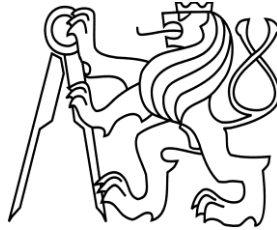

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

MALOROZMĚROVÉ ZKOUŠKY POŽÁRNÍ ODOLNOSTI

SMALL-SCALE FIRE RESISTANCE TESTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Jiří Chládek

Vedoucí práce: Ing. Marek Pokorný, Ph.D.

2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Chládek</u>	Jméno: <u>Jiří</u>	Osobní číslo: <u>424024</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra konstrukcí pozemních staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Integrální bezpečnost staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Malorozměrové zkoušky požární odolnosti</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Small-scale fire resistance tests</u>	
Pokyny pro vypracování: 1) Stav poznání v daném tématu 2) Problematická úskalí změny měřítka na průběh zkoušky a chování zkušební vzorku 3) Matematický CFD model malorozměrové pece na ČVUT UCEEB včetně optimalizace velikosti a výkonu hořáku a ventilačních podmínek 4) Validace CFD modelu na experimentu: (a) referenční zkouška s nehořlavými, (b) zkouška s hořlavým stěnovým vzorkem	
Seznam doporučené literatury: [1] Normy požárního kodexu řady ČSN 73 08 xx a normy související [2] WALD, F. a kol. Modelování dynamiky požáru v budovách. Praha: ČVUT v Praze, 2017. [3] SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd ed. Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers, 2002. [5] FLÍDR, Václav. Alternativní zjišťování požární odolnosti stěnových prvků. B.m.: České vysokoškolské učení technické v Praze. 2017 [5] Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6th ed. NIST, Fire Research Division Engineering Laboratory Gaithersburg, Maryland, USA, 2014	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Marek Pokorný, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>1.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
<u>[Signature]</u> Podpis vedoucího práce	<u>[Signature]</u> Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>1.10.2018</u> Datum převzetí zadání	<u>[Signature]</u> Podpis studenta(ky)
---	---

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Jiří Chládek

Název diplomové práce: Malorozměrové zkoušky požární odolnosti

Základní část: Malorozměrové zkoušky požární odolnosti podíl: 100 %

Formulace úkolů:

- 1) Stav poznání v daném tématu
- 2) Problematická úskalí změny měřítka na průběh zkoušky a chování zkušební vzorku
- 3) Matematický CFD model malorozměrové pece na ČVUT UCEEB
- 4) Validace CFD modelu na experimentu

Podpis vedoucího DP: 

Datum: 1.10.2018

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:

Datum:

3. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:

Datum:

4. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:

Datum:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Malorozměrové zkoušky požární odolnosti“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Marka Pokorného, Ph.D. a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 6.1.2019

.....

Bc. Jiří Chládek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Marku Pokornému, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, cenné rady a za pomoc při realizaci požárních zkoušek ve spolupráci s požární laboratoří na UCEEB ČVUT v Praze. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině, která mě podporovala, pomáhala mi a poskytla mi zázemí po celou dobu mého studia.

Obsah

Čestné prohlášení	IV
Poděkování	V
Abstrakt	VIII
Abstract	VIII
Seznam použitých symbolů a zkratk	IX
1 Úvod	1
1.1 Motivace.....	1
1.2 Struktura práce	2
1.3 Cíle práce	2
2 Historie zkoušek požární odolnosti	3
3 Požární odolnost stavebních konstrukcí	5
3.1 Mezní stavy požární odolnosti	5
3.2 Doba požární odolnosti	6
3.3 Druhy konstrukčních částí	6
3.4 Reakce na oheň	7
3.5 Hodnocení požární odolnosti stavebních konstrukcí	9
3.5.1 Experimentální metody	10
3.5.2 Výpočtové metody	11
4 Modelování požáru	12
4.1 Zónové modely	12
4.2 Modely typu pole	13
5 Malorozměrové zkoušky požární odolnosti	14
5.1 Změna měřítka	14
5.2 ČVUT v Praze, Česká republika	16
5.3 Worcester Polytechnic Institute, USA	20
5.4 Koceali University, Turecko	23
5.5 Instituto Politécnico de Bragança, Portugalsko	25
5.6 Heat-Transfer Rate Inducing System	27
6 Návrh pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti	30
6.1 Rozměry zkušební pece	30
6.2 Materiál zkušební pece.....	31
6.3 Teplota v peci – plynový hořák.....	32
6.4 Termočlánky	32
6.5 Ventilace ve zkušební peci.....	33
7 Vývoj a validace pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti	37
7.1 Software	37
7.2 Výpočetní oblast modelu	37
7.3 Referenční FDS simulace s nehořlavým opláštěním	38
7.3.1 Nastavení výkonu hořáku pro referenční FDS simulaci	38
7.3.2 Výsledky referenční FDS simulace s nehořlavým opláštěním	39

7.4	Referenční požární zkouška s nehořlavým opláštěním.....	42
7.4.1	Montáž pece	43
7.4.2	Výsledky referenční požární zkoušky s nehořlavým opláštěním.....	43
7.5	Porovnání výsledků referenční FDS simulace a referenční požární zkoušky.....	45
7.6	FDS simulace s OSB deskou	46
7.6.1	Tepelně technické vlastnosti OSB desky	46
7.6.2	Nastavení výkonu hořáku pro FDS simulaci s OSB deskou.....	47
7.6.3	Výsledky FDS simulace s OSB deskou	48
7.7	Požární zkouška s OSB deskou.....	49
7.7.1	Průběh požární zkoušky s OSB deskou	49
7.7.2	Výsledek požární zkoušky s OSB deskou.....	50
7.8	Porovnání výsledků FDS simulace a požární zkoušky s OSB deskou	51
8	Závěr	54
	Seznam obrázků	56
	Seznam tabulek	59
	Literatura	60
	Příloha 1 – Zdrojový kód pro CFD model – referenční zkouška	63
	Příloha 2 – Zdrojový kód pro CFD model – OSB deska.....	67
	Fotodokumentace 1 – Výroba pece a referenční zkouška.....	71
	Fotodokumentace 2 – Požární zkouška s OSB deskou.....	74

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřená na požární odolnost a malorozměrové zkoušky požární odolnosti. Součástí práce je úvod do problematiky požární odolnosti, stručné seznámení s historií zkoušek požární odolnosti, současné normové požadavky a kritéria hodnocení požární odolnosti. Jsou zde popsány metody zjišťování požární odolnosti a problematika malorozměrových zkoušek požární odolnosti. Praktická část diplomové práce se nejprve věnuje návrhu pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti, pozornost při návrhu pece je kladena především na optimalizaci větrání. Na základě návrhu pece byl následně vytvořen CFD model a provedena FDS simulace pro referenční požární zkoušku a požární zkoušku s OSB deskou. Za účelem validace byla pec vyrobena a následně byly provedeny požární zkoušky. Matematické FDS simulace jsou porovnány s naměřenými daty z požárních zkoušek. Pozornost při porovnávání výsledků byla kladena především na průměrné teploty v horní polovině pece, která je primární veličinou, kterou sledujeme. Závěr práce shrnuje získané poznatky z matematických FDS simulací a požárních zkoušek.

Klíčová slova

Malorozměrová zkouška; požární odolnost; pec; CFD; FDS; teplota; termočlánek; deskový snímač teploty; ISO 834; validace

Abstract

The thesis is focused on a fire resistance and on small-scale tests of fire resistance. An introduction to the problematic of a fire resistance, a brief outlook on the history of fire resistance tests, contemporary standard requirements and criterias of a fire resistace rating are all parts of the thesis. There are also described methods of fire resistance detecting and the problematic of small-scale fire resistance tests. In the practic part of the thesis we firstly focused on a project of a furnace designed for a small-scale fire resistance test, the stress is primarily layed on the optimalization of ventilation. Afterwards, there was created a CFD model and performed a FDS simulation for a referential fire test and for a fire test with an OSB desk. The model creation and the simulation are based on the project. The furnace was created and the tests were performed for the purpose of validation. Mathematical FDS simulation are compared with measured data of the fire tests. During the comparison, the stress was primarily layed on average temperatures in the upper part of the furnace, which are the primarily values we are focused on. The summary recapitulates the pieces of knowledge which were gained from the FDS mathematic simulations and from the fire tests.

Keywords

Small-scale test; fire resistance; furnace; CFD; FDS; temperature; thermocouple; plate thermometer; ISO 834; validation

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

c	Měrná tepelná kapacita	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
S	Plocha	m^2
T	Teplota	$\text{K}; \text{ }^\circ\text{C}$

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3

Zkratky

FDS	Fire Dynamics Simulator (software)	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro normalizaci)	
ČSN	Česká technická norma	
ČSN EN	Evropská norma	
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze	
ČVUT	České vysoké učení technické	
WPI	Worcester Polytechnic Institute	
IPB	Instituto Politécnico de Braganca	
PT	Plate thermometer (deskový snímač teploty)	
H-TRIS	Heat-Transfer Rate Inducing System	
HRR	Heat Release Rate (rychlost uvolňování tepla)	W
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area (Rychlost uvolňování tepla na jednotku plochy)	W/m^2
H_{eff}	Efektivní výhřevnost	MJ/kg
OSB	Oriented strand board (desky z orientovaných plochých třísek)	

1 Úvod

1.1 Motivace

Stavební zákon 183/2006 § 156 odstavec ukládá, že pro stavbu mohou být navrženy a použity jen takové výrobky, materiály a konstrukce, jejichž vlastnosti z hlediska způsobilosti stavby pro navržený účel zaručují, že stavba při správném provedení a běžné údržbě po dobu předpokládané existence splní základní požadavky na stavbu. Jedním ze základních požadavků na stavbu je, že stavba musí být navržena takovým způsobem, aby v případě požáru byla zachována po určitou dobu nosnost konstrukce, omezen vznik a šíření ohně a kouře. Z tohoto důvodu je nutné prokázat, že výrobky umístěné ve stavbě vyhovují z pohledu požární bezpečnosti staveb.

Při projektování staveb je nutné projektovat pouze ze stavebních výrobků, které při osazení do stavby mají zkouškami prokázané a deklarované vlastnosti. Jedná se hlavně o mechanické, fyzikální a tepelně technické vlastnosti. Jednou ze zkoušek, která se u stavebních výrobků a materiálů provádí, je zkouška požární odolnosti. Jedná se o zkoušku, kde se ověřují především fyzikální vlastnosti výrobku. Výsledky požárních zkoušek následně rozhodují o možnostech použití výrobku ve stavbě. Požární odolnost konstrukcí je součástí takzvané pasivní požární ochrany, která zabraňuje rychlému šíření požáru po budově, zachovává integritu budovy, umožňuje bezpečnou evakuaci a bezpečný zásah hasičům.

Zkoušky požární odolnosti v akreditovaných zkušebnách jsou jak časově, tak finančně nákladné. V dnešní době, kdy firmy přicházejí na trh se stále novými stavebními výrobky z atypických materiálů a skladeb (např. sendvičové panely s různými izolacemi a deskovými materiály), není možné stanovit jejich požární odolnost pomocí tabulek nebo výpočtem jako u „tradičních“ materiálů, je nutné přijít s alternativním přístupem. V současnosti je neefektivní provádět tyto zkoušky v akreditovaných zkušebnách metodou pokus-omyl. Proto je smysluplné, si ověřit požadované vlastnosti zkouškou v menším měřítku, která odpovídá rámcově zkoušce v akreditované zkušebně. Jednou z možností je vytvoření matematického modelu a ověření vlastností pomocí vhodných softwarů. Další možností je zkonstruovat fyzikální model zkušební pece ve zmenšeném měřítku a otestovat různé varianty výrobků před oficiální zkouškou. Malorozměrová zkouška umožní rychlejší a levnější způsob testování výrobku, mimo jiné může sloužit jako identifikace, jestli je vývoj nového výrobku na správné cestě. Malorozměrová zkouška zabere mnohem méně času a lze provést více testů v kratší době oproti oficiální zkoušce, což znamená významnou výhodu v souvislosti s vývojovými pracemi a při plánování akreditované zkoušky. Na zkoušku pak lze vybrat nejvhodnější výrobek, u kterého si bude výrobce téměř jist, že jím zvolený typ výrobku u zkoušky obstojí. Zvolené řešení umožňuje ušetřit velké finanční náklady spojené s akreditovanou zkouškou a zjednodušuje vývoj nových výrobků.

Vzhledem k velkému počtu nových výrobků, je vytvoření malorozměrové zkušební pece pro zkoušky požární odolnosti vhodnou alternativou. Toto téma se jeví jako velmi zajímavé z důvodu možného velkého využití v praxi pro firmy, jenž vyvíjejí nové stavební výrobky. A právě vytvořením vhodného CFD modelu pece ve zmenšeném měřítku odpovídající akreditované zkoušce se zabývá tato diplomová práce, následným zkonstruováním pece a ověřením funkčnosti na požárních zkouškách.

