžnými tělesy. Dá se tedy předpokládat, že teplo, které vyzáří jedno těleso pohltí druhé těleso, aniž by část tepla unikla do okolí. Tímto dějem se zejména zabývají v oblasti požární bezpečnosti, protože při požáru dochází k sálání tepla z jednoho materiálu na druhý a tím dochází k zahřívání druhého tělesa a hrozbě přenesení požáru. Zdroj (18) uvádí, že takto vzniká většina požárů. (18) (19)

### 2.1.3 Proudění - konvekce

Jeden ze způsobů šíření tepla je proudění, které probíhá v kapalinách nebo plynech. Částice s větší energií jsou vyzářeny do prostoru a materiály s menší energií tyto částice přijímají. Tím dochází ke zvýšení energie v materiálu. Proudění tepla je rychlejší než vedení tepla. Při samovolném tepelném proudění stoupá teplo vzhůru, protože teplejší částice plynu mají menší hustotu. Proudění lze dělit na volné (přirozené), kde se vzduch pohybuje mezi rozdílnými měrnými hustotami vzduchu nebo na nucené (umělé), kde je zapotřebí vnější síla například použití ventilátoru. Obecně lze specifikovat přirozené proudění na laminární, kde vzduch proudí ve vrstvě rovnoběžně se směrem proudu a turbulentní proudění, kde dochází k přechodu vzduchu z jedné vrstvy do druhé. V reálných podmínkách dochází vždy k více dějům najednou. V roce 1900 bylo vysvětleno přesnější přenos energie mezi tělesy díky kvantové hypotéze od Max Planck. Stefan-Boltzmannovým zákonem (4) je vysvětleno vyzařování těles, kde se popisuje  $Q$  vyzařované absolutně černým tělesem o dané teplotě  $T$  na plochu  $S$  za jednotku času.

$$\frac{dQ}{dt} = S\sigma T^4 \quad (4)$$

Kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  (Stefan-Boltzmannova konstanta) (18) (19).

### 2.1.4 Tepelná vodivost

Každý materiál má schopnost vést teplo a tepelná vodivost představuje rychlost za jakou dobu se teplo přenese z jedné strany materiálu na druhou. Tepelnou vodivost charakterizuje součinitel tepelné vodivosti, který se běžně dá najít v tabulkách, případně zjistit od výrobce. Pro vnitřní konstrukce, kde nedochází k velké kondenzaci vodní páry, lze použít charakteristickou tepelnou vodivost, kdežto u vnějších konstrukcí, kde je větší kondenzace vodní páry, se musí provést výpočet podle normy ČSN 730540-3 nebo ČSN EN ISO 10456. Velký problém u výpočtu je, že výrobci neuvádí potřebné údaje, proto nezbývá, než odhadem zvýšit známou tepelnou vodivost a zohlednit vliv okolního prostředí. Pro určení tepelné vodivosti je nutné znát hustotu tepelného toku a teplotní gradient. Obecně lze říci, že pro měření tepelné vodivosti existuje velké množství měřících metod. Ve většině případů se však daná metoda musí přizpůsobit na konkrétní model a situaci. Během měření je použito velmi složitých soustav, které mají za cíl co nejvíce eliminovat rušivé zdroje. (18) (19)

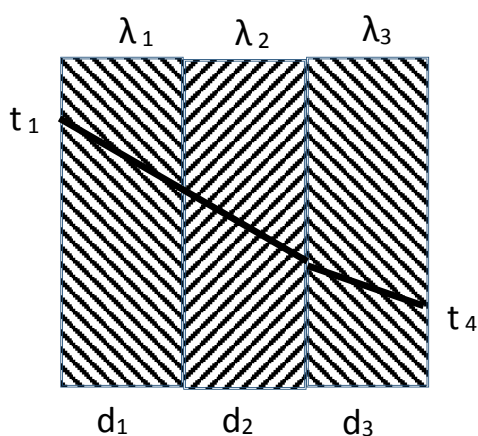


## 2.1.5 Prostup tepla vrstvenými materiály

U prostupu tepla vrstvenými materiály závisí na složení dané složené skladby. V případě, kdy dvě vnější vrstvy jsou vyplněny vzduchovou mezerou, probíhá komplexní přenos tepla kondukcí, radiací i konvekcí. Další příklad vrstvených materiálů, může být skládané složení z několika typů materiálů bez vzduchové mezery, kde první může být nehořlavý materiál a konduktce probíhá rychleji, ale druhý materiál pohlcuje tepelnou energii díky dobrým izolačním vlastnostem, který tepelný prostup zpomalují. V tomto případě lze dělit na symetrickou skladbu složení, které se skládá ze 3 vrstev, nebo na asymetrické složení, které se může skládat pouze ze dvou vrstev. Při tomto typu složení vrstvených materiálů, dochází pouze ke kondukcí tepla materiálem.

Pro výpočet lze vycházet z výpočtu jednoduché rovinné stěny. Jako příklad složené rovinné stěny lze uvést obezdívky křbových kamen, tato zařízení mají okolo sebe nejen nosné vrstvy materiálů, ale také tepelné izolace.

Složená stěna se skládá ze 3 různorodých vrstev (obr. 22). Součinitelé tepelné vodivosti jsou  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  a povrchové teploty  $t_1$ ,  $t_4$  jsou dány. Teploty v místě dotyku ploch  $t_2$ ,  $t_3$  jednotlivých vrstev jsou neznámé. Mají však společnou hodnotu pro vrstvy, které se dotýkají. To platí pouze za předpokladu těsného přiléhání vrstev na sebe. Při stacionárním vedení tepla stěnou je hustota tepelného toku stálá a stejná pro všechny vrstvy. Proto musí platit (5):



Obrázek 22: Průběh teploty složenou rovinnou stěnou

$$q = \frac{\lambda_1}{d_1} * (t_1 - t_2) = \frac{\lambda_2}{d_2} * (t_2 - t_3) = \frac{\lambda_3}{d_3} * (t_3 - t_4) \quad (5)$$

Z těchto rovnic lze stanovit teplotní rozdíly v jednotlivých vrstvách (6):

$$(t_1 - t_2) = q * \frac{d_1}{\lambda_1}; (t_2 - t_3) = q * \frac{d_2}{\lambda_2}; (t_3 - t_4) = q * \frac{d_3}{\lambda_3} \quad (6)$$

Součet teplotních spádů v jednotlivých vrstvách stanoví úhrnný teplotní rozdíl. Sečtením rovnic (3) se dostane:

$$t_1 - t_4 = q * \left( \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right) = q * (R_1 + R_2 + R_3) \quad (7)$$

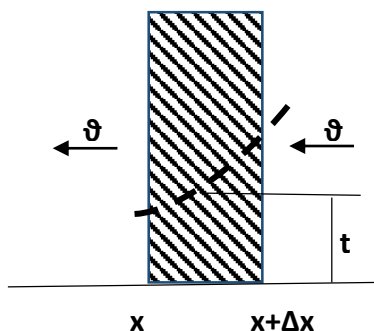
Hustota tepelného toku příslušná tomuto rozdílu je dána vztahem:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{t_1 - t_4}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{t_1 - t_4}{\sum_{i=1}^3 R_i} \quad (8)$$

Pro stěnu složenou z  $n$  vrstev je analogicky:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_n} \quad (9)$$

Často se v praxi stává, že teplota v určitém místě tělesa se s časem mění – nestacionární děj. V případě tuhého tělesa a vedení tepla pouze ve směru  $x$ , lze uvažovat fyzikální parametry za konstanty.

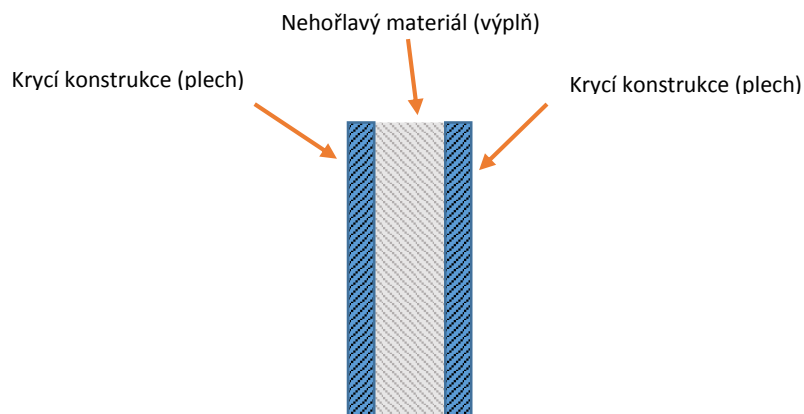


Obrázek 23: Průběh teploty při nestacionárním chování vedení tepla

Jak ukazuje obrázek 23 průběh teploty není přímkový a pokud se uvažuje vyříznuté těleso o tloušťce  $\Delta x$  na obrázku 23 v místě  $x$  je hustota tepelného toku  $q$ , která je obecně odlišná od tepelného toku, které vystupuje v místě  $x + \Delta x$  do desky. Parciální diferenciální rovnicí lze popsat nestacionární chování vedení tepla s okrajovými podmínkami. Tato diferenciální rovnice je dosti složitá na výpočet po matematické stránce, a proto se dříve prováděla řešení s pomocí diagramů pro daný případ. V dnešní době se pro výpočty používá výpočetní technika. (18) (19)

### 3. Experimentální část

Předmětem experimentu je ověřování vybraných nehořlavých materiálů v laboratoři simulující extrémní hořlavé podmínky. K dispozici jsou různé druhy vzorků pro ověření, zda jsou vhodné pro použití jako výplně do protipožárních vrat a dveří. Jedná se o zkoušku požární odolnosti, kde se měří rychlost prostupu tepla skrz materiál. Nejprve je změřena povrchová teplota materiálu a stopuje se čas, kdy na povrchu měřeného materiálu bude předem stanovená teplota. Poté se čas zapíše a výsledky vyhodnotí. Hledá se nejvhodnější materiál, který bude mít dobré izolační schopnosti a zároveň cenově přijatelný. Testované vzorky nesmí produkovat kouř, čadit nebo degradovat. Měly by vydržet minimálně 30 minut při teplotě 1200 °C, být snadno opracovatelné, aby se mohly použít jako výplň do dveří a vrat. Vzhledem k tomu, že v experimentu se používají materiály vrstvené a i samotná skladba dveří představuje vrstvený materiál (viz obr. 24), je potřeba uvést postupy výpočtu tepelné vodivosti pro materiály podobného charakteru.