1.2 Struktura práce

Tato diplomová práce je rozdělena na osm kapitol. V úvodní kapitole je stručně popsána motivace k vytvoření této práce. V následujících kapitolách je řešena historie zkoušek požární odolnosti, rešerše požární odolnosti, metody zjišťování požární odolnosti, modelování požáru, problematika změny měřítka a seznámení se zkušebními pecemi pro malorozměrové zkoušky. Další důležitou kapitolou je návrh pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti a s tím spojená optimalizace větrání. Předposlední kapitola obsahuje řešený příklad. Jedná se o vytvoření CFD modelů pece za účelem nastavení tepelných výkonů plynového hořáku a následné ověření funkčnosti na požárních zkouškách. Poslední kapitolou je závěr, kde jsou především shrnuty poznatky řešeného příkladu diplomové práce.

1.3 Cíle práce

Cílem diplomové práce v teoretické části je shrnout stav současného poznání v oblasti požární odolnosti a zaměřit se na úskalí změny měřítka na průběh zkoušky a chování zkušební vzorku. V řešeném příkladu je cílem vytvořit CFD model malorozměrové pece, zaměřit se na optimalizaci ventilačních podmínek a nastavení tepelného výkonu hořáku. Posledním cílem diplomové práce je validace vytvořených CFD modelů na dvou požárních zkouškách. Jedná se o referenční zkoušku v peci s nehořlavým opláštěním a zkoušku s hořlavým stěnovým vzorkem.

2 Historie zkoušek požární odolnosti

Oheň je součástí našich dějin od nepaměti, první primitivní člověk pozoroval záři plamenů potenciálně před více jak 2,5 miliony lety, během paleolitického období. Od těch dob se znalosti o použití a pochopení požáru značně vyvinuly. Člověk v průběhu dějin s rostoucí znalostí tepla a ohně v kombinaci se znalostí matematiky položil základy k vývoji požárních testů. Dříve lidé rozuměli dvěma stranám trojúhelníku hoření. Lidé věděli, že kombinace tepla (iniciačního zdroje) s palivem (hořlavé látky) může způsobit požár. Tato znalost vedla k vývoji ranných požárních testů při vývoji zbrojních systémů, např. řeckého ohně. Vědecké základy požárních zkoušek byly položeny během 16. až 18. století. Jedna z prvních snah popsat spalovací procesy se objevila přibližně ve 30 letech 19. století s řadou přednášek od M. Faraday na „Royal Institution of Great Britain“. V roce 1885 Mallard a Le Chatelier publikovali svoji práci, kde poskytovali podrobnější analýzu spalovacích procesů. Práce vytvořené těmito a dalšími vědci ve 20. století, kteří definovali spalovací procesy a vlastnosti plamene, se používají v současných metodách požárního testování dodnes. Ve 20. století nebyly rozeznávány rozdíly mezi dvěma základní pojmy požární odolnosti konstrukce a nehořlavou konstrukcí. V minulém století byly tyto dva pojmy původně považovány za synonyma, a tak časná historie požární bezpečnosti staveb začala snahou najít nehořlavé materiály. V dnešní době je rozdíl mezi požární odolností a nehořlavou konstrukcí jasný, požární odolnost je doba, po kterou je konstrukce schopna odolávat požáru, zatím co nehořlavý materiál nebude uvolňovat při požáru výrazné spalné teplo [1, 2].

Ke konci 19. století byla potřeba zajistit požární bezpečnost staveb, kdy se při rychle rozvíjející zástavbě, se požární bezpečnost staveb stala společenským požadavkem. Hlavní hnací silou spojenou s vývojem požárních zkoušek (požární bezpečnosti staveb) byly četné velké požáry, které ničily velké části měst např. v New Yorku (1835), Chicagu (1871) a San Franciscu (1906, obr. 1).



(a)



(b)

obr. 1 Požár v San Franciscu: (a) před požárem; (b) po požáru [3]

První stavební požární kódy byly zaměřeny na požární odolnost příček a stropů, které jsou klíčové k omezení šíření požáru uvnitř budov a zabránění šíření požáru v hustých zástavbách. Původní zkoušky na strop (i když ne národní norma), vyžadovaly průměrnou teplotu plynné fáze 927 °C po dobu 4 hodin, ochlazení konstrukce proudem vody a následné 4x vyšší zatížení konstrukce než zatížení provozní po dobu 24 hodin. Pokud prvek stropu nepřekročil průhyb 1,4 % jejího rozpětí, předpokládalo se, že zkoušený prvek vyhověl (obr. 2) [4].



obr. 2 Zkouška požární odolnosti kolem roku 1902 [4]

V roce 1903 proběhl mezinárodní kongres požární prevence v Londýně, který měl za cíl sjednotit všechny požární zkoušky pod jedním mezinárodním standardem. První vydání standardu pro testování požární odolnosti se datuje k roku 1918. Jednalo se o standard vydaný americkou společností pro testování a materiály. V průběhu celého 20. století probíhala řada výzkumů zaměřených na zlepšení zkoušek požární odolnosti. Tyto výzkumy vedly k významnému zlepšení zkoušek požární odolnosti oproti prvnímu standardu (např. homogenita vnitřního prostředí, teploměr jako měřicí nástroj, regulátor vnitřní teploty atd.) [5–7].

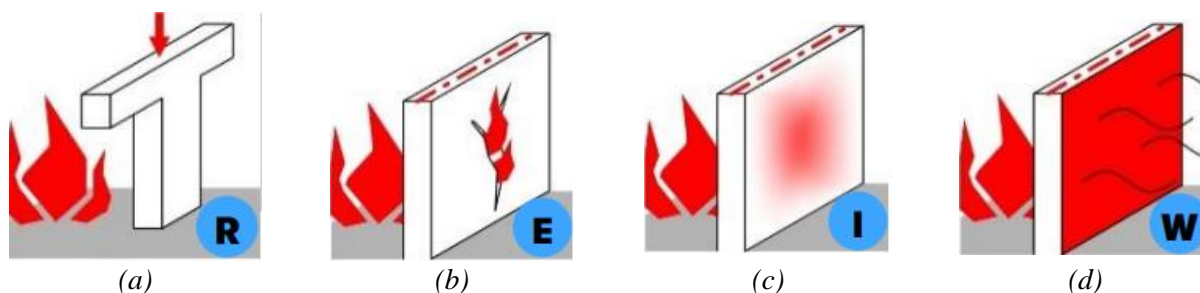
Od vydání prvního standardu před více než 100 lety se testovací postupy již příliš nezměnily navzdory obrovskému pokroku v požárním inženýrství, termomechaniky a strukturálním modelování požáru. Původním záměrem standardní zkoušky požární odolnosti bylo poskytnout srovnávací test konkurenčních materiálů a systémů založený na dříve velmi omezené znalosti dynamiky požáru. Abychom se vyhnuli falešnému předpokladu, že budova je bezpečná a není důležité dále optimalizovat návrh konstrukce budov na účinky požáru, je nutné prověřit tuto zkušební metodu s dnešními znalostmi. Neboť v dnešní době již víme, že standardní zkoušky požární odolnosti nemusí zcela odpovídat skutečnému chování požáru a zkoušený vzorek může mít odlišné okrajové podmínky při zkouškách než při konečné aplikaci na stavbě [4].

3 Požární odolnost stavebních konstrukcí

Tato kapitola se věnuje shrnutí současného hodnocení požární odolnosti konstrukcí. Požární odolnost je schopnost konstrukce, požárního uzávěru či jiného požárně bezpečnostního zařízení odolávat účinkům požáru a zachovat si při požáru svou funkci, pro kterou byla navržena. Při požáru nesmí dojít k porušení požadované funkce. Na konstrukci či výrobek může být kladen požadavek hned několika těchto funkcí, jedná se o takzvané mezní stavy. Konstrukce či výrobek může být navržen na jeden nebo více mezních stavů. V České republice je požadovaný zápis požární odolnosti vyjádřen mezním stavem, tj. požadovanou dobou po kterou má konstrukce plnit svoji funkci (v minutách) a doplněn druhem konstrukční části [8].

3.1 Mezní stavy požární odolnosti

Normové požadavky na mezní stavy požární odolnosti zohledňují typ konstrukce, zda se jedná o nosnou konstrukci či požárně dělicí konstrukci, která může mít dále nosný nebo nenosný charakter. Mezi nejčastěji užívané mezní stavy patří kritérium R, E, I, W (obr. 3) a v případě požárních uzávěrů se doplňuje dalšími specifickými mezními stavy C a S.



obr. 3 Mezní stavy požární odolnosti: (a) nosnost; (b) celistvost; (c) izolace; (d) radiace [9]

Kritéria mezních stavů požární odolnosti jsou porušena, pokud dojde během akreditované zkoušky při vystavení účinkům požáru k překročení mezních hodnot. Nejčastěji užívané mezní stavy jsou vypsány v následující tabulce (tab. 1) [10].

tab. 1 Kritéria mezních stavů požární odolnosti [11]

Označení mezního stavu	Název symbolu	Základní princip vlastnosti
R	Kritérium nosnosti	Konstrukce musí být schopna přenášet zatížení při zachování únosnosti a stability. Platí pro všechny nosné konstrukce v objektu (např. stěny, stropy, průvlaky, sloupy, ztužidla).
E	Kritérium celistvosti	V konstrukci nesmí dojít k vytvoření trhlin či prasklin umožňující plamenu nebo zplodinám hoření procházet konstrukcí. Požaduje se u všech požárně dělicích konstrukcí.
I ¹⁾	Kritérium izolace	Průměrná teplota na neohřívané straně nesmí vystoupat oproti počáteční hodnotě o více než 140 °C. Požaduje se u všech požárně dělicích konstrukcí.

Označení mezního stavu	Název symbolu	Základní princip vlastnosti
W	Kritérium radiace	Jedná se o mírnější požadavek kritéria I, používaný především u požárních uzávěrů. Tepelný tok na neohřívané straně nesmí překročit 15 kW/m ² .
M	Kritérium mechanické odolnosti	Jedná se o schopnost prvku odolávat nárazu v případě, kdy nastane porušení jiného prvku při požáru a dojde k nárazu na posuzovaný prvek.
C ²⁾	Samozavírání	Uplatňuje se především u požárních uzávěrů, které v případě požáru musí být uzavřeny.
S ³⁾	Kouřotěsnost	Jedná se o schopnost požárních uzávěrů omezit nebo vyloučit průnik kouře z jedné strany na druhou.
<p>¹⁾ Ve specifických případech dveří a uzávěrů se používá jedna ze dvou možností kritérií izolace s označením I₁, I₂ [10].</p> <p>²⁾ U samozavíračů lze použít doplňkovou klasifikaci, jenž odpovídá životnosti podle charakteru požárního uzávěru C0 až C5 (např. C1 odpovídá 500 cyklům, C5 200000 cyklům) [8].</p> <p>³⁾ V případě kouřotěsnosti dveří jsou definovány dva typy s označením S_a, S_m [11].</p>		

3.2 Doba požární odolnosti

Požární odolnost je doba, po kterou jsou schopny stavební konstrukce nebo požární uzávěry odolávat teplotám vznikajícím při požáru bez porušení své funkce, respektive plnit požadovaný mezní stav. Požadovaná doba požární odolnosti konstrukcí v objektech se určuje na základě stupně požární bezpečnosti daného požárního úseku [11].

Doba požární odolnosti je měřena v minutách a je vytvořena stupnice klasifikačních dob. Základní klasifikační doby užívané v českých technických normách jsou 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 [8]. Z evropských norem převzatých do systému ČSN jsou ještě doby 240 a 360 minut. Tyto doby jsou přiřazeny k jednotlivým mezním stavům a tvoří třídy požární odolnosti (např. R 15, EW 30, REI 120), tzn. že pokud dojde při akreditované zkoušce k překročení např. kritéria mezního stavu EI ve 41. minutě, požární odolnost posuzované konstrukce je EI 30 [12].

3.3 Druhy konstrukčních částí

Česká republika v rámci českých technických norem oproti zbytku světa vyjma Slovenské republiky (společný historický vývoj norem) konstrukční části dělí na tři skupiny, které se rozdělují podle použitých stavebních výrobků, resp. podle toho jakou třídu reakce na oheň vykazují. Jedná se o konstrukci druhu DP1, DP2, nebo DP3 (ve Slovenské republice označováno D1, D2, nebo D3). Konstrukce se posuzují z pohledu dvou kritérií. Prvním kritériem je, zda použité materiály přispívají k zvyšování intenzity požáru. Druhé kritérium hodnotí, zda materiály mají vliv na stabilitu a únosnost konstrukčních prvků (tab. 2). Smyslem klasifikace je stanovit chování stavebních konstrukcí za požáru jako celku [11].

tab. 2 Základní kritéria pro rozdělení na druhy konstrukčních částí

Kritérium	DP1	DP2	DP3
Zvýšení intenzity požáru v požadované době PO konstrukční části	NE	NE	ANO
Vliv použitých materiálů na únosnost a stabilitu	NE	ANO	ANO

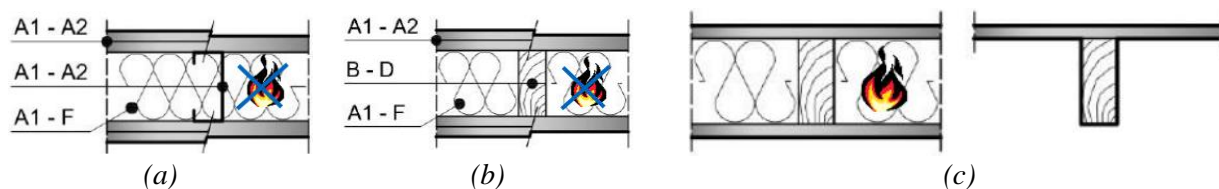
Za konstrukce druhu DP1 (obr. 4a) se považují výrobky a hmoty (jde především o zděné, betonové či ocelové konstrukce) [11]:

- pouze třídy reakce na oheň A1 nebo A2, pokud výrobky třídy reakce na oheň jsou celistvé a homogenní a obsahují nejvýše 5 % organických látek (např. pojivou izolací z minerálních vláken), nebo
- nebo třídy reakce na oheň B až F umístěné uvnitř konstrukční části mezi výrobky podle výše zmíněného požadavku a na těchto výrobcích není závislá stabilita únosnosti konstrukce (např. pěnový polystyren v železobetonových panelech).

Za konstrukce druhu DP2 (obr. 4b) se považují tyto výrobky a hmoty (např. stěny s dřevěnou kostrou opláštěné výrobky třídy reakce na oheň A1 či A2) [11]:

- výrobky třídy reakce na oheň A1 nebo A2 tvořící povrchové vrstvy konstrukčních částí, u nichž se po dobu požadované požární odolnosti nenaruší jejich stabilita (např. desky na bázi sádry),
- výrobky třídy reakce na oheň A1 nebo D umístěných uvnitř konstrukčních částí dle výše zmíněného bodu a je na nich závislá stabilita (např. dřevěné sloupky),
- výrobků jakékoliv třídy reakce na oheň umístěných uvnitř konstrukční části, aniž by na těchto výrobcích byla závislá stabilita konstrukční části (např. tepelná izolace mezi dřevěnými sloupky).

Za konstrukce druhu DP3 (obr. 4c) se považují výrobky a hmoty zvyšující v požadované době požární odolnosti intenzitu požáru a nesplňují požadavky konstrukcí DP1 a DP2 [11].



obr. 4 Druhy konstrukčních částí (schematicky znázorněné na sendvičové konstrukci): (a) konstrukce DP1; (b) konstrukce DP2; (c) konstrukce DP3 [9]

3.4 Reakce na oheň

Reakce na oheň výrobků je důležitým ukazatelem, jak stavební výrobky při aplikaci do stavby mohou přispívat k rozvoji požáru. Výrobky rozdělujeme na hořlavé nebo nehořlavé, které

následně rozdělujeme do 7 tříd reakcí na oheň. (tab. 3). Třída reakce na oheň stavebních výrobků je důležitá především v prvotní fázi vzniku a rozvoje požáru, poté co došlo k iniciaci požáru. Třída reakce na oheň ovlivňuje, jakou rychlostí dojde k rozvoji požáru a popřípadě jestli nastane flashover efekt [11]. Rozdíl je patrný z provedených experimentů Swedish National Testing and Research Institute. Při experimentální zkoušce byl zapálen odpadkový koš (cca 30 kW) a byl zkoumán vliv třídy reakce na oheň stavebních výrobků na rozvoj požáru. Na prvním obrázku (obr. 5) je znázorněn rozvoj požáru, kde byl použit obklad stěn s třídou reakce na oheň B – s1, d0 a podlaha s třídou reakce na oheň C_{fl}. Na druhém obrázku (obr. 6) byl použit obklad stěn s třídou reakce na oheň D – s2, d0 a podlaha s třídou reakce na oheň C_{fl}.

tab. 3 Třídy reakce na oheň stavebních materiálů [9]

Rozdělení výrobků	Třída reakce na oheň	Základní princip vlastnosti
Nehořlavé výrobky	A1	Nepřispívají k růstu požáru a k vývoji kouře (např. keramické zdivo, skleněná tabule)
	A2	Nepřispívají významně k růstu požáru (např. sádkartonová deska, minerální vlákno)
Hořlavé výrobky	B	Velmi omezeně přispívají k růstu požáru (např. cementotřískové desky, kombinace šedého EPS a minerálních vláken)
	C	Omezeně přispívají k „flashover“ (např. tepelný izolant z fenolické pěny)
	D	Přispívají k „flashover“ (např. dřevo, desky na bázi dřeva)
	E	Výrazně přispívají k „flashover“ (např. pěnový polystyren, polyuretanová pěna)
	F	Nezařazené do žádných z předchozích (výrobky, u kterých třída nebyla stanovena)
Doplňková klasifikace pro třídy reakce na oheň A2 až E: s1-s3 vývoj kouře, d0-d2 vznik plamenně hořících kapek/částic, a1-a3 kyselost zplodin hoření kabelových izolací (čím vyšší číslo tím vyšší tvorba komponentů hoření).		



obr. 5 Požární experiment v rohu místnosti – obklad stěn B – s1, d0, podlaha C_{fl} [9]



obr. 6 Požární experiment v rohu místnosti – obklad stěn D – s2, d0, podlaha C_{fl} [9]

3.5 Hodnocení požární odolností stavebních konstrukcí

V této kapitole budou stručně shrnuty metody pro hodnocení požární odolnosti stavebních konstrukcí. Požární odolnost konstrukcí je obecně možné stanovit na základě experimentálních požárních zkoušek nebo výpočtem.

3.5.1 Experimentální metody

Experimentální metody ověřování požární odolnosti patří k tradičnímu způsobu požárního inženýrství. Experimentální zkoušky požární odolnosti lze provádět od malorozměrových zkoušek až po velkorozměrové. Velkorozměrová zkouška se nejvíce přibližuje k průběhu reálného požáru uvnitř prostorů zasažených požárem. Při zjišťování požární odolnosti experimentálními metodami se zkouší celé konstrukce, aby bylo ověřeno jejich chování při co nejvíce reálných podmínkách (obr. 7) [13].



obr. 7 Požární zkouška v Mokrsku [14]

Experimentální metoda ověřování požární odolnosti může pomoci při řešení problému, které jsou příliš složité pro matematické modely, nebo tam kde nejsou ověřené výpočtové postupy. Experimentálně změřená data jsou nezbytná pro kalibraci, validaci a verifikaci jak stávajících tak i nově vznikajících výpočetních modelů, které simulují reakci konstrukcí na účinky požáru. Některé velkorozměrové zkoušky požární odolnosti, které byly provedeny u nás i ve světě, jsou znázorněny v následující tabulce (tab. 4) [4].

tab. 4 Velkorozměrové zkoušky požární odolnosti [4]

Název zkoušky a/nebo hlavní zúčastněné instituce	Rok
AISI / NBS, USA	1982
British Steel and BRE Cardington (six tests)	1996
BRE Cardington, United Kingdom	2003
CTU in Prague, Ostrava, Czech Republic	2006
CTU in Prague, Mokrsko, Czech Republic	2008
University of Edinburgh / Indian Inst. of Tech., Roorkie, India	2011
CTU in Prague, Veselí n/L, Czech Republic	2011

Mezi experimentální metody lze zařadit akreditovanou zkoušku požární odolnosti. Tato zkouška se provádí v požárních pecích v akreditované zkušebně. V České republice je hlavní akreditovanou zkušebnou Pavus a.s.. V Československé federativní republice vznikl v roce 1990 státní podnik „Požárně atestační a výzkumný ústav stavební Praha, s.p.“, který se později stal akciovou společností a přejmenoval se na Pavus a.s.. Pavus a.s. má akreditovanou požární zkušebnu ve Veselí nad Lužnicí, jedná se o požární zkušebnu č. 1026. Pro potřeby výrobců, dovozců, případně distributorů nebo zplnomocněných zástupců, kteří uvádějí na trh stanovené stavební výrobky nebo zabudovávají tyto výrobky do staveb, provádí Pavus a.s. následující výkony:

- zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň,
- zkoušení požární odolnosti stavebních konstrukcí,
- zkoušení požárně technických a mechanických vlastností stavebních výrobků a konstrukcí,
- zkoušení požárně bezpečnostních zařízení,
- zkoušení technických prostředků a zařízení požární ochrany, včetně zkoušek hasiv,
- zkoušení požárně technických charakteristik hmot, látek materiálů a výrobků [15].

3.5.2 Výpočtové metody

Metodický postup výpočtu požární odolnosti stavebních konstrukcí je uveden v kodexu evropských norem ČSN EN 199x-1-2. Při hodnocení požární odolnosti konstrukcí lze postupovat podle jednoduché výpočtové metody nebo zpřesněné.

Výpočet požární odolnosti podle Eurokódů lze aplikovat na většinu tradičních konstrukcí jako jsou betonové konstrukce, ocelové, dřevěné či zděné. Výpočty mají omezenou oblast použití, v evropských normách nejsou dostatečně zohledněny např. materiály, které přispívají ke zvýšení požární odolnosti, či méně tradiční materiály. Výpočty jsou založeny na změně fyzikálních vlastností materiálu při zvýšených teplotách, které se upravují v závislosti na čase vystavení účinkům požáru. Při ověřování požární odolnosti stavebních konstrukcí lze posouzení provést podle jednoho ze tří kritérií:

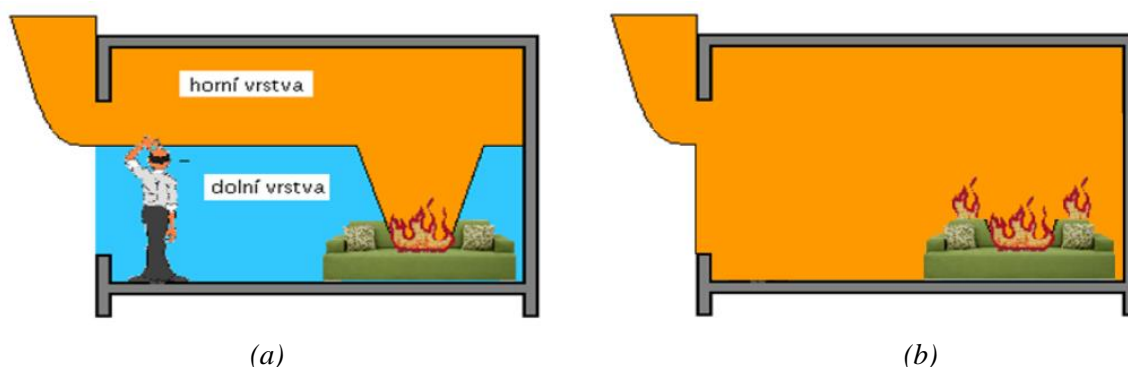
- teploty (požární odolnost je ve většině případů dosažena ve chvíli, kdy teplota posuzovaného prvku je rovna kritické teplotě tohoto prvku),
- času (porovnává se hodnota požadované požární odolnosti stanovená dle projektových norem se skutečnou hodnotou požární odolnosti uvedenou ve zkušebním protokolu, normě či v Eurokódech),
- únosnosti (návrhová hodnota únosnosti stavební konstrukce při požáru musí být větší než hodnota odpovídající účinkům zatížení při požáru) [17, 12, 14].

4 Modelování požáru

V požárním inženýrství jsou dva způsoby, jak modelovat dynamiku požáru. Jedná se o fyzikální modely a matematické modely. V případě fyzikálních modelů se jedná o uměle vytvořené experimentální objekty v reálném nebo zmenšeném měřítku, které napodobují reálné chování požáru. V případě matematických modelů se jedná o deterministické modely, pravděpodobnostní modely a zjednodušené modely. Matematické modely požáru předvídají mechanickou a tepelnou odezvu stavebních konstrukcí vystavených účinkům požáru. Matematické modely vystihují fyzikální a chemické chování materiálů konstrukcí, které reagují na zvýšenou teplotu. Lze jimi definovat libovolné množství různých simulací požárních scénářů a reakcí na ně. Mezi nejčastěji užívané modely při modelování požáru patří deterministické. V případě deterministických matematických modelů požáru se využívají dva základní modely. Jedná se o zónové modely nebo modely typu pole. Zónové modely jsou oproti modelu typu pole méně přesné, avšak mnohem méně časově náročné. Jakou metodu zvolíme, záleží tedy na tom, co od modelu očekáváme a jak přesných výsledků chceme dosáhnout [11, 14, 15].