Obrázek 24: Skladba dveří jako vrstvený materiál

### 3.1 Použitá zařízení

Plynová pec (obr. 25) obsahuje 2 plynové trysky na propan butan, které jsou nasměrovány z boku pece proti sobě. Před testováním se pec vyhřeje na 900 °C a poté se začíná měřit čas prostupu tepla skrz testovaný materiál. Teplota se sleduje pomocí termočlánků, které jsou upevněny na vnitřní i vnější straně vzorku a ve štěrbině mezi lamelami, data z termočlánků jsou odesílána do počítače. Pro kontrolní měření teploty se používá infračervený teploměr s rozsahem do 350 °C.



Obrázek 25: Testovací plynová pec

Muflovací pec (obr. 26) je obložená šamotovými cihlami, které akumulují teplo a udržují větší stabilitu vnitřní teploty. Jedná se o klasické odporové vytápění pece, kde lze pomocí termostatu udržovat maximální teplotu 1200 °C. Při testování se využívá přirozeného proudění tepla vzhůru, jen se pec musí otočit dvířky vzhůru a dvířka odmontovat, materiál je potom položen na horní část pece. Před testováním se pec vyhřeje na 1200 °C, a poté je materiál přiložen na pec a začíná se měřit čas prostupu tepla skrz materiál. Teplota se měří termočlánky, které jsou na vnitřní a vnější straně vzorku a data jsou odesílána přímo do počítače. Pomocí infračerveného teploměru se vnější teplota na povrchu vzorku kontroluje a porovnává s teplotou z termočlánků.



Obrázek 27: CNR Voltcraft IR 260-8S infračervený

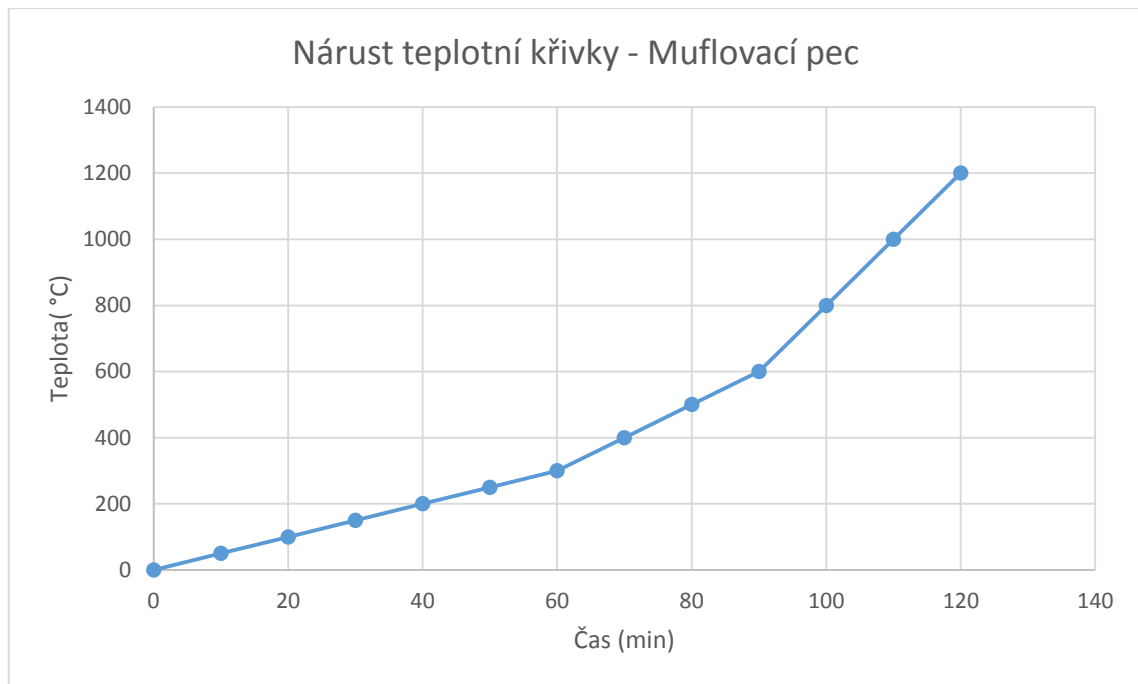
Obrázek 26: Testovací muflovací pec s teplotou 1200 °C

Infračervený teploměr (obr. 27) typu CNR Voltcraft IR 260-8s je vhodný pro bezdotykové měření vysokých teplot do 350 °C. Při měření povrchové teploty, byly na materiálu vyznačeny místa měření, aby výsledky nebyly zkreslené a nedocházelo k odchýlkám měření.

### 3.2 Návrh testovací metody

Protože nebylo možné vycházet z normovaného testovacího postupu z důvodu nefunkčního modelu spalovací komory, byla navržena jiná metodika, která bude popsána níže.

Náhradou testovací metody spalovací komorou, byla muflovací pec, která umožní dosáhnout maximální teploty 1200 °C. Pro testování byla zvolena právě maximální teplota, pro zjištění vlastností testovaných vzorků a pozorování jejich chování při takto vysoké teplotě, protože doba náběhu teploty (viz graf 2) je mnohonásobně delší, než-li je požadavek normy (viz graf 1), byla metoda poupravena. Testování vzorku začne až v momentě, kdy má pec maximální teplotu.



Graf 2: Teplotní nárustová křivka z muflovací pece

Jakmile je pec připravena, změří se povrchová teplota vzorku z vnější strany a vloží se na pec. V ten okamžik začíná měření času prostupu tepla materiálem. K vnější naměřené hodnotě se přičte požadovaných 140 °C. Čas je zastaven v momentě, kdy teplota na vnější straně vzorku dosáhne počáteční změřené teploty zvýšené o 140 °C nebo dochází k čadění, kouření, hoření materiálu a hrozí riziko spuštění požárního alarmu v budově.

### 3.3 Plán experimentu

#### Měření tepelné odolnosti vybraných materiálů

U testovaných materiálů se sledují kromě rychlosti prostupu tepla i ostatní vlastnosti a to jestli materiál nepraská nebo se neodlupuje, případně jiné negativní projevy působící vysoké tepelné energie teploty. Všechny tyto údaje, které byly pozorovány během testování, se zapisují a na závěr budou porovnávány s ostatními materiály, kde se bude hledat optimální materiál s dobrými vlastnostmi a přijatelnou cenovou relací.

#### Návrh vlastní skladby

Možné řešení by také bylo vyrobení protipožárních vrat a testování v reálných podmínkách, jenže testovací laboratoř je na Slovensku, což vzhledem k vzdálenosti je finančně náročné a další

výdaje se musí zakomponovat na výrobu těchto dveří a poté se musí uvážit samotný test, který je v řádu sta tisíců. Proto tato metoda nepřipadá v úvahu po finanční stránce.

### **3.4 Použité materiály**

Pro testování byly dodány tyto materiály, viz Tab. 6. Výrobce některé údaje neuvádí nebo jsou neúplné. Testované vzorky jsou vláknenného a nevláknenného typu spojené různými typy pojiv nebo mechanicky slisované, aby jejich tvar byl stabilní a odolný protipožáru a mechanickým vlivům. Pokud výrobce lambda neuvádí, je to označeno symbolem „---“.

Testované vzorky byly před testováním na 24 hod. ponechány v laboratoři, kde se při teplotě 22 °C a procentuální vlhkosti vzduchu 65 % ustálila jejich teplota. Geopolymer byl 60 minut před testováním předsušen při 105 °C.

Tabulka 6: Hodnoty deklarované výrobcem použitých materiálů pro testování

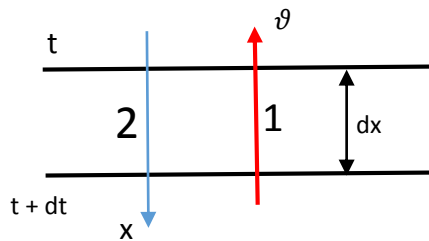
Testovaný vzorek	$\lambda$ při 20 °C (W.mK <sup>-1</sup> )	$\lambda$ při 1000 °C (W.mK <sup>-1</sup> )	Vlastnosti
Vzorek 1 Grenamat AL	0,17	---	Vermikulitová deska Obj. hmotnost: 400 - 800 kg.m <sup>-3</sup> Třída nehořlavosti: A1 Reakce na oheň: A2-s1,dO - nehořlavá Index šíření plamene (bez povrch. úpravy): 0,0 Pevnost v tlaku: 2,95 MPa
Vzorek 2 Grenaboard	0,17	---	Vermikulitová deska s papír. povrchem Obj. hmotnost: 480 kg.m <sup>-3</sup> Třída hořlavosti: A1, nehořlavá Reakce na oheň: A1, nehořlavá Index šíření plamene s povrchem papír: 26,80 Pevnost v tlaku: 2,95 MPa
Vzorek 3 Grenaisol	---	---	Vermikulit + anorganické pojivo Obj. hmotnost: 430 kg.m <sup>-3</sup> Třída hořlavosti: A1, nehořlavá Reakce na oheň: A1, nehořlavá
Vzorek 4 Geopolymer	---	---	Bezcementový beton + úletový popílek
Vzorek 5 WDS®High	---	---	Anorganické silikáty Obj. hmotnost: 250-310 kg.m <sup>-3</sup>
Vzorek 6 FireMaster®350Board	---	---	Biopersistentní alkalické silikátové vlákna Obj. hmotnost: 260 kg.m <sup>-3</sup>
Vzorek 7 FireMaster®Marine Plus Blanket	---	0,38	Nehořlavé vlákna + hliníková fólie Obj. hmotnost: 64 kg.m <sup>-3</sup>
Vzorek 8 Isover FireProtection 150	---	---	Minerální vlákna Obj. hmotnost: 165 kg.m <sup>-3</sup> Reakce na oheň: A1, nehořlavá

### 3.5 Návrh stanovení tepelné vodivosti

Součinitele tepelné vodivosti lze stanovit ze vzorce 11. Známa je tepelná vodivost  $\lambda$ , která je dopočítaná přes interpolaci z dat uvedených výrobcem. Tloušťka testované desky je  $d_x$ . Hodnota  $t + dt$  je známá, protože je to maximální teplota 1200 °C muflovací pece a termostat zajišťuje její konstantní hodnotu. Teplota  $t$  je počáteční teplota vzorku a k ní přičteme 140 °C. Pro získání  $dt$  tedy odečteme tuto teplotu od  $t + dt$ . Po dosažení těchto hodnot získáváme množství tepla  $q$ .