4.1 Zónové modely

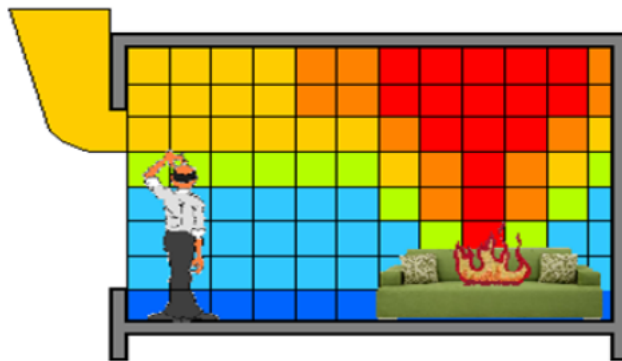
V zónových modelech je místnost, popřípadě propojené místnosti, rozdělena na zóny. V počátečních fázích požáru model předpokládá rozdělení na dvě zóny, takzvanou horní „teplou“ zónu a dolní „chladnou“ zónu (obr. 8a), přičemž u každé zóny se předpokládají v daném časovém kroku homogenní vlastnosti (hustota, teplota, koncentrace plynů). Dolní, studená vrstva se ochlazuje přívodem vzduchu z vnějšku (např. okny) a horní vrstva se nahřívá vzestupným prouděním zplodin od požáru prostřednictvím kužele požáru (tzv. fire plume). Dalším případem je jednozónový model, který vyjadřuje stav po dosažení celkového vzplanutí (tzv. flashover efekt). U jednozónového modelu se předpokládá, že celý prostor má homogenní vlastnosti (obr. 8b). Přejít mezi dvouzónovým a jednozónovým modelem je po dosažení určitých požadovaných parametrů, tj. flashover efekt. Modely pracují s parciálními diferenciálními rovnicemi pro zachování hmoty, energie a chemických látek mezi jednotlivými zónami. Výhodou zónových modelů je, že výpočty pracují s jedním nebo dvěma kontrolními objemy, čímž je dosažená nenáročnost na hardware a čas potřebný k výpočtům [17, 18].



obr. 8 Zónové modely: (a) dvouzónový model; (b) jednozónový model [17]

4.2 Modely typu pole

Modely typu pole využívají pro modelování požáru základní rovnice zachování přenosu energie, hmoty, chemických látek a hybnosti (Navier-Stokes rovnice v čase pro každý popisovaný objem). Jedná se o modely založené na algoritmech výpočtového proudění tekutin (Computational Fluid Dynamic, CFD). Simulovaný prostor je rozdělen do velkého počtu kontrolních objemů (buněk) vytvářejících prostorovou síť, přičemž o přesnosti výpočtu významně rozhoduje jemnost (hrubost) sítě. Samotné modely CFD neřeší požární specifika, ta jsou definována jako nadstavba tzv. požární submodely. Pomocí požárních submodelů lze simulovat chování definovaných látek za požáru, uvolňování tepla, rychlost šíření požáru, vývin a pohyb kouře, rychlost proudění atd. (obr. 9). Výhodou modelů typu pole je především schopnost řešit sofistikovanější případy, při kterých již zjednodušení zónových modelů nejde aplikovat. Jejich nevýhodou je zejména profesní náročnost, časová náročnost výpočtů (hodiny, dny) a velké požadavky na hardware [17, 18].



obr. 9 CFD model [17]

5 Malorozměrové zkoušky požární odolnosti

V této kapitole je vysvětlen vliv změny měřítka na zkoušku požární odolnosti a představeny pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti, které byly vyrobeny v České republice a ve světě. Průběh teplot v pecích, aby vyhovovaly normativním požadavkům, musí odpovídat nominální teplotní křivce. Tato křivka se využívá při zkouškách požární odolnosti stavebních prvků a konstrukcí ve zkušebních pecích v akreditovaných zkušebnách.

Malorozměrové zkoušky požární odolnosti slouží k předběžnému ověření požární odolnosti před akreditovanou zkouškou, ta pak probíhá v akreditované zkušebně. Při malorozměrových zkouškách požární odolnosti je důležité docílit toho, aby zkouška odpovídala co nejpřesněji normovým požadavkům. Jedním z nejdůležitějších požadavků na zkoušku požární odolnosti je, aby probíhala dle nominální teplotní křivky, která charakterizuje fázi plně rozvinutého požáru [19].

5.1 Změna měřítka

V uplynulých desetiletích byly v mnoha oblastech využívány modely se změnou měřítka od civilního až po letecké inženýrství. Modely ve zmenšeném měřítku ukazují, jak se zkoumaná věc může chovat. Modely jsou využívány k vizualizaci interakcí mezi různými částmi návrhu, k experimentům s různými návrhovými nápady a ke zlepšení celkového návrhu. Modelování ve zmenšeném měřítku může výzkumníkům v oblasti požární ochrany umožnit replikovat a pochopit specifické chování požáru při výrazně nižších nákladech [20].

Skutečné měřítko při modelování reálné situace požáru je s největší pravděpodobností nejstarší formou experimentálního požárního inženýrství. I když je tato metoda velmi drahá, výsledky ve formě naměřených dat jako jsou teploty, rychlost uvolňování tepla, úbytek hmotnosti a vývoj modelu během celého experimentu jsou velmi cenné. Na druhé straně jsou nevýhody spojené s časovou náročností, lidskými zdroji a financováním. Opakování takového testu v plném rozsahu je proto velmi vzácné. V porovnání se skutečným měřítkem model ve zmenšeném měřítku umožňuje mnohem více interakcí v různých podmínkách. Porovnání obou modelů je znázorněno v tabulce níže (tab. 5) [20].

tab. 5 Porovnání skutečného modelu se zmenšeným [20]

<i>Kritérium</i>	<i>Skutečné měřítko modelu</i>	<i>Zmenšené měřítko modelu</i>
<i>Přesnost</i>	<i>Vysoká</i>	<i>Vysoká</i>
<i>Relativní náklady (€)</i>	<i>Desetitisíce</i>	<i>Stovky</i>
<i>Profesní náročnost</i>	<i>Velmi vysoká</i>	<i>Velmi vysoká</i>
<i>Čas přípravy</i>	<i>Měsíce</i>	<i>Týdny</i>
<i>Počet opakování</i>	<i>Velmi omezený</i>	<i>Omezený</i>

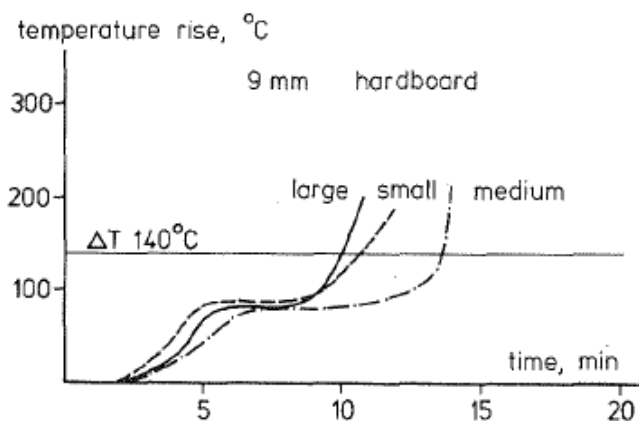
Výsledky z modelů ve zmenšeném měřítku lze považovat za stejně platné jako ve skutečném měřítku, za předpokladu že budou dodrženy určité parametry (poměry) např. geometrická, kinematická a dynamická podobnost. Nejvýznamnější bezrozměrné skupiny pro změny měřítka jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 6) [16, 20].

tab. 6 Nejvýznamnější bezrozměrné skupiny pro změny měřítka [16]

Název	Vzorec	Fyzikální významnost
Reynoldsovo číslo	$Re = \frac{\rho ul}{\nu}$	Poměr setrvačné síly a viskozity
Freudeho číslo	$Fr = \frac{u^2}{lg}$	Poměr vztlakových sil a gravitačního zrychlení – využíváno pro proudění při požáru
Grashofovo číslo	$Gr = \frac{gl^3\beta T}{\nu^2}$	Poměr vztlaku a viskózní síly
Prandtlovo číslo	$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$	Poměr viskozity a tepelné vodivosti

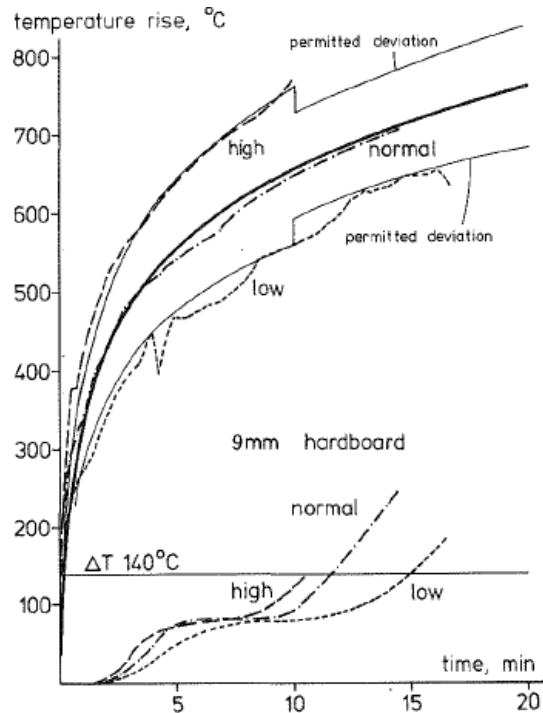
Ve Švédsku proběhl výzkum vlivu změny měřítka na zkoušku požární odolnosti stavebních panelů v pecích tří různých velikostí. Pro porovnání vlivu změny měřítka byly použity dvě pece ve zmenšeném měřítku (malá pec a střední pec) a jedna pec odpovídající peci pro standartní testování. Zkouška byla nastavena tak, aby tepelná expozice zkoušeného vzorku byla shodná s nominální teplotní křivkou ISO 834. Malá pec umožňuje zkoušet prvky o velikosti 0,5 x 0,6 m, střední pec vzorky o rozměrech 1,24 x 1,23 m a velká pec o rozměrech 2,4 x 3,0 m. Testovanými vzorky byly desky na bázi dřeva, sádkokartonové desky a lepené desky z cementu. Na velké peci byly otestovány 4 vzorky, ve střední peci 5 vzorků a v malé peci přibližně 50 vzorků [21].

Na obr. 10 je znázorněno porovnání požární odolnosti na třech různých pecích, kdy kritériem požární odolnosti bylo kritérium izolace. Testovaný vzorek byla stěna skládající se z lisovaných desek tl. 9 mm zateplených minerální izolací. U velké a malé pece byly výsledky přibližně shodné, zatím co u střední pece výsledky vykazovaly vyšší požární odolnost.



obr. 10 Srovnání požární odolnosti na třech velikostně rozdílných pecích [21]

Tepelná expozice v malých pecích se během několika experimentů měnila. Z grafu níže (obr. 11) lze pozorovat, že při nižší tepelné expozici zkoušeného vzorku než dle nominální teplotní křivky má zkoušený vzorek vyšší požární odolnost, zatímco vyšší tepelná expozice ovlivňuje požární odolnost zkoušeného vzorku výrazně méně a vykazuje podobné výsledky jako při dodržení nominální teplotní křivky ISO 834.



obr. 11 Teploty v peci a jejich vliv na požární odolnost [21]

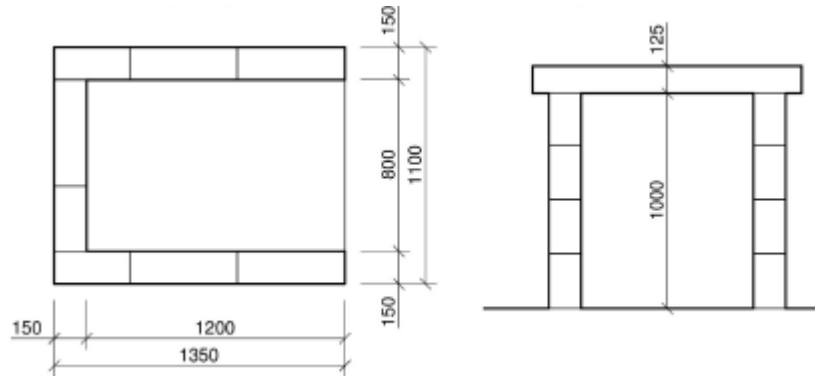
Z výsledků testů požární odolnosti plyne, že testy v malorozměrovém měřítku jsou přibližně shodné s testy velkorozměrovými, zatímco středně velká pec udává požární odolnost mírně vyšší. Tepelná expozice mírně vyšší než nominální teplotní křivka má nižší vliv na požární odolnost zkoušeného vzorku než teplota nižší.

5.2 ČVUT v Praze, Česká republika

Pec, která je představena v této kapitole bude detailně popsána z důvodu, že se jedná o pec, na kterou tematicky navazuje tato diplomová práce. Jedná se o pec vyvinutou v rámci diplomové práce na ČVUT v Praze Václavem Flídrem. Pec slouží pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze) [22].

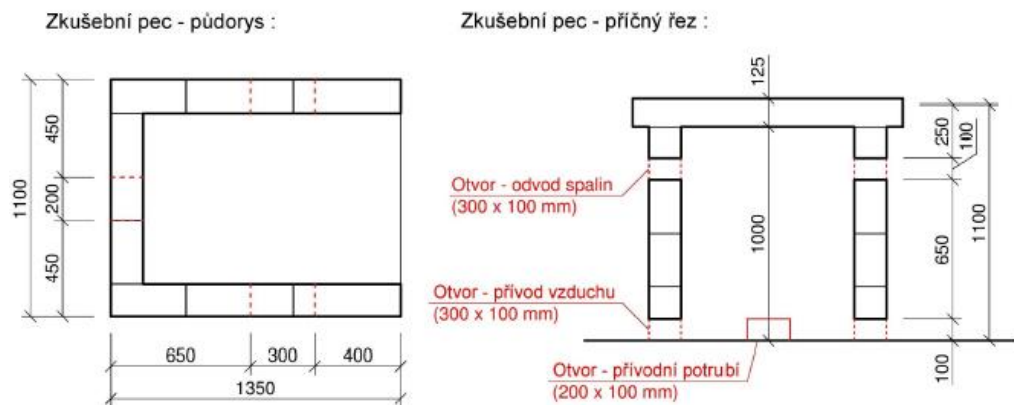
Pec je určena pro zkoušení požární odolnosti svislých nenosných prvků o rozměrech exponované části konstrukce 0,8 x 1,0 m. Jedná se tedy přibližně o 10 % plochy, která je vystavená požáru při velkorozměrových zkouškách. Dále pak je možné zkoušet požární odolnost vodorovných prvků o rozměrech exponované části konstrukce 1,2 x 0,8 m.

Obvodové konstrukce pece jsou tvořeny ze zdiva z pórobetonových tvárníc PORFIX P2-500, stropní konstrukce je z pórobetonových překladů Ytong P4,4-600. Celková délka pece je 1,35 m, šířka 1,1 m, výška 1,125 m. Vnitřní rozměry navržené pece jsou délka 1,2 m, šířka 0,8 m výška 1,0 m (obr. 12).



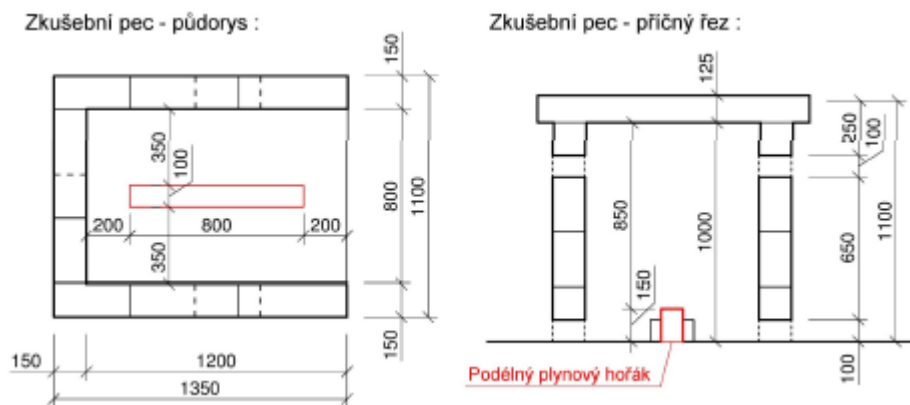
obr. 12 Rozměry pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22]

Otvory pro přívod vzduchu a odvod spalin je navržený na bočních stranách pece. Otvory jsou umístěny ve středu boční stěny, přičemž první otvor (přívod vzduchu) je umístěný na podlaze a druhý otvor (odvod spalin) je navržený 150 mm pod stropem. Rozměry otvorů jsou o velikosti 300x100 mm, aby respektovaly vazbu tvárníc. Dále byl vytvořen otvor 200x100 mm v zadní části pece pro přívod potrubí plynového hořáku (obr. 13).



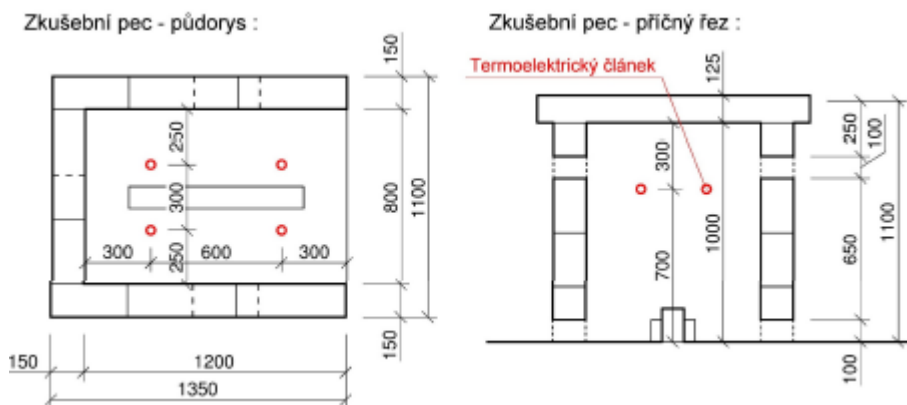
obr. 13 Umístění otvorů v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22]

Vnitřní prostor pece je ohříván pomocí podélného plynového hořáku o délce 1200 mm, šířce 100 mm a výšce 150 mm. Aby nedocházelo k akumulaci tepla v přední a zadní části pece, je hořák zakryt nehořlavou izolací v délce 200 mm ze dvou stran. Výsledná délka hořáku je tedy 800 mm a je umístěný na střed pece (obr. 14). U plynového hořáku je uvažováno palivo propanbutan.



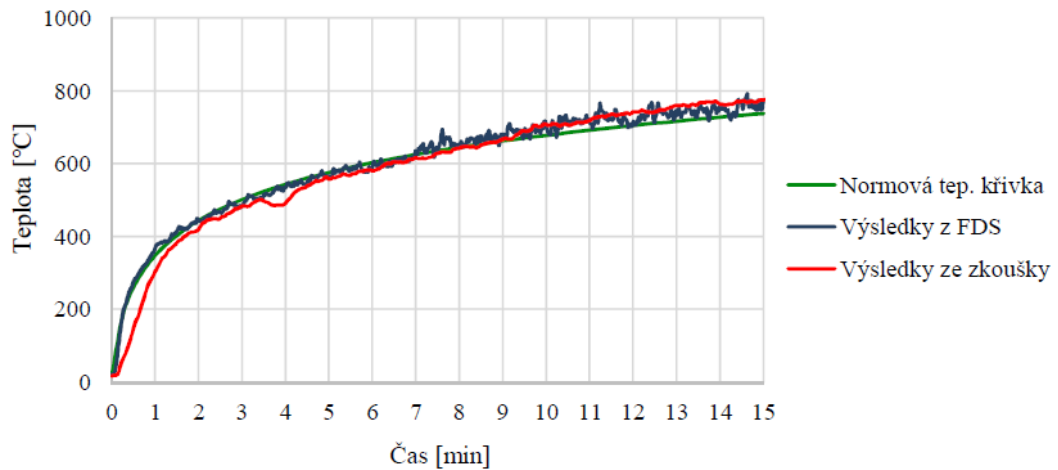
obr. 14 Umístění hořáku v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22]

V peci jsou navrženy čtyři elektrické termočlánky přibližně ve 2/3 výšky pece a symetricky umístěné nad plynovým hořákem a dostatečně daleko od obvodové konstrukce, aby nemohlo docházet k ovlivňování teploty od konstrukce (obr. 15).



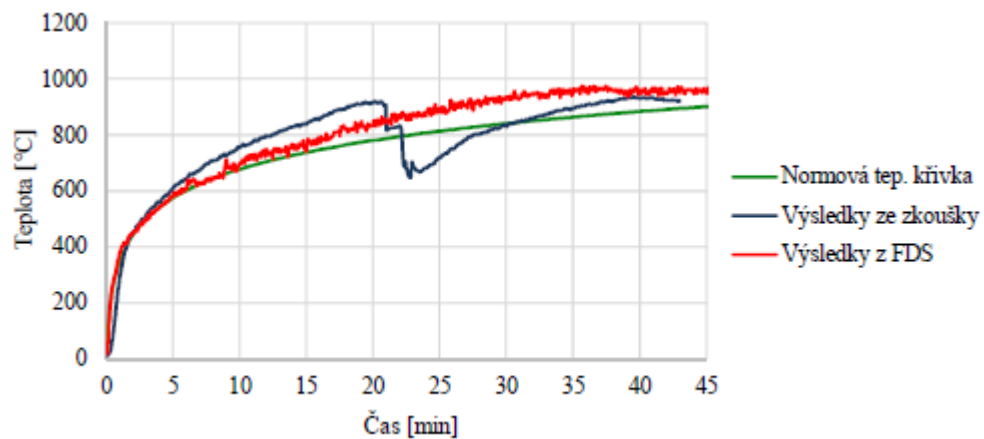
obr. 15 Umístění termočlánků v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22]

Pro ověření funkčnosti pece proběhla referenční zkouška, kdy přední otevřená část byla uzavřena vyzdívkou z pórobetonových tvárníc a byla porovnána s FDS simulací, aby byla ověřena funkčnost pece. Výsledky teplot z FDS simulace a referenční zkoušky byly porovnány s nominální teplotní křivkou (obr. 16). Výsledky průběhu teplot jsou téměř totožné a pec se jeví jako validní.



obr. 16 Porovnání teplot při referenční zkoušce v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22]

V rámci diplomové práce byla provedena zkouška požární odolnosti dřevěné obvodové stěny s vnitřním opláštěním ze sádrovláknitých desek na výše popsané peci. Přední část pece byla zcela uzavřena zkoušeným vzorkem. Nejdříve byl vytvořen CFD model za účelem návrhu výkonu plynového hořáku a ověření teplot uvnitř zkušební pece. Teploty byly nastaveny tak, aby průměrná teplota odpovídala nominální teplotní křivce ISO 834. Následně byla provedena zkouška požární odolnosti. Původním návrhem bylo ověření požární odolnosti po dobu 60 minut, avšak došlo k přerušení zkoušky již ve 22. minutě z důvodu systémového nastavení, po opětovném spuštění zkoušky byla ukončena definitivně ve 44. minutě opět z důvodu systémového nastavení (obr. 17). Přerušení zkoušky se promítlo do výsledků, avšak výsledky se jeví celkem dobré i při problémech v průběhu zkoušky.



obr. 17 Porovnání teplot při zkoušce požární odolnosti v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na ČVUT UCEEB [22]

V požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze proběhla dne 8.3.2108 požární zkouška na výše popsané peci. Firma AVAPS s.r.o chtěla porovnat vhodnost více druhů nové varianty švů na požární roletě a ve spolupráci s UCEEB ČVUT v Praze zrealizovala požární zkoušku (obr. 18). Při požární zkoušce se projeví určité nedostatky pece. Nevýhodou pece je, že se pec musí před každou zkouškou postavit a následně demontovat, materiál odvézt a uskladnit. Což se

jeví jako nevýhoda zejména z důvodu časové náročnosti. Pórobetonové tvárnice se drolily a nelze s nimi zkoušku pravidelně provádět. Dále nešlo zajistit dokonalé utěsnění spár konstrukce pece, takže docházelo k přívodu vzduchu a odvodu spalin i v místech, kde to nebylo navrženo

a předpokládáno. Jako největší problém se jevílo navržené řešení překrytí hořáku minerální izolací, kdy došlo v průběhu zkoušky k samovolnému posunu a oheň šlehal přímo na zkoušený vzorek do místa, kde byl umístěn jeden ze zkoušených švů (obr. 19). To mohlo mít kritický dopad na výdrž švu a vést ke špatné interpretaci výsledků zkoušky.



obr. 18 Průběh zkoušky vzorku textilní rolety, zdroj: AVAPS, s.r.o.



obr. 19 Vzorek textilní rolety po zkoušce, zdroj: AVAPS, s.r.o.

5.3 Worcester Polytechnic Institute, USA

Jedná se o malorozměrovou pec vytvořenou na fakultě Worcester Polytechnic Institute (dále jen WPI) ve Spojených státech amerických (obr. 20). Pec byla vyvinuta v rámci závěrečné práce doktorského studia [23].



obr. 20 WPI pec [23]

Pec je navržena tak, aby umožňovala zkoušení svislých prvků a odpovídala standardům pro testování konstrukcí a materiálů dle ASTM E119. Teplotní křivka podle normy ASTM E199 se mírně liší od nominální teplotní křivky ISO 834 využívané v ČSN EN 1363. Křivka ASTM E199 je charakterizována rovnicí $T=T_0+750(1-e^{-3,79553*\sqrt{t}})+170,41*\sqrt{t}$, kde t =čas v hodinách [24], zatímco teplotní křivka ISO 834 $T=T_0+345\log(8t+1)$, kde t = čas v minutách [19]. Rozdílné teploty (tab. 7) křivek nejsou nikterak výrazné, zvláště pokud se jedná o předběžné testování při malorozměrových zkouškách.