Nyní je známá hodnota množství tepla  $q$  a zpětně lze z ostatních vzorců spočítat přibližnou hodnotu  $\lambda$  dle vzorce (5).



Kde 1 – Směr tepelného toku

2 - Směr tepelného gradientu

Výpočet tepelné vodivosti lze určit výpočtem nazákladě měření. Důvodem, proč bude tento parametr stanovován je, že výrobci jej buď uvádějí pouze při nízké, obvykle blíže nespecifikované teplotě, nebo ho neuvádějí vůbec. Z tohoto důvodu nelze výpočtem ověřit, zda materiál je vhodný pro aplikaci vysoké teploty. Pro materiál, který se má používat pro protipožární ochranu, se však jeví tento parametr jako nezbytný.

Je možný teoretický výpočet hodnoty  $\lambda$ . Použitím wattmetru a spočítáním plochy výhně v peci, což by udávalo množství tepla  $q$ , které projde materiálem. Hodnoty  $dt$  a  $dx$  udávají teplotní gradient. Z těchto údajů by se teoreticky dala vypočítat hodnota  $\lambda$ , jenže hodnota by byla zkreslená z důvodu nereálnosti naměřit přesný výkon v peci na wattmetru. Místo měření výkonu pece, lze použít vzorec (1), kde se vyjádří hodnota  $q$ . Jestliže je známá hodnota  $\lambda$  vybraného materiálu. Tu lze dosadit do vzorce (1) a získat hodnotu  $q$ , která by měla být shodná pro všechny testované vzorky. Tato hodnota bude relevantní, jelikož muflovací pec je dostatečně izolována a dochází v ní k akumulaci tepla a velmi malým tepelným ztrátám. Hodnoty  $dt$ ,  $dx$  a  $A$  jsou známé.

$$q = -\lambda * \text{grad } T \quad (10)$$

$$\text{grad } T = \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

Po získání hodnoty  $q$ , lze vyjádřit ze vzorce (4) hodnotu  $\lambda$ . Po dosazení se získá součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  (11).

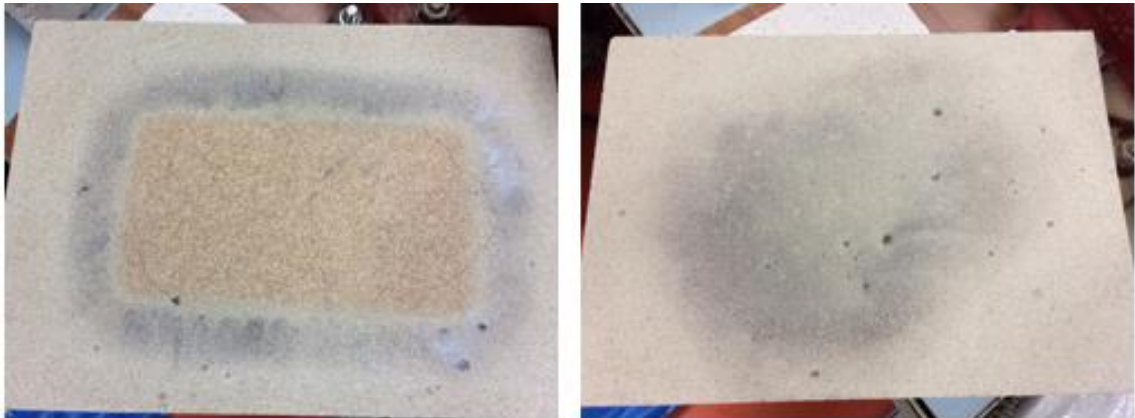
$$\lambda = \frac{d}{tS\Delta T} * Q \quad [\text{W.mK}^{-1}] \quad (11)$$

## 4. Výsledky zkoušek požární odolnosti testovaných materiálů

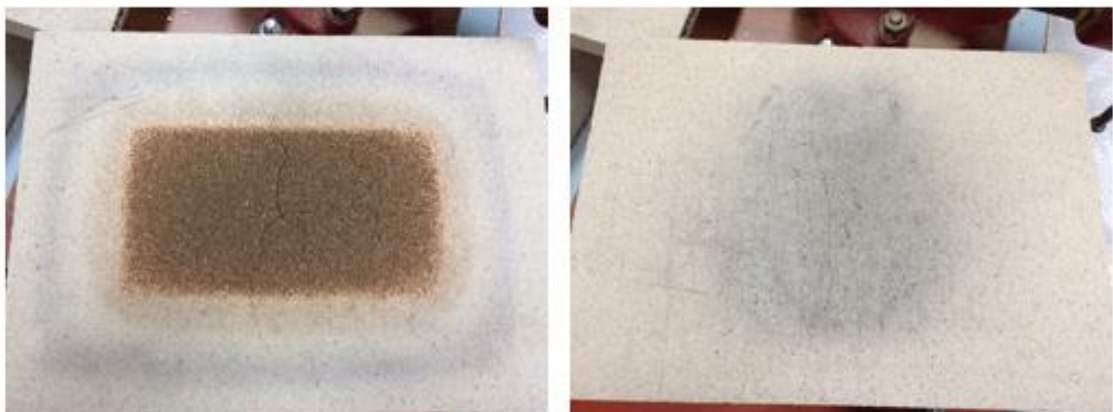
V následujících kapitolách lze najít všechny naměřené časy z testování a celkový popis průběhu měření. Jaké vlastnosti a chování vzorky prokázaly při testování za vysoké teploty a grafické zpracování pro souhrn všech vzorků s naměřenými časy.