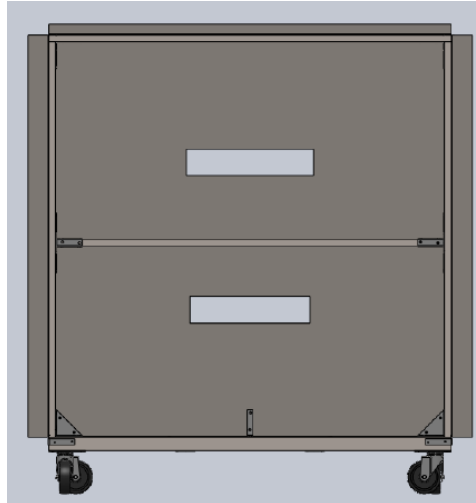
tab. 7 Rozdílné teploty teplotní křivky ASTM E199 a ISO 834

Čas (min)	Teplota dle ASTM E 199 (°C)	Teplota dle ISO 834 (°C)
0	20	20
5	538	576
10	704	678
30	843	842
60	927	945
120	1010	1049
240	1093	1153
480	1260	1257

Konstrukce pece se skládá z několika integrovaných částí, které slouží k vytvoření vnitřního prostředí, aby bylo dosaženo požadovaných teplot při standardním testování. Zařízení pece se skládá z dvou hlavních složek – ocelového rámu a vnitřní izolace. Ocelový rám je konstruován z duté konstrukční oceli a ocelových plechů. Tepelná izolace ohraničuje vnitřní část rámu, aby udržela teplo a vytvořila vnitřní prostředí s vysokou teplotou. Vnitřní rozměry pece jsou délka 1220 mm, šířka 910 mm a výška 1220 mm.

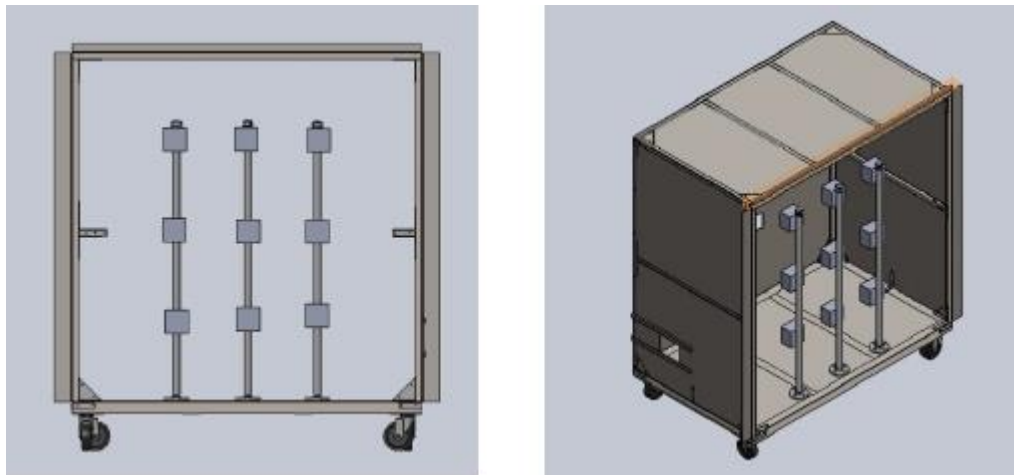
V peci je navržený systém automatického dávkování, jenž kombinuje nucený přívod vzduchu a plynu do hořáku tak, aby odpovídala určené křivce. Teplotní zařízení obsahuje ventilátor s proměnlivou rychlostí, který přivádí vzduch do hořáku a plynovod, který dodává systému palivo (typicky zemní plyn nebo propan). Vhodné kombinace je dosaženo připojením výše zmíněného systému na měřící termočláanky, který na základě naměřené teploty upravuje

system proudění vzduchu a vstup paliva. Je navržený plynový hořák o výkonu 200 kW s rozdělovačem na vícenásobné hořáky, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení teploty. Hořáky jsou umístěny na protější stěně určené pro osazení zkušební vzorku, jedná se o dva hořáky umístěné 250 mm nad sebou. Otvory pro hořáky jsou šířky 300 mm a výšky 100 mm (obr. 21).



obr. 21 Otvory pro hořáky WPI pec [23]

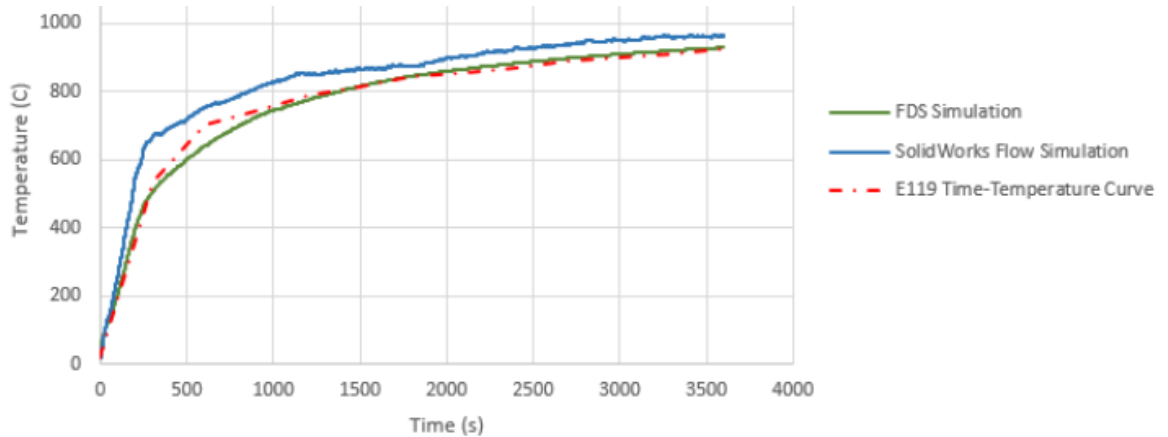
Pro výpočet přenosu tepla a ovládání pece (hořáku) bylo navrženo 9 deskových snímačů teploty (plate thermometer dále jen PT). PT jsou schopny lépe zaznamenávat přesnější data než termočlánky, konkrétně umožňují přesnější měření tepelného toku. PT mají také malou tepelnou setrvačnost, což umožňuje lépe regulovat teplotu v peci. PT byly umístěny 100 mm (4 palce) od stěny pro umístění zkušební vzorku, aby nedošlo k případnému poškození (obr. 22).



obr. 22 Umístění PT WPI pec [23]

Aby nedošlo k přetlaku vedoucímu k poškození pece a byly zajištěny bezpečné podmínky, jsou do pece instalovány dva tlakoměry. První je umístěn v horní části pece a druhý v dolní tak, aby bylo možné měření diferenciálního tlaku. Tlakoměry jsou napojeny na software LabVIEW, aby mohly být hodnoty zaznamenávány v reálném čase a v případě potřeby byl test včas zastaven.

Pro navrženou pec byl vytvořen CFD model a proveden výpočet v SOLIDWORKS Flow Simulation a FDS. Následně byly simulované teploty porovnány s teplotní křivkou ASTM E199 (obr. 23). U obou simulací po většinu času přesahuje teplota teplotní křivku, přesah však není nikterak významný a výsledky se jeví uspokojivě.

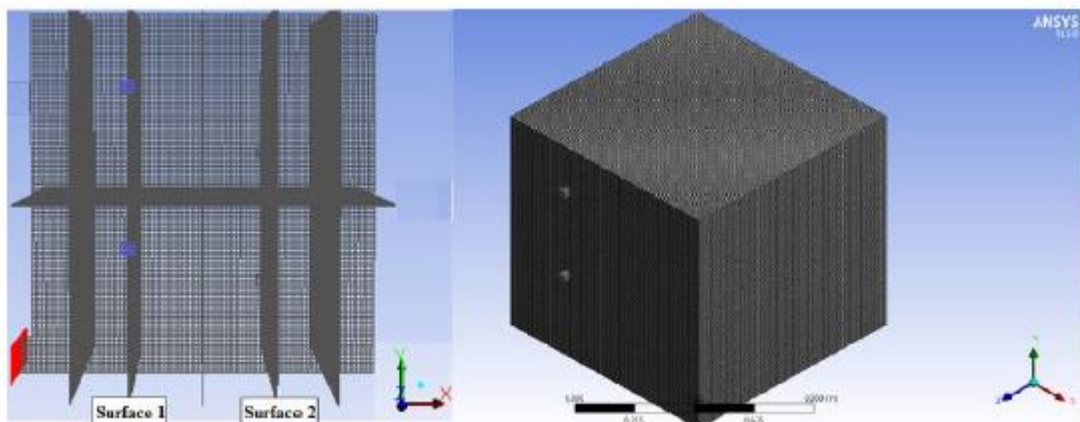


obr. 23 Porovnání teplot za použití CFD modelů WPI pec [23]

Jedná o velmi dobrou variantu pro malorozměrové zkoušky, jediná nevýhoda pro širší použití je ve velmi složitém systému řízení teploty v peci. V případě, že by chtěla širší odborná veřejnost využít tuto pec, musela by vynaložit nemalé úsilí na sestavení důmyslného systému řízení teploty.

5.4 Koceali University, Turecko

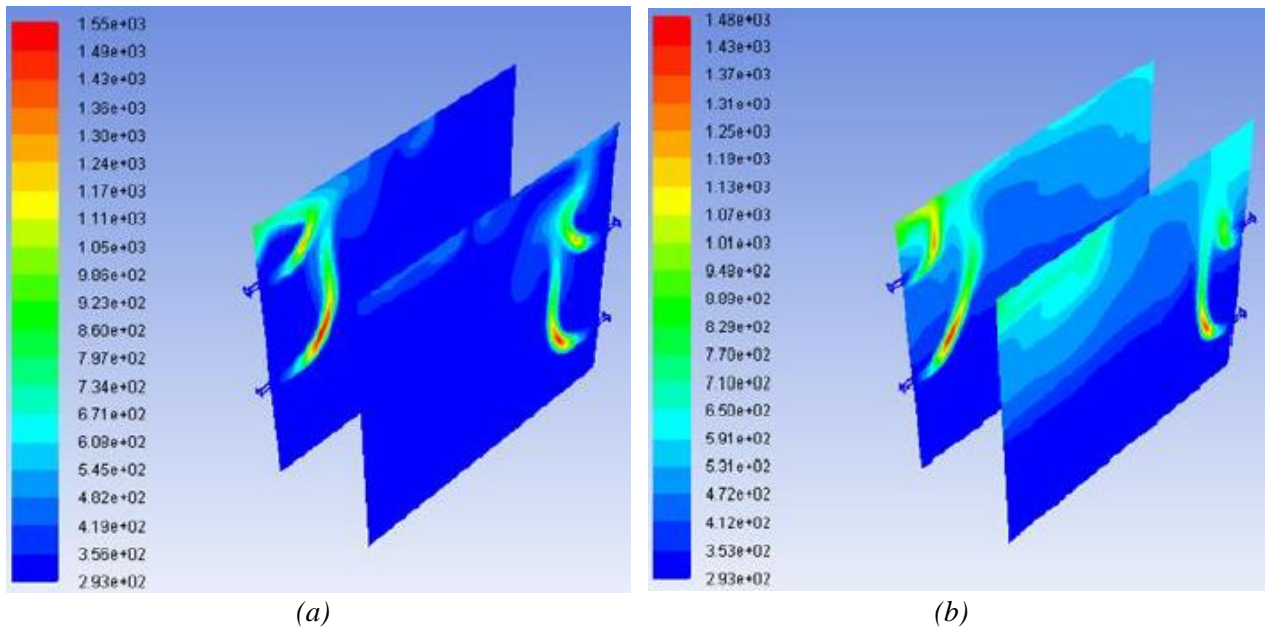
Jedná se o matematický model pece určený pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti vyvinutý na universitě Koceali v Turecku. Pec je modelována tak, aby korespondovala s normou TS EN 1363-1 a průběh teplot odpovídal nominální teplotní křivce ISO 834. Zdrojový kód pece je napsán v CFD a pro výpočet byl použit program ANSYS Fluent. Zkušební pec je o vnitřním rozměru 1 m³ a výpočtová síť je tvořena 1 032 361 buňkami (obr. 24) [25].