### 4.1. Výsledky zkoušek požární odolnosti nevláknenných materiálů

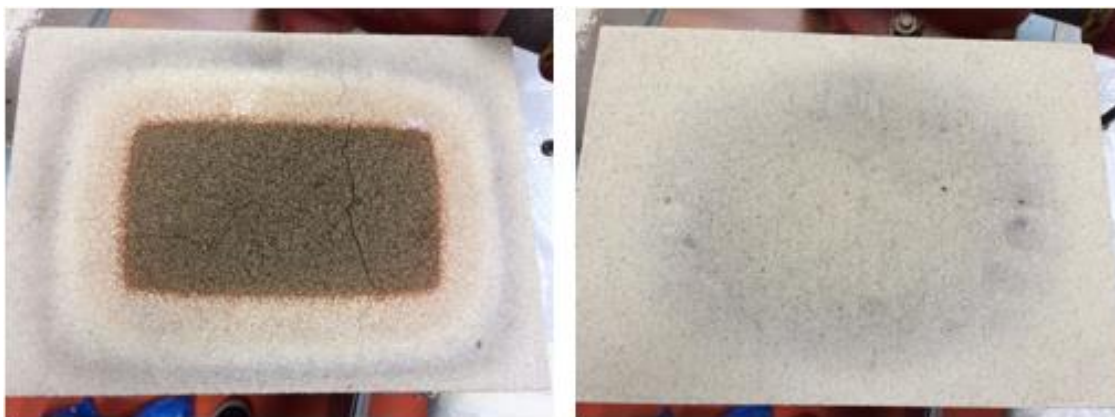
#### Vzorek 1



Obrázek 28: Grenamat AL po testování tl. 10 mm



Obrázek 29: Grenamat AL po testování tl. 20 mm

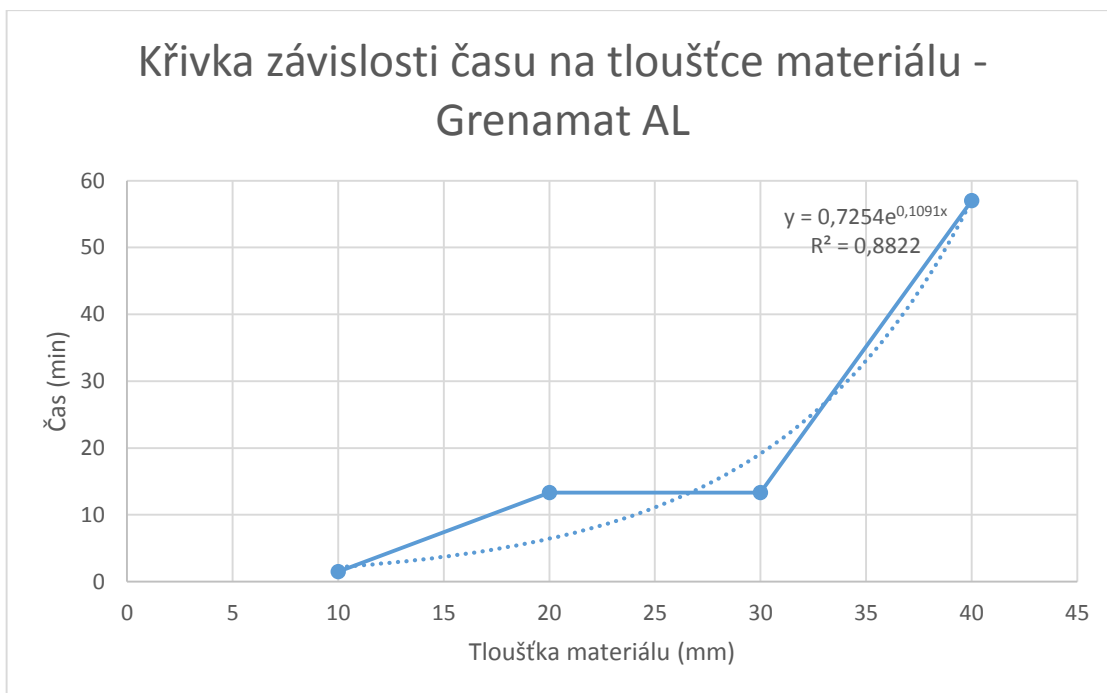


Obrázek 30: Grenamat AL po testování tl. 40 mm

Tabulka 7: Tabulka s naměřenými časy u materiálu Grenamat AL

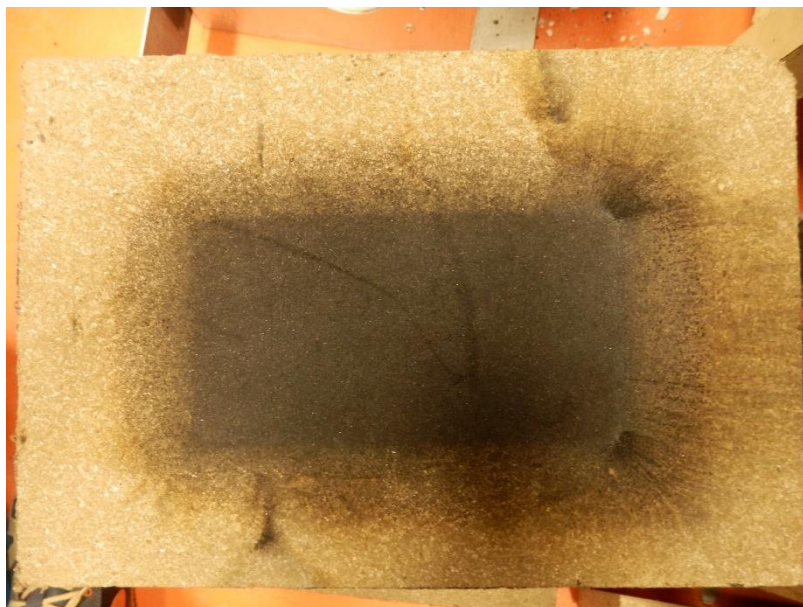
	Tloušťka (mm)	Čas (min/140 °C)	Poznámka
Grenamat AL	10	1,5	Nehoří, nečadí, nezapáchá
	20	13,33	
	30	13,33	
	40	57	

Materiál splňuje předem zvolené parametry pouze u tloušťky 40 mm požární odolnosti a v grafu 3 je zobrazena závislost teplotního prostupu na tloušťce materiálu za čas. Během testování materiál neprodukoval žádný kouř, nehořel ani se nějak nedegradoval. Tloušťka 20 mm a 30 mm mají stejné naměřené časy a chování při testování.



Graf 3: Křivka závislosti času na tloušťce materiálu - Grenamat AL

## Vzorek 2



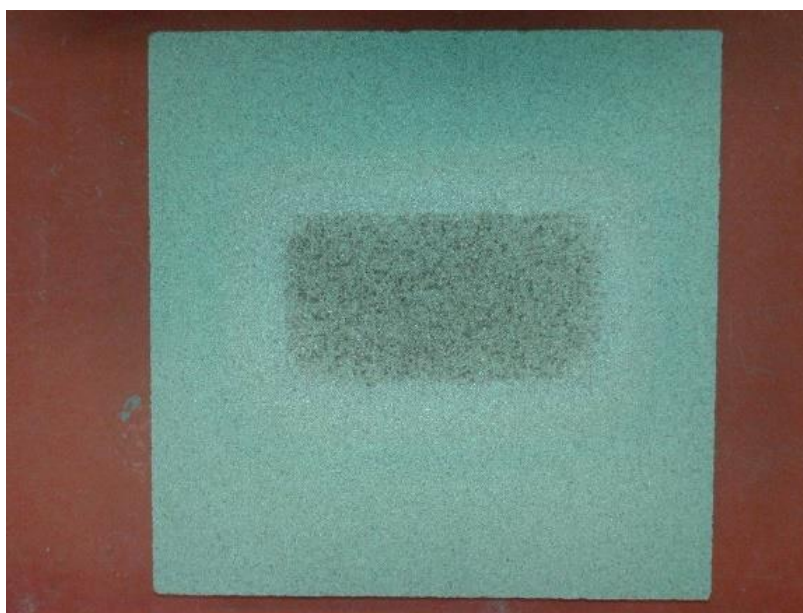
Obrázek 31: Grenaboard tl. 60 mm po testu žárem

Tabulka 8: Tabulka s naměřenými časy u materiálu Grenaboard

	Tloušťka (mm)	Čas (min/140 °C)	Poznámka
Grenaboard	60	hoří, čadí	Okamžité kouření - není možné testovat v laboratoři (hrozí spuštění alarmu)
	16	hoří, čadí	

Materiál je nevyhovující, jelikož ihned po přiložení na pec začal kouřit a zapáchat. Test musel být zrušen, jelikož by se spustil požární alarm v laboratoři. Tento materiál není vhodný ani pro testování mezi dvěma plechy, kde došlo ke stejné situaci. Plech by se rozpálil do stejné vysoké teploty jako má pec a materiál by opět začal kouřit a zapáchat. Nejspíše je to způsobené tím, že na povrchu je nalepený oboustranně papír, jak uvádí výrobce.

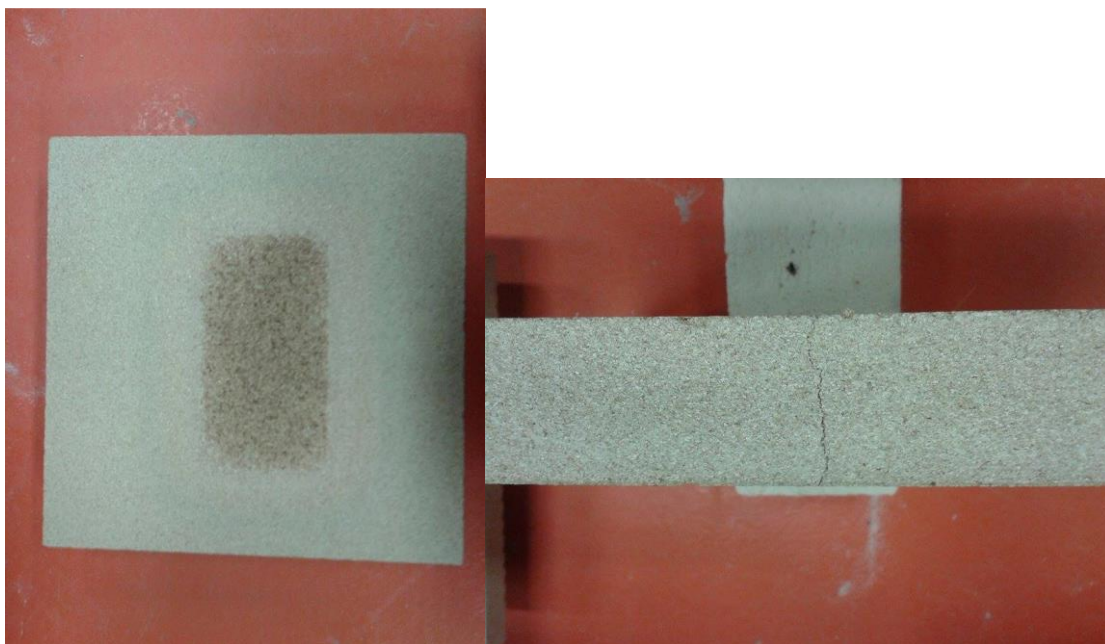
### Vzorek 3



Obrázek 32: Grenaisol tl. 30 mm po testování žárem



Obrázek 33: Grenaisol tl. 40 mm po testování žárem s viditelnou prasklinou uprostřed

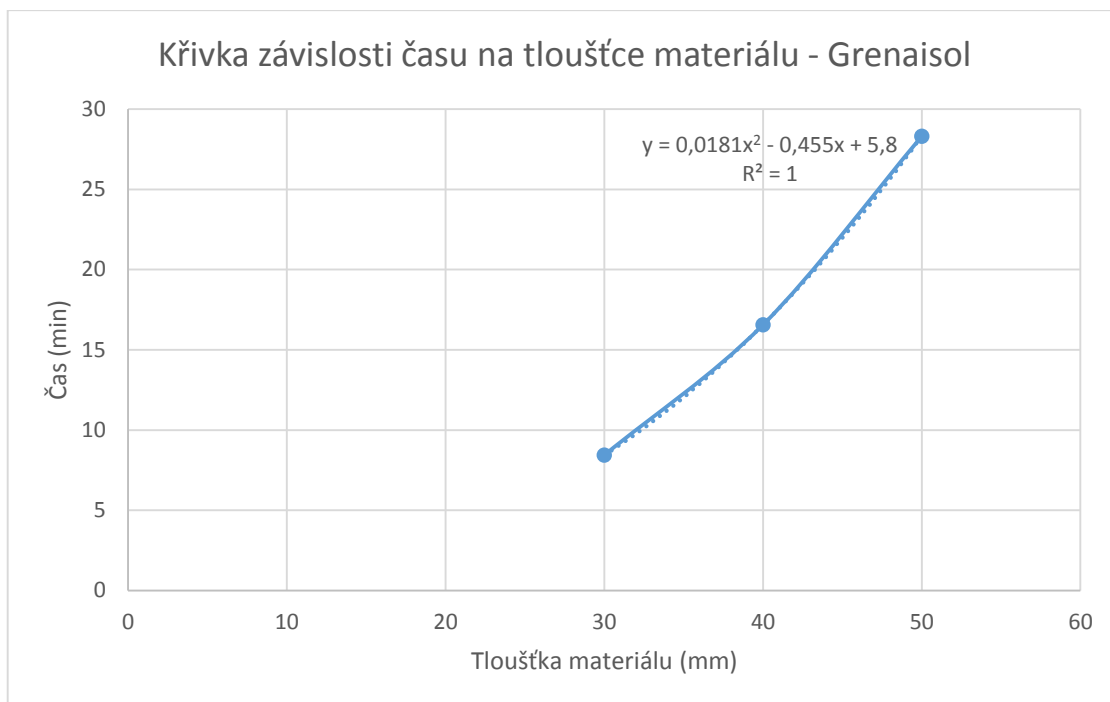


Obrázek 34: Grenaisol tl. 50 mm po testování žárem s viditelnou prasklinou uprostřed

Tabulka 9: Tabulka s naměřenými časy u materiálu Grenaisol

	Tloušťka (mm)	Čas (min/140 °C)	Poznámka
Grenaisol	30	8,44	Uprostřed materiálu vznikla během testu trhлина, nebyl pozorován žádný zápach ani kouř.
	40	16,56	
	50	28,3	

Z naměřených časů je v grafu 4 dobře vidět, že závislost času na tloušťce je přímo úměrná a lineárně stoupající. Na obrázku 29, 30, 31 jsou fotky po testování materiálů a je viditelné, že materiál je nehořlavý, nemá známky degradace ohořelého povrchu, ale nejspíš tepelnou roztažností došlo k jeho prasknutí, což u materiálu pro výplň dveří není závažný problém.



Graf 4: Křivka závislosti času na tloušťce materiálu - Grenaisol

#### Vzorek 4



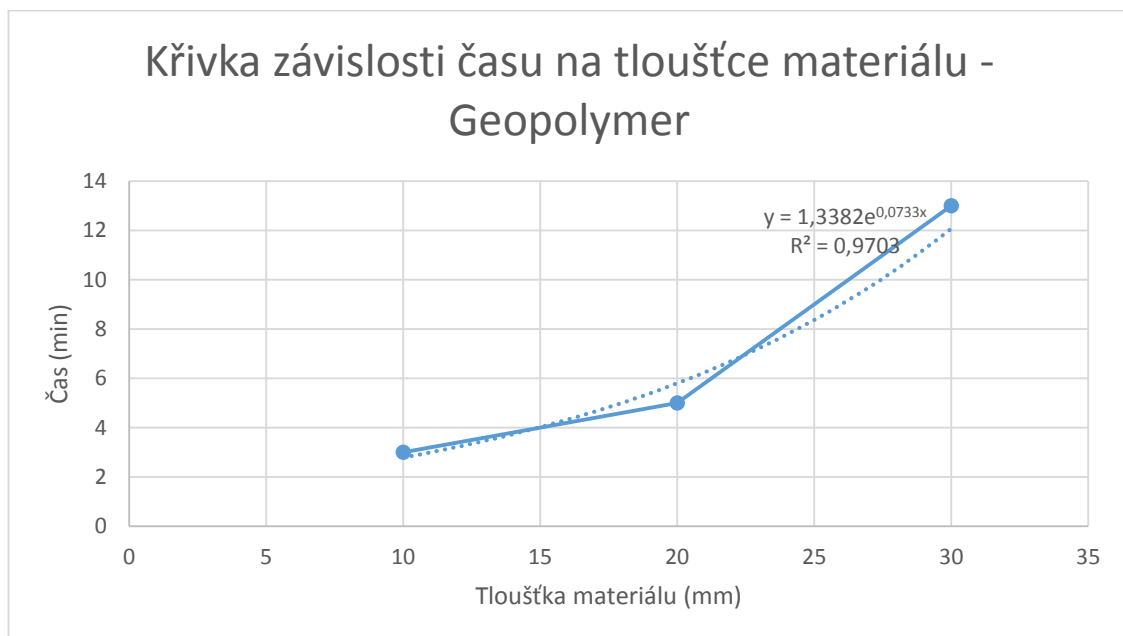
Obrázek 35: Geopolymer o tloušťkách 10, 25, 50 mm. Vzorky byly předsušeny při 100 °C.



Obrázek 36: Geopolymer po testování, znatelné trhliny

Tabulka 10: Tabulka s naměřenými časy u Geopolymeru

	Tloušťka (mm)	Čas (min/140 °C)	Poznámka
Geopolymer	10	3	Při styku s vysokým žářem geopolymer popraská a to zejména z důvodu odpaření jeho vlhkosti a úplného vysušení materiálu.
	25	5	
	50	13	



Graf 5: Křivka závislosti času na tloušťce materiálu - Geopolymer

Geopolymer není vhodný pro použití za takto vysokých teplot. Působením žáru se odpařuje vlhkost a materiál začíná praskat a drolit se. Při tloušťce 50 mm vydržel odolávat pouze 13 minut,



což je nedostačující. Materiál je navíc nehomogenní, v různých místech má odlišnou hustotu a tedy prostup tepla je tedy nerovnoměrný.

### Vzorek 5



Obrázek 37: WDS® High tl. 30 mm po testu žárem

Tabulka 11: Tabulka s naměřenými časy u materiálu WDS® High

	Tloušťka (mm)	Čas (min/140 °C)	Poznámka
WDS® High	30	66	Po hodině je test ukončen, z důvodu stagnující teploty v materiálu.

Materiál zcela vyhovuje požadavkům, jelikož byl testován po dobu 1 hodiny a nedošlo k žádné deformaci materiálu, ani nezačal kouřit nebo zapáchat. Při tomto testu nebylo dosaženo prostupu tepla materiálem s rozdílem teplot 140 °C. Z obrázku 34 je patrné lehké opálení materiálu po jeho stranách, což je pravděpodobně způsobeno tím, že v tomto místě je na materiálu nalepená páska od výrobce, která nejspíše zajišťuje ochranu proti deformaci hran desek. Výsledky zkoušek požární odolnosti vláknenných materiálů

## Vzorek 6



Obrázek 38: FireMaster® tl. 40 mm po testu žárem

	Tloušťka (mm)	Čas (min/140 °C)	Poznámka
FireMaster® 350board	40	28 Test předčasně ukončen	Materiál od začátku testu zapáchal spáleninou, po 28 min začal kouřit a test byl zrušen.

FireMaster® 350board byl od začátku testu cítit spáleninou, ale materiál nekouřil, tudíž se v testu pokračovalo. Požadovaného rozdílu teplot bylo dosaženo po 28 minutách a test byl ukončen. Na obrázku 35 je vidět, že je materiál spálený, proto nejspíše zapáchal.

## 4.2. Výsledky zkoušek požární odolnosti vláknenných materiálů

### Vzorek 7



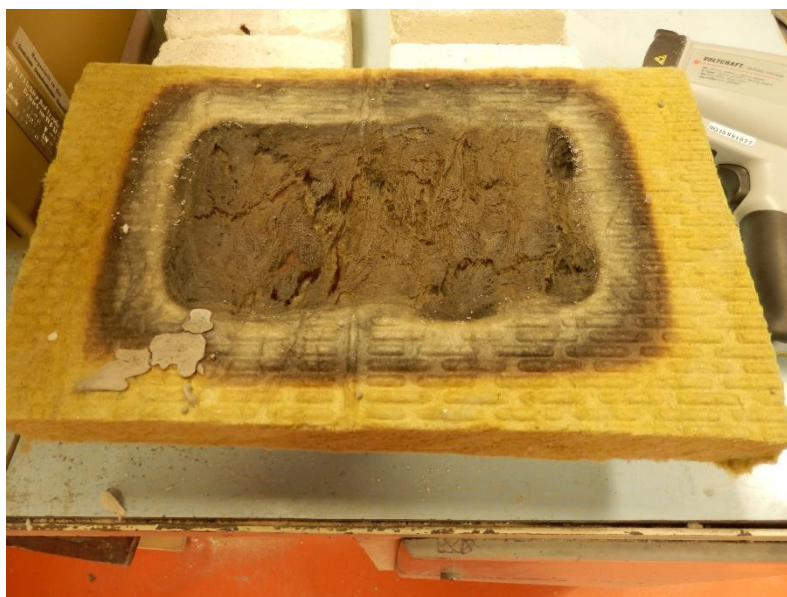
Obrázek 39: FireMaster® Marine Plus Blanket – a) z boku, b) po testu žárem

Tabulka 12: Tabulka s naměřenými časy u materiálu FireMaster®

	Tloušťka (mm)	Čas (min/140°C)	Poznámka
FireMaster® Marine Plus Blanket	25	2,28	Prostup tepla byl ihned viditelný, kdy se hliníkový potah rozžhavlil. Nekouří, nezapáchá.

FireMaster® Marine Plus Blanket nekouří ani nezapáchá, byla však pozorována okamžitá reakce na vysokou teplotu, kde se ochranná kovová fólie rozžhavlila a materiál vydržel pouze 2,28 minuty.

## Vzorek 8



Obrázek 40: Isover FireProtect 150 tl. 20 mm po testu

Tabulka 13: Tabulka s naměřenými časy u Isover FireProtect 150

	Tloušťka (mm)	Čas ( $140\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Poznámka
Isover FireProtect 150	20	1,25	Začal se tavit, kouřit a zapáchat, ale nevznítil se.

Materiál po styku s vysokou teplotou okamžitě zapáchal spáleninou a produkoval kouř. Na teplotě  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  vydržel 1,25 minuty, což se předpokládalo, jelikož výrobce uvádí maximální teplotu výdrže  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přesto materiál prokázal, že má dobrou požární odolnost, protože se tavit, neodkapával ani nevzplanul plamenem.

### 4.3. Výsledky zkoušek požární odolnosti složených materiálů

Složení by mělo mít lepší schopnost odolávat teplotnímu prostupu a být lepší tepelný izolant. Především pro využití kombinací materiálů, které lze nakombinovat tak, aby měly dobré vlastnosti a příznivou cenu. Testované materiály, které budou sloužit jako výplň vrat a dveří, musí být v symetrickém složení, jelikož není známo, v jaké části se požár vyskytne. Hlavní očekávání od skládaných vrstev je nižší cena. V testování budou prováděny pozorování chování vnějších materiálů, ale zejména prostředních výplní, a vždy budou porovnány s jiným vzorkem při stejné vnější krycí vrstvě. Vnější vrstva bude vždy z materiálů, které splnily požadavky protipožární ochrany. Střed skládané vrstvy pak bude z materiálu, který nesplnil požadavky, nebo se jim jen přiblížil.