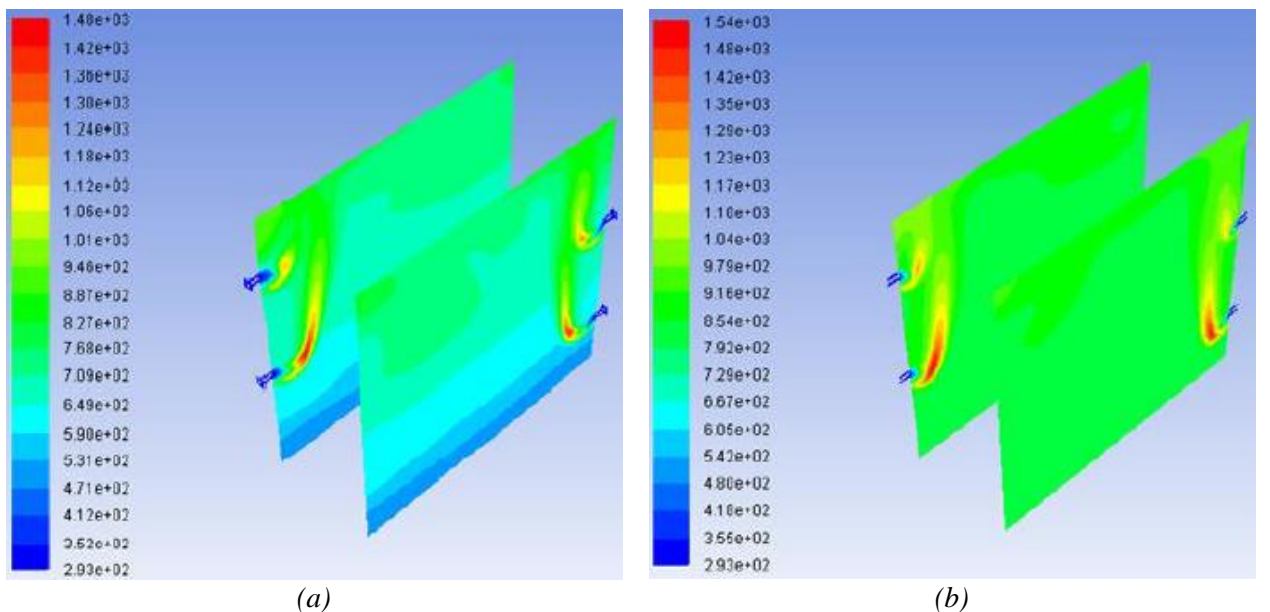
obr. 24 Pec Koceali; modrá část – hořáky; červená část – otvor na odvod spalin [25]

Pro ohřev pece byly zvoleny čtyři plynové hořáky s jedním odvodem spalin. Jako palivo byl použit propan v kombinaci s nuceným přívodem vzduchu. Hořáky byly umístěny na

protějších stranách vždy ve dvojicích nad sebou (obr. 24). Odvod spalin je umístěný v dolní části (obr. 24). Na začátku probíhala akumulace tepla v horní polovině pece (obr. 25 a, b), po 30. sekundě teplota uvnitř pece začala být homogenní (obr. 26 a, b).



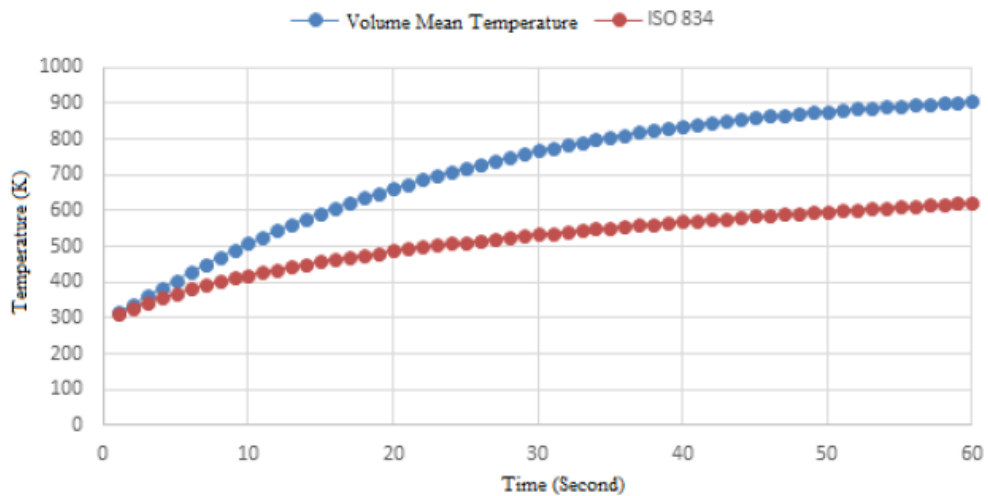
obr. 25 Teplota v peci Koceali: (a) v 1. sekundě; (b) v 5. sekundě [25]



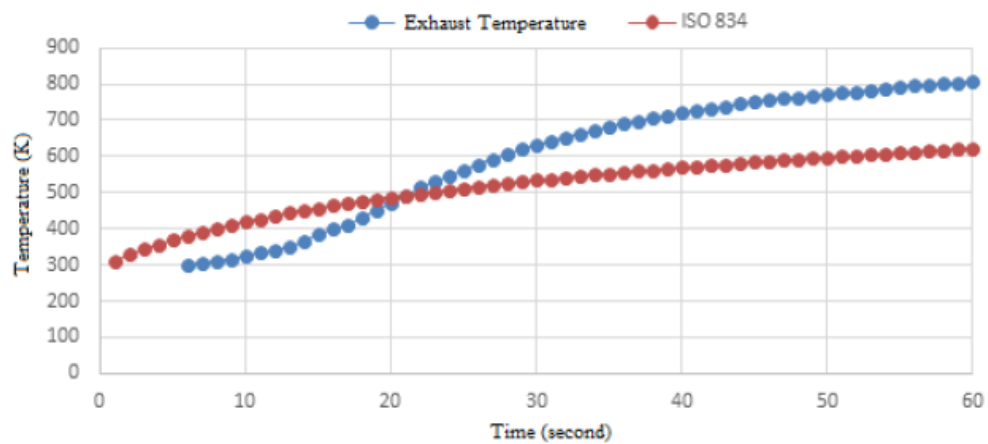
obr. 26 Teplota v peci Koceali: (a) ve 20. sekundě; (b) ve 40. sekundě [25]

Vnitřní teplota pece byla porovnána s nominální teplotní křivkou ISO 834 (obr. 27), teploty byly měřeny po dobu 60 sekund po časovém kroku 0,01 sekund. Průměrná teplota uvnitř pece byla od začátku vyšší, než se požaduje podle nominální teplotní křivky ISO 834 a s přibývajícím časem je rozdíl markantnější. Důvodem bylo, že uvnitř pece bylo mnohem více energie, než se přepokládalo. Následkem toho proběhlo zkoumání teploty plynů odváděných otvorem, kde bylo zjištěno, že během prvních 21 sekund byla teplota plynů nižší než teplota

podle ISO 834 (obr. 28). To způsobilo, že spalovací produkty zanechávaly více energie uvnitř pece.



obr. 27 Porovnání teplot v peci Koceali [25]

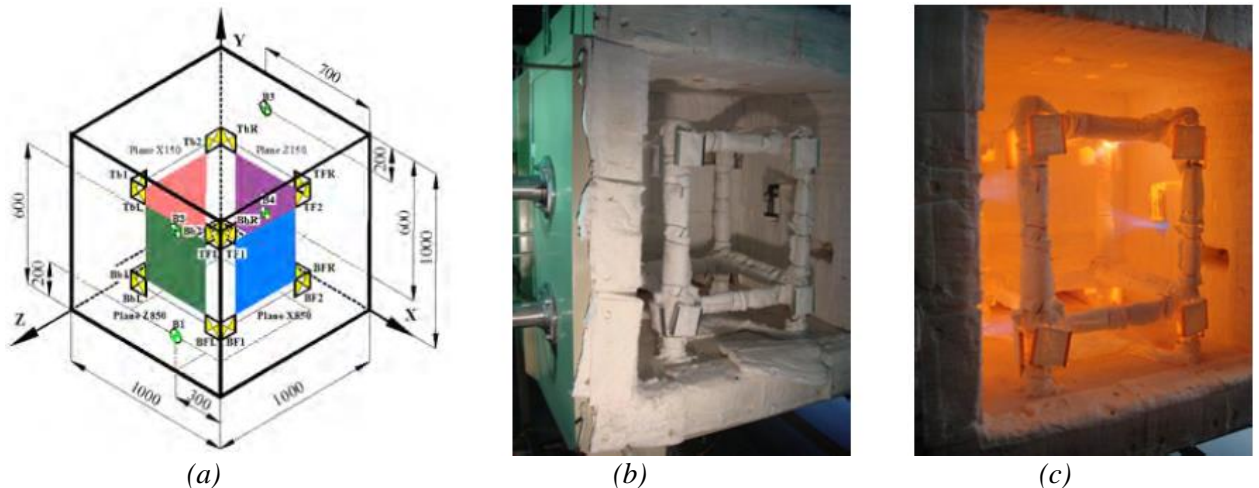


obr. 28 Porovnání teplot výfukových plynů v peci Koceali [25]

U pece byl zatím vytvořen pouze CFD model (dle zjištěných podkladů) a lze těžko předpokládat širší využití. Měla by být provedena další studie k přiblížení teplot ke křivce ISO 834 a provedena validace, aby mohla být použita v širším měřítku zkoušení požární odolnosti.

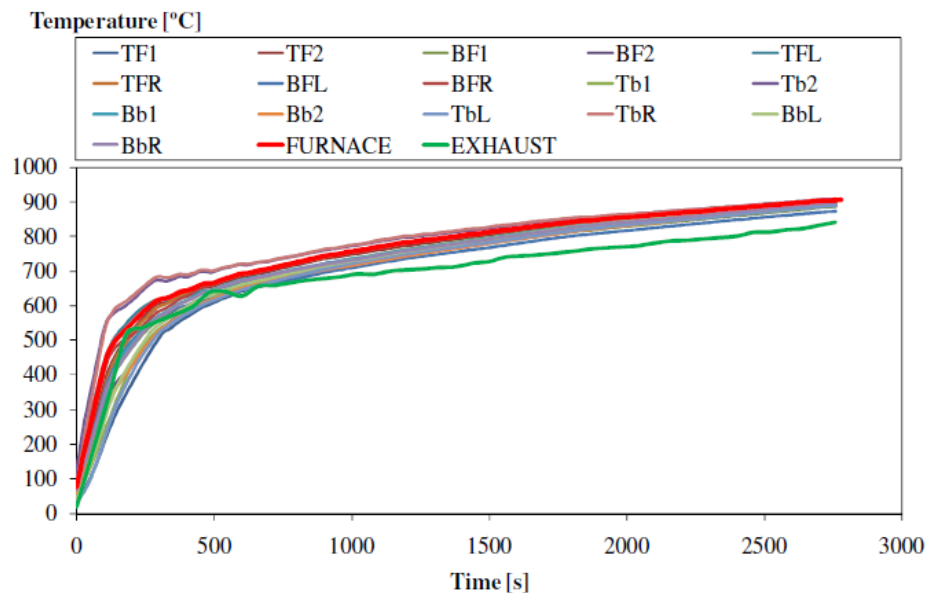
5.5 Instituto Politécnico de Bragança, Portugalsko

V laboratořích polytechnické instituce v Bragançe (dále jen IPB) byla vytvořena výzkumná práce, přičemž cílem této práce bylo zjistit požadované teploty uvnitř zkonstruované pece pomocí deskových snímačů teploty (PT). Celkem proběhly tři požární zkoušky, kde u prvních dvou proběhlo porovnání teplot s křivkou ISO 834 po dobu 45 minut a ve třetí porovnání s uhlovodíkovou křivkou po dobu 30 minut. Tato pec je navržena v souladu s EN 1363-1. Zkušební pec je o vnitřním rozměru 1 m³, má 4 plynové hořáky na propan s maximálním výkonem 90 kW. V peci je umístěno 16 PT na ocelové konstrukci (obr. 29 a, b, c) [26].



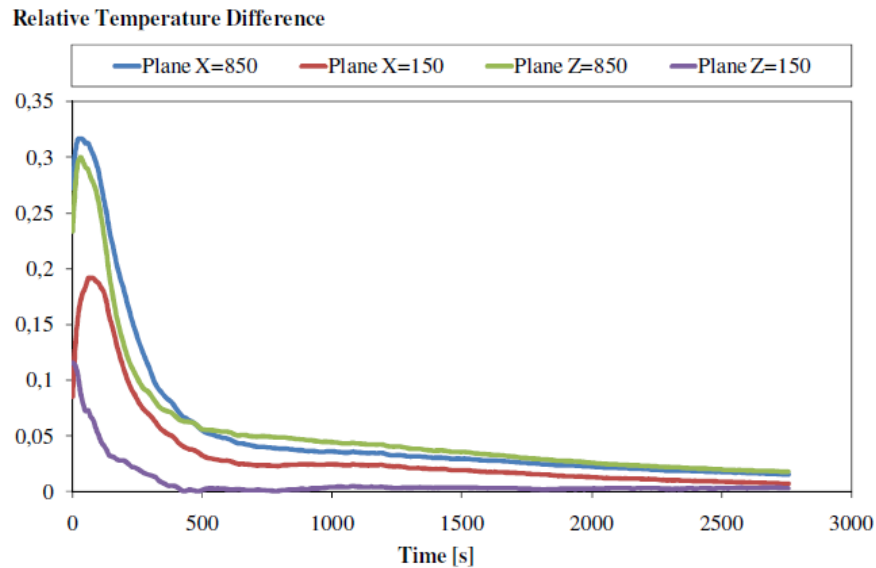
obr. 29 Pec IPB: (a) model pece se čtyřmi hořáky; (b) geometrické pozice pro deskové snímače teploty uvnitř pece; (c) pec s otevřenou stěnou po skončení požární zkoušky č.3 [26]

PT byly umístěny ve čtyřech rovinách, na kterých byly porovnány hodnoty s nominální teplotní křivkou. Výsledné naměřené teploty byly porovnány s nominální teplotní křivkou (obr. 30).