## Skladba 1

Skladba 1 se skládá z vnějších krycích materiálů FireMaster® 350board. Ty byly, odříznuty z původního materiálu, aby se dosáhlo požadované tloušťky 20 mm. Jako prostřední vrstva byl zvolen materiál FireMaster® Marine Plus Blanket v tloušťce 40 mm, který byl ponechán v jeho původní tloušťce a to i přesto, že maximální celková tloušťka má být 60 mm. Tento vzorek má nízkou objemovou hustotu a tudíž je snadno stlačitelný i poměrně malou silou. Tím se docílilo požadované tloušťky 60 mm.



Obrázek 41: Skládané složení, celková tloušťka 60 mm – před testováním



Obrázek 42: Deska FireMaster®350board, tl. 20 mm – spodní vrstva v přímém kontaktu se žářem, po testování



Obrázek 43: FireMaster® Marine Plus Blanket, tl. 40 mm – prostřední vrstva, po testování



Obrázek 44: FireMaster®350board tl. 20 mm – horní vrstva, po testování

Tabulka 14: Tabulka s naměřenými časy u skladby 1

	Tloušťka (mm)	Čas (140 °C.min <sup>-1</sup> )	Poznámka
FireMaster®350board	20	62	Lehce zapáchal a produkoval kouř. Test ukončen dle hypotézy.
FireMaster® Marine Plus Blanket	40		
FireMaster®350board	20		

Vzhledem k vysoké objemnosti materiálu FireMaster®Marine Plus Blanket bylo přípustné zkoušení v tloušťce 40 mm, jelikož po zatížení horní deskou, materiál ztratí svůj objem. Vrstvené složení po dobu 62 minut nedosáhlo požadované teploty pro ukončení testu, což znamená, že v testu uspěl velmi dostatečně. Na obrázku 38 je vidět vrstvené složení před testováním a na obrázku 39, 40, 41 je materiál vyfocen po testování a focen vždy z obou stran pro ilustraci prostupu tepla deskami. Na obrázku 39 je deska, která byla v přímém kontaktu s vysokou teplotou a jsou vidět povrchové praskliny v desce, což je způsobené tepelnou roztažností materiálu. Testované složení lehce zapáchalo spáleninou a slabě kouřilo.

## Skladba 2

Pro porovnání vlastností prostředního izolačního materiálu, byl zvolen Isover FireProtection 150, který byl stejně jako u skladby 1 umístěn mezi dvěma stejnými deskami materiálu FireMaster®350board v tloušťce vzorku 20 mm. Oba vzorky byly upraveny tak, aby splňovaly požadavek na celkovou maximální tloušťku 60 mm.



Obrázek 45: Vrstvené složení, tl. 60 mm – před testováním



Obrázek 46: Deska FireMaster®350board, tl. 20 mm – spodní vrstva v přímém kontaktu se žářem, po testování



Obrázek 47: Isover FireProtect 150, tl. 20 mm – prostřední vrstva, po testování



Obrázek 48: FireMaster®350board tl. 20 mm – horní vrstva, po testování

Tabulka 15: Tabulka s naměřenými časy u skladby 2

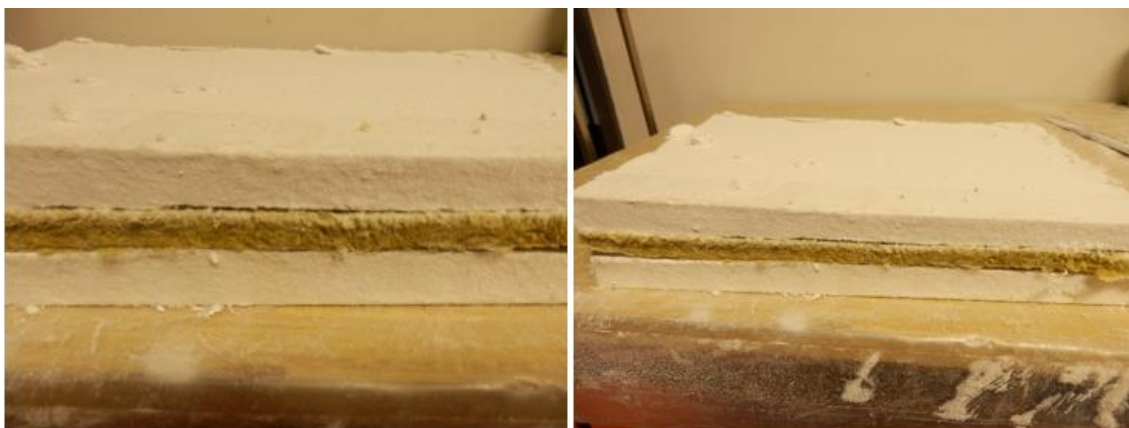
	Tloušťka (mm)	Čas (140 °C.min <sup>-1</sup> )	Poznámka
FireMaster®350board	20	5	Lehce zapáchal a kouřil. Test předčasně ukončen z důvodu požární bezpečnosti v laboratoři.
Isover FireProtect 150	20	Předčasně ukončen	
FireMaster®350board	20		

Toto vrstvené složení je nevyhovující, prostřední vrstva Isover FireProtect 150 se pod vysokou teplotou začala pálit (viz obr. 44) a produkovala kouř a zápach. Kvůli bezpečnostním podmínkám v laboratoři byl test po pěti minutách zrušen. Na začátku testu byla povrchová teplota 24 °C a po pěti minutách, kdy byl test ukončen, byla teplota 33 °C.

### Skladba 3

WDS®High vyšel v předchozích testech na výbornou, ale pro možnost snížení cenové relace, by bylo možné tento materiál nakombinovat s materiálem s horšími vlastnostmi, ale nižší cenou a tím získat dobrý materiál za přijatelnou cenu. Skladba 3 je ve složení na vnějších stranách z WDS®High o upravené tloušťce 15 mm a pro prostřední vrstvu byl zvolen Isover FireProtection 150 v tloušťce 15 mm, který při samostatném testování neprokázal dobrou požární odolnost.

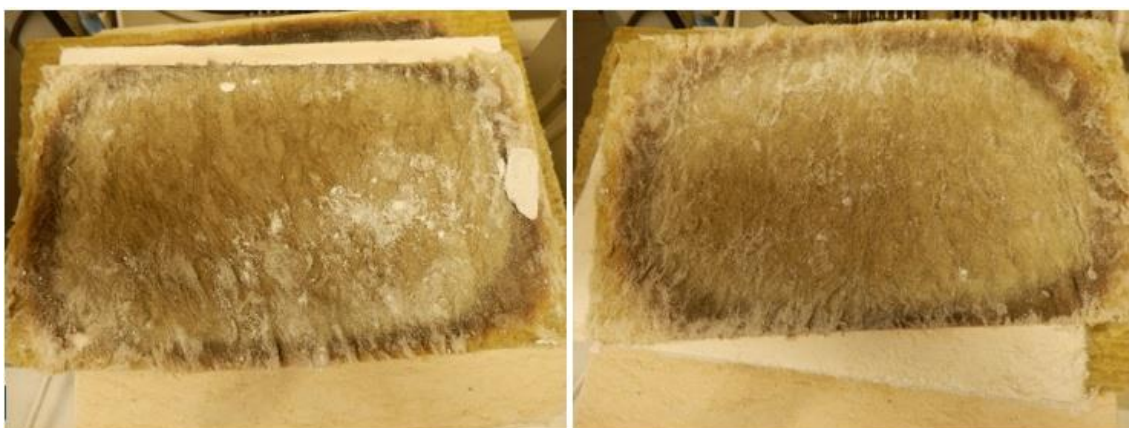




*Obrázek 49: Vrstvené složení, tl. 45 mm – před testováním*



*Obrázek 50: WDS® High, tl. 15 mm - spodní vrstva v přímém kontaktu se žářem, po testování*



*Obrázek 51: Isover FireProtect 150, tl. 15 mm – prostřední vrstva, po testování*



Obrázek 52: WDS®High tl. 15 mm – horní vrstva, po testování

Tabulka 16: Tabulka s naměřenými časy u skladby 3

	Tloušťka (mm)	Čas (140 °C.min <sup>-1</sup> )	Poznámka
WDS®High	15	61	Nekouří, nezapáchá. Test ukončen dle hypotézy.
Isover FireProtect 150	15		
WDS®High	15		

Vrstvené složení prokázalo zlepšení vlastností u Isoveru, které je vyhovující, jelikož vydrželo po dobu 60 minut a test byl ukončen dle navržené testovací metody. Na obrázku 47, 48, 49 je znatelný prostup tepelné energie skrz materiál. Testované složení neprodukovalo žádný kouř ani zápach. Počáteční povrchová teplota byla 21 °C a po 60 ti minutách, kdy byl test ukončen, teplota dosahovala pouze 100 °C.

#### Skladba 4

Stejně jako u skladby 3 byl použit stejný materiál pro vnější vrstvu a byla upravena pouze prostřední vrstva, kde byl použit FireMaster®Marine Plus Blanket.



Obrázek 53: Vrstvené složení, tl. 60 mm – před testováním



Obrázek 54: WDS® High, tl. 20 mm - spodní vrstva v přímém kontaktu se žářem, po testování



Obrázek 55: FireMaster® Marine Plus Blanket, tl. 40 mm – prostřední vrstva, po testování



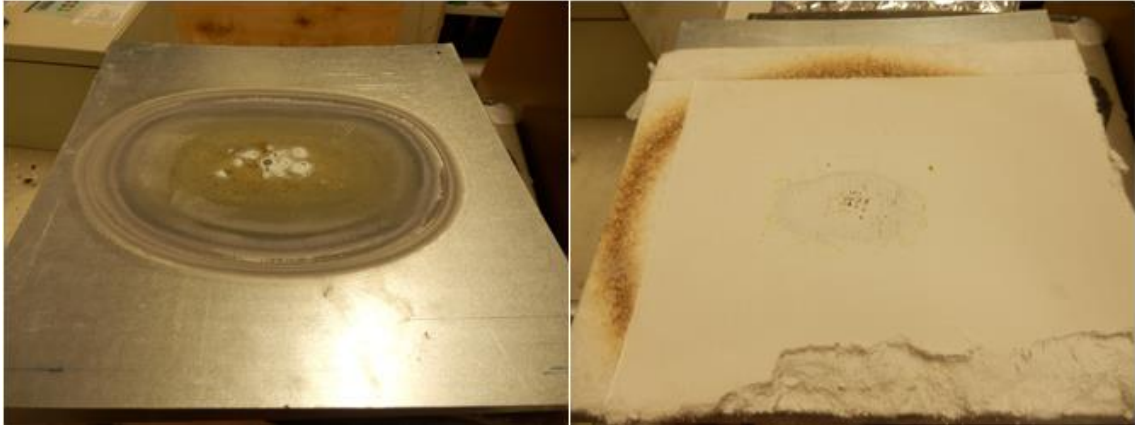
Obrázek 56: WDS® High tl. 20 mm – horní vrstva, po testování

Tabulka 17: Tabulka s naměřenými časy u skladby 4

	Tloušťka (mm)	Čas (140 °C.min <sup>-1</sup> )	Poznámka
WDS® High	20	60	Nekouří, nezapáchá. Test ukončen dle hypotézy.
FireMaster® Marine Plus Blanket	20		
WDS® High	20		

Vybrané složení je vyhovující a materiály neprokazují žádnou negativní vlastnost. Materiálové složení po hodině mělo povrchovou teplotu 95 °C a počáteční teplota byla 23,9 °C.

### Skladba 5



Obrázek 57: WDS® High tl. 30 mm umístěný mezi pozink. plechy po testu žárem

Tabulka 18: Tabulka s naměřenými časy u skladby 5

WDS® High + pozink plech	30 + z obou stran 3mm plech	33 Test předčasně ukončen	Vlivem teplotní roztažnosti se plech vyboulil, plech před zkouškou otočen a teplota měřena v bodu styku s test. materiálem. Po 33 min nevydržel pozink na plechu a zinek se začal tavit a kapat do pece, z bezpečnostního důvodu byl test zrušen.
--------------------------	-----------------------------	------------------------------	---

Při druhém testu, byl materiál umístěn mezi dva pozinkované plechy o tloušťce 3mm viz obrázek 54, kde v důsledku materiálové roztažnosti se plech zkroutil a po 33 minutách se začala tavit pozinková vrstva a začala odkapávat do pece, což představovalo zvýšené riziko při manipulaci se vzorky a test byl z bezpečnostních důvodů zrušen.

#### 4.4. Určení tepelné vodivosti vzorků

Výpočet tepelné vodivosti, lze provést podle vzorců uvedených v kapitole 2. Jediný vzorek, u kterého výrobce uvádí hodnotu lambda pro větší teplotní rozsah, je vzorek 7. Extrapolací hodnot bylo zjištěno, že vzorek při 1200 °C nabývá hodnoty 0,434 W.mK<sup>-1</sup>. Tloušťka materiálu byla 50 mm a teplota muflové pece byla konstantních 1200 °C, přičemž počáteční teplota vzorku byla 20,7 °C. K tomu je nutné připočíst teplotu 140 °C, která byla stanovena v návrhu testovací metody (viz kap. XXX). Získané hodnoty jsou následující:

$$q = -\lambda * \text{grad } T \quad (4)$$

$$q = -0,434 * 1312,45$$

$$\underline{q = -569,6 \text{ W.m}^{-1}}$$

$$\text{grad } T = \frac{d_t}{d_x} \quad [\text{K.m}^{-1}] \quad (2)$$

$S = 0,09 \text{ m} * 0,17 \text{ m} = 0,0153 \text{ m}^2$  (velikost testovací plochy)

$q = 569,6 \text{ W.m}^{-1}$  (množství tepla)

$$\lambda = \frac{d}{tS\Delta T} * q \quad [\text{W.mK}^{-1}] \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{0,03\text{m}}{66\text{min} * 0,0153\text{m}^2 * 1308,5\text{K}} * 569,6\text{K.m}^{-1}$$

$$\underline{\lambda = 0,1091\text{W.mK}^{-1}}$$

d - tloušťka materiálu

t – naměřený čas

$\Delta T$  – rozdíl teplot

Vypočítaná lambda je pro znázornění určení hodnoty pro vzorek č. 5.

Vypočítané q je množství tepla, které projde za jednotku času a pro všechny materiály bude stejná, díky testování vzorků na stejné peci za stejných podmínek. Výpočet bude relevantní, jelikož stěny pece akumulují velké množství tepla a tím vznikají ztráty. Pro experimentální výpočet lze použít vzorec 5. Výsledné hodnoty součinitele tepelné vodivosti testovaných vzorků jsou uvedené v tabulce 19.

Tabulka 19: Výsledné hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro testované vzorky

	$\lambda$ - součinitel tepelné vodivosti (W/mK)	Tloušťka (mm)
Grenamat AL	0,1894	10
	0,0538	20
	0,0641	30
	0,0200	40
Grenaisol	0,1010	30
	0,0687	40
	0,0503	50
Geopolymer	0,0929	10
	0,1424	25
	0,1086	50
WDS®High	0,1091	30
FireMaster®350board	0,0129	40
FireMaster®Marine Plus blanket	0,0406	50
Isover® FireProtection	0,6221	20

Tabulka 19 udává hodnoty součinitele tepelné vodivosti při teplotě 1200°C. Platí, že čím je součinitel tepelné vodivosti menší, tím je materiál lepší tepelný izolant.

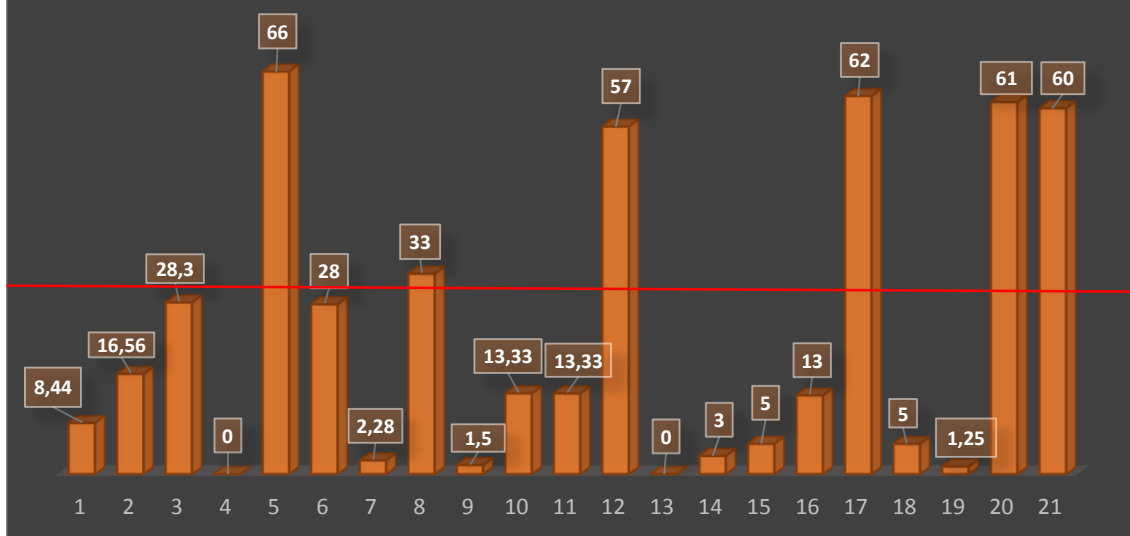
## Diskuze

Ohřev komory při požárním testování v reálných podmínkách se provádí plynovými hořáky, které jsou v různých směrech natočeny na vzorek, kde se po zažehnutí hořáků spouští měřený čas. Snaha o tuto simulaci v laboratoři je zatím ve vývoji, jelikož se nedaří najít optimální režim spalování a dochází tak k neefektivnímu hoření plynu a nemožnosti dosáhnout požadované teploty při testování. Proto byla navržena náhradní metoda a to testování na muflovací peci při teplotě 1200 °C. Tato simulace určila chování vybraných materiálů dveřních výplní v případě požáru, kde dochází k působení vysoké teploty a prostupu tepla výplní. Požární dveře musí být navrženy tak, aby odolaly po určitý časový úsek, než přijdou záchranné složky. Pro měření teploty bylo navrženo použití termočlánků, problém byl v jejich uchycení na vnitřní straně vzorku z důvodu vysoké teploty. Další problém spočíval v rušení signálu přenášeného mezi měřicí ústřednou a termočlánky. Toto rušení způsobovaly elektrické prvky pece. V okamžiku sepnutí stykače a zapnutí vytápění došlo k ovlivnění hodnot teplot. Možné řešení by bylo umístit měřicí ústřednu do větší vzdálenosti od pece, k tomu by však bylo nutné opatřit termočlánky s delšími přívody. Cena 1 metru termočlánku se pohybuje okolo 3000 Kč, pro tento případ by bylo zapotřebí minimálně 2 metrů, přičemž cena bude minimálně dvojnásobná, jelikož termočlánky jsou umístěny na obou površích vzorku, ideálně ve větším počtu pro vyšší přesnost měření vnější a vnitřní strany. Během testování se hledal nejvhodnější materiál z pohledu požární odolnosti. Tím byl vzorek č. 5. Tento materiál při tloušťce 30 mm odolával záru více než 60 minut, aniž by byla znatelná degradace vzorku. Neprodukoval kouř ani nezapáchal. Bohužel tento materiál má vysoké pořizovací náklady, jeden metr čtvereční stojí okolo 95 euro. Druhý optimální vzorek byl vzorek č. 1 v tloušťce 40 mm a výdrž 57 minut. Ostatní vzorky při zkoušení vykazovaly nižší než požadované odolnosti, kde byla hranice výdrže stanovena na nejméně 30 minut. Nejhorší vlastnosti vykazoval vzorek č. 2, který ihned po přiložení na pec začal produkovat kouř a zápach, proto byl test zrušen z důvodu bezpečnosti práce. To by mohlo být způsobeno pouze tím, že jeho povrch je opatřen papírem, jak uvádí výrobce. Další nevhodný materiál je vzorek č. 4, který při testování praskal, jelikož docházelo k vypařování vlhkosti a tím jeho vysušení a rozdrolení. Vzorek č. 7 je z jedné strany opatřen hliníkovou fólií, která odráží radiační teplo a tím prodlužuje požární odolnost, nevýhodou je, že hliník taje při relativně nízké teplotě a tím vyřazuje materiál pro použití za vysokých teplot. Určení hodnoty součinitele tepelné vodivosti v tabulce 12, ukazuje taktéž jako nejlepší vzorek č. 5 s hodnotou  $\lambda$  0,0033 W.mK<sup>-1</sup> při teplotě 1200°C a vzorek č. 1 s hodnotou  $\lambda$  0,0051 W.mK<sup>-1</sup> při teplotě 1200°C. Tyto vypočítané hodnoty nejsou však relevantní, protože vychází pouze z teorie vypočítání součinitele tepelné vodivosti.

Při testování složené skladby, byly prokázány výhody použití kombinací vzorků. Vzorek č. 6 při samotném testování odolával pouze 28 minut. V kombinaci vzorků měl výdrž podstatně vyšší a to více než 60 minut, což je způsobeno prostřední vrstvou a to vzorkem č. 7. Při testování stejných materiálů, jen s výměnou střední vrstvy za vzorek č. 8 už kombinace vydržela pouze 5 minut. Navíc bylo pozorováno, že vzorek č. 8 jako prostřední materiál začínal degradovat, kouřit a zapáchat. To znamená, že skrz spodní desku prošlo velké množství energie, které zvýšilo teplotu relativně rychle. Střední vrstva už nebyla schopna tuto teplotu déle snášet, v důsledku čehož se začal uvolňovat kouř. Skladba 3 ve složení WDS®High má lepší schopnosti pohltit vysokou teplotu, kdy materiál Isover FireProtect 150 jako prostřední vrstva odolával tepelné energii po dobu 60 minut. Přesně tato kombinace vzorků splňuje optimální návrh protipožární výplně za přijatelnou cenu. Materiál WDS®High je nejdražší ze všech testovaných materiálů a má také nejlepší vlastnosti. Ve složené skladbě však byla upravena jeho tloušťka a jako prostřední vrstva byl použit nejlevnější materiál Isover FireProtect 150. To mělo za následek snížení ceny, protože není potřeba používat drahý materiál v takovém množství a stačí ho použít jenom jako krycí materiál. Přesto tato kombinace byla schopná odolávat teplotě 1200°C po dobu jedné hodiny. V grafu 6 je červenou čarou označena hranice 30 minut, což rozděluje materiály na vhodné a nevhodné. Doba 30 minut by měla být dostatečná pro příjezd záchranných složek, které začnou ihned požár hasit a tím dojde ke snížení teploty požáru a prodloužení výdrže nehořlavých materiálů, což by mohlo vést k menším materiálním škodám i újmě na zdraví či životech. Vypočítat hodnotu lambda pro složené skladby není možné, protože byly upraveny tloušťky materiálů a proto nejsou známy hodnoty lambda pro dané tloušťky materiálů. Dodatečné testy nebyly z důvodu nedostatku materiálu možné.



## SROVNÁNÍ ODOLNOSTI JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ



Graf 6: Srovnání naměřených časů testovaných materiálů – všechny časy uvedeny v minutách

Tabulka 20: Doplnující informace ke grafu 6

Číslo	Materiál + tloušťka materiálu
1	Vzorek 3 tl. 30 mm
2	Vzorek 3 tl. 40 mm
3	Vzorek 3 tl. 50 mm
4	Vzorek 2 tl. 60 mm - Test ukončen předčasně
5	Vzorek 5 tl. 30 mm
6	Vzorek 6 tl. 40 mm
7	Vzorek 7 tl. 25 mm
8	Pozink. plech tl. 3 mm + Vzorek 5 tl. 30 mm + pozink plech tl. 3 mm - Test ukončen předčasně
9	Vzorek 1 tl. 10 mm
10	Vzorek 1 tl. 20 mm
11	Vzorek 1 tl. 30 mm
12	Vzorek 1 tl. 40 mm
13	Vzorek 2 tl. 16 mm - Test ukončen předčasně
14	Vzorek 4 tl. 10 mm
15	Vzorek 4 tl. 25 mm
16	Vzorek 4 tl. 50 mm
17	Skladba 1 tl. 60 mm
18	Skladba 2 tl. 60 mm Test ukončen předčasně
19	Vzorek 8 tl. 20 mm Test ukončen předčasně
20	Skladba 3 tl. 45 mm

## Závěr

Požární bezpečnost je díky zákonům České republiky povinností pro sektory, kde nastává riziko požáru. Proto je vhodné neustále zlepšovat nehořlavé materiály, které by byly tenčí, lehčí, pevnější, cenově dostupnější a přitom poskytovaly dostatečnou požární odolnost. S tím souvisí konstrukce bezpečnostních dveří a vrat. V teoretické části byly vysvětleny pojmy ze zákonů a norem, které výrobci musí dodržovat při testování a výrobě protipožárních uzávěrů. Byl navržen výpočet pro získání hodnoty součinitele tepelné vodivosti, který by mohl zpřesnit výběr materiálů pro testování a vyřadit tak materiály nevhodné. Vypočítané hodnoty součinitele tepelné vodivosti korespondují s nejlépe vyhodnocenými materiály v testu. V experimentální části bylo cílem navrhnout optimální výplně do protipožárních uzávěrů. Výplně byly testovány zvolenou testovací metodou na muflovací peci při teplotě 1200 °C. Bylo ověřeno několik vzorků, které prokázaly dobré vlastnosti a odolnost proti vysoké teplotě. Mezi ně patří WDS®High od firmy Porextherm a Grenamat AL od firmy Grena. Tyto vzorky vykazovaly nejvyšší odolnost ze všech zkoušených materiálů, ale také jsou nejvíce finančně náročné. U materiálu Grenaboard se ukázalo, že není vhodné používat povrchovou úpravu z papíru, protože při styku s vysokou teplotou začne papír hořet a test musí být ukončen z bezpečnostních důvodů. Pro snížení ceny byl navržen test vrstveného složení, kde se ukázalo, že levnější materiál, který samostatně vykazuje nedostatečnou odolnost, může být použitelný ve vhodně navržené materiálové skladbě. To se potvrdilo v případě skladby číslo 1 a 3. Ve skladbě 1 bylo jasně prokázáno zlepšení

vlastností u FireMaster®350board. Kdy s prostřední vrstvou FireMaster®Marine Plus Blanket byla požární odolnost větší než 60 minut. Také díky zmenšení tloušťky materiálu vzorku klesá pořizovací cena a použitím Isover FireProtect 150 jako prostřední vrstvy, se cena snižuje téměř na polovinu, přičemž jsou zachovány výborné vlastnosti vzorku. U skladby 4 bylo prokázáno, že pokud materiál Isover není v přímém kontaktu s vysokou tepelnou energií, prokazuje dobrou požární odolnost a vlastnosti při nízké pořizovací ceně.

## Literatura

1. **Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení.** Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 730810.
2. **Zákony pro lidi.** [Online] 2016. [Citace: 5. Březen 2016.] <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1999-202>.
3. Kupilík, V. **Stavební konstrukce z požárního hlediska.** Praha : Grada publishing a.s., 2005.
4. Schroll, C. R. **Industrial Fire Protection Handbook.** Boca raton : Taylor and Francis group, 2002. FL33487-2742.
5. Spedos. [Online] 2016. [Citace: 9. Březen 2016.] <http://www.spedos.cz/pozarni/pozarni-rolovaci-popis.php>.
6. **Zkoušení požární odolnosti dveřních a uzávěrových sestav - Část 1: Požární dveře a uzávěry otvorů.** Praha : Ministerstvo vnitra České republiky, 2009. ČSN EN 1634-1.
7. Solomon, R. E. **Fire and life safety.** Quincy, Massachusetts : National fire protection association, 2016. MA-02169-7471.
8. Perlit. [Online] 2016. [Citace: 4. Květen 2016.] <http://www.perlit.cz/?re=1&sk=3&me=2&ka=2>.

9. Keramzit. [Online] 2016. [Citace: 4. Květen 2016.] <http://www.keramzit.cz/pouziti-keramzitu/>.
10. Kamen Zeolit. [Online] 2016. [Citace: 4. Květen 2016.] <http://www.kamenzeolit.cz/>.
11. Grenamat AL. [Online] 2016. [Citace: 9. Březen 2016.] <http://www.grena.cz/grenamat-al-1404042102.html> .
12. Grenaboard. [Online] 2016. [Citace: 9. Březen 2016.] <http://www.grena.cz/grenaboard-1404042105.html> .
13. Grenaisol. [Online] 2016. [Citace: 9. Březen 2016.] <http://www.grena.cz/grenaisol.html> .
14. Geopolymer. [Online] 2016. [Citace: 10. Březen 2016.] <http://www.geopolymery.eu>.
15. WDS® High. [Online] 2016. [Citace: 12. Březen 2016.]  
<http://www.porextherm.com/en/products/wds/wds-high.html>.
16. FireMaster®. [Online] 2016. [Citace: 12. Březen 2016.]  
[http://www.morganthermalceramics.com/sites/default/files/datasheets/fm\\_board\\_data\\_sheet.pdf](http://www.morganthermalceramics.com/sites/default/files/datasheets/fm_board_data_sheet.pdf).
17. Rockwool. [Online] 2016. [Citace: 12. Březen 2016.] <http://www.rockwool.cz/produkty-a-reseni/u/4550/technicke-izolace-pro-protipozarni-ochranu/conlit-ductrock-60>.
18. Harper, A. Ch. *Handbook of building materials for fire protection*. Maryland : The McGraw-Hill Companies, Inc., 2004. 0-07-143330-9.
19. Hurley, M. J. *SFPE Handbook of fire protection engineering*. New York : Springer, 2016. ISBN 978-1-4939-2564-3.
20. *Označení protipožárních dveří*. [Online] 2016. [Citace: 17. Duben 2016.]  
<http://www.drevo-interier.cz/cs/mdl/info/protipozarni-dvere>.
21. *Detailní popsání a schéma požárních dveří*. [Online] 2016. [Citace: 17. Duben 2016.]  
<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/998>.
22. Kolář K., Reiterman P. *Stavební materiály*. Praha : Grada publishing a.s., 2012. ISBN-978-80-247-4070-6.