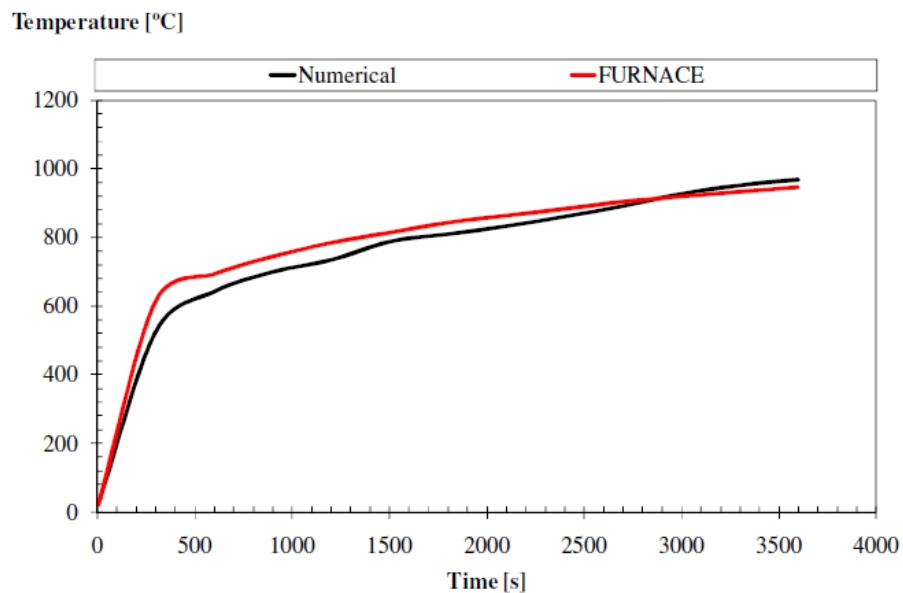
obr. 30 Porovnání naměřených teplot při 1. experimentu s ISO 834 [26]

Z naměřených hodnot při požárních zkouškách se zjistilo, že průměrná odchylka teplot v prvních 60 sekundách je maximálně 30 % oproti referenční křivce. Po uplynutí 500 sekund se tento rozdíl snížil na méně než 5 %. Výsledné teploty byly vždy porovnány s průměrnou hodnotou ze 4 PT v jedné rovině (obr. 31).



obr. 31 Rozdíly průměrných teplot od ISO 834 [26]

Matematická simulace CFD byla provedena v softwaru ANSYS Fluent. Výpočetní síť byla sestavena ze 125 840 buněk s rozměry 200x200x200 mm. Pro pohyb a reakci chemických látek byl použit Eddy Dissipation Model. Výsledky simulace byly následně srovnány s experimentálně změřenými daty. Výsledný rozdíl se nelišil o více jak 10 % (obr. 32).



obr. 32 Porovnání teplot numerické simulace a experimentu [26]

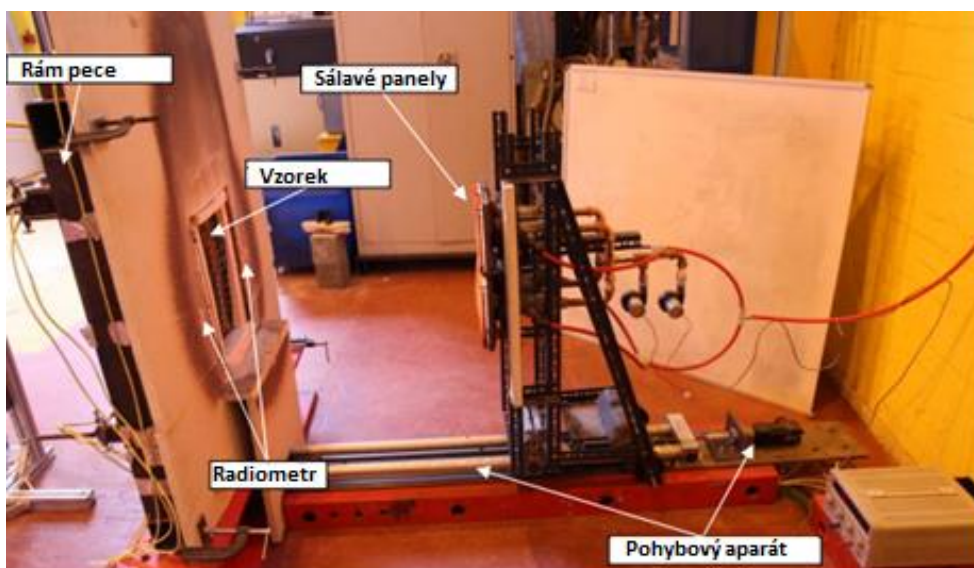
Výsledky z provedených testů jsou velmi dobré, vnitřní teplota v peci se zanedbatelně odchyluje od nominální teplotní křivky ISO 834 a jeví se jako vhodná pro předběžné testování požární odolnosti v malém měřítku.

5.6 Heat-Transfer Rate Inducing System

Jedná se o novou metodu testování požární odolnosti vyvinutou na univerzitě v Edinburghu a Queenslandu. Metoda testuje požární odolnost pomocí Heat-Transfer Rate Inducing System

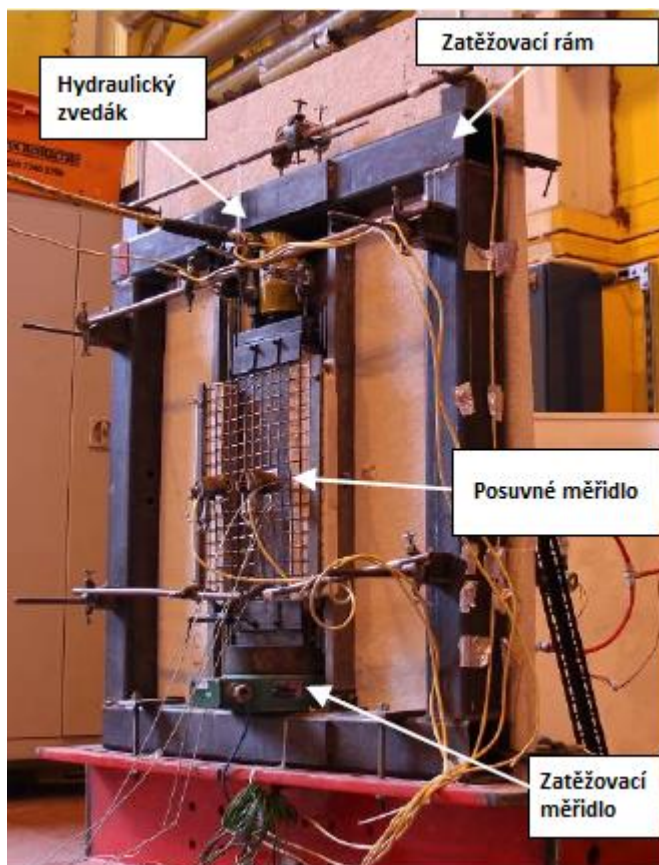
(dále jen „H-TRIS“), oproti klasickým zkouškám se jedná o specifický systém testování požární odolnosti. Na základě této metody byla vyrobena malorozměrová pec, která by tyto zkoušky umožňovala. Při standardním testování požární odolnosti je prvek zahříván podle křivky teplota-čas. V metodě H-TRIS jsou klasické teplotní křivky nahrazeny teplotní křivkou tepelný tok-čas [7, 27].

Zkušební metoda H-TRIS je založena na použití mobilních vysoce výkonných sálavých panelů s mechanickým lineárním pohybovým systémem. Výkon sálavých panelů je konstantní, přičemž tepelné zatížení dopadající na zkoušený vzorek je automaticky řízeno pomocí naměřeného tepelného toku ze dvou snímačů. Jako palivo sálavých panelů je použit propan. Snímače jsou umístěny na exponované straně vzorku a pomocí softwaru, který řídí v reálném čase lineární pohybový aparát tak, aby vzdálenost umístění sálavých panelů od zkoušeného vzorku odpovídala absorbovanému tepelnému toku dle předem definované křivky tepelný tok-čas. Pec dle metody H-TRIS je znázorněna na obr. 33 [7, 27].



obr. 33 Heat-Transfer Rate Inducing System (H-TRIS) [7]

Pec slouží pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti, především k testování betonových vzorků. Oproti standardním testům mohou být vzorky umístěny do speciálně navrženého mechanického rámu, který je schopen napodobit mechanické namáhání konstrukčních prvků nebo sestav v reálných budovách (obr. 34). To je zvláště důležité pro testování materiálů jako např. vysokopevnostní beton, který má sklony k odprýskávání pod tlakem během požáru. H-TRIS umožňuje kompletní experimentální studie s vynikající opakovatelností s nízkými náklady a časovou úsporou v porovnání s tradičními zkušebními metodami, což umožňuje více opakování testů a vyvinout stochastické pochopení reakce zkoušeného materiálu na zvýšenou teplotu [7, 27].



obr. 34 Mechanický rám (H-TRIS) [7]

6 Návrh pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti

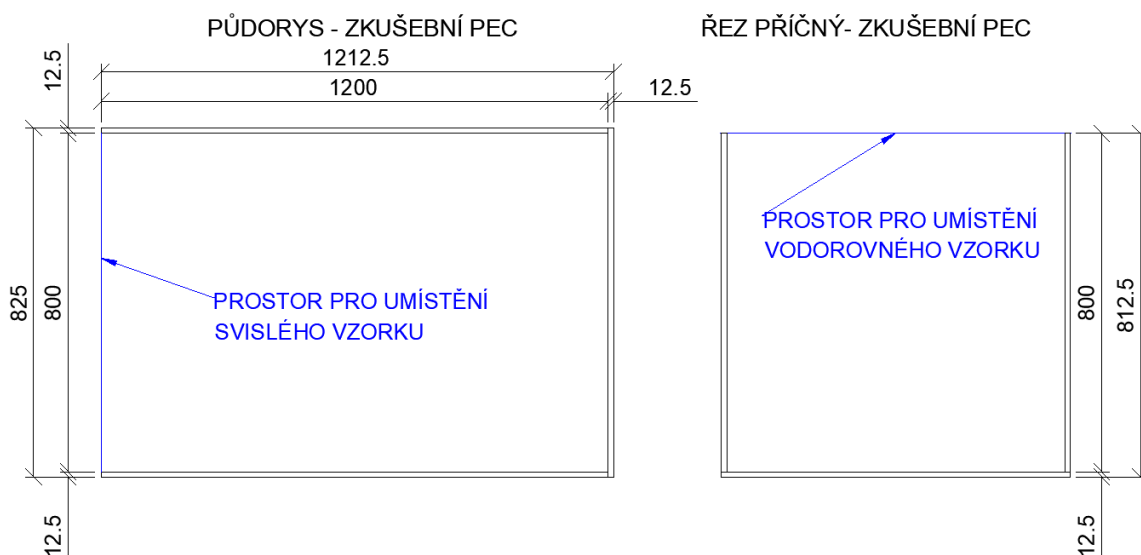
Tato kapitola diplomové práce se bude zabývat návrhem zkušební pece pro předběžné ověřování požární odolnosti v malém měřítku. Pec bude sloužit pro ověřování požární odolnosti svislých, či vodorovných prvků. Návrh zkušební pece vychází z požadavků normy ČSN EN 1363-1.

Úkolem diplomové práce je navrhnout pec, z které by získané výsledky požární odolnosti odpovídaly co nejpřesněji zkoušce požární odolnosti prováděné v akreditované zkušebně. Nejdůležitějším bodem při návrhu pece je, aby korespondovala s nominální teplotní křivkou ISO 834. Z tohoto požadavku se odvíjí dimenzování otvorů pro přívod vzduchu a odvod spalin, nastavení tepelného výkonu plynového hořáku a rozložení termoelektrických článků. Při návrhu pece je přihlédnuto k tomu, aby pec mohla být použita vícekrát bez nutnosti pec na každou zkoušku stavět a po zkoušce rozebírat. Pec je navržena jako mobilní.

6.1 Rozměry zkušební pece

Rozměry pece nejsou dle normy ČSN EN 1363 nikterak definovány. Požadavek normy je pouze, aby zkušební vzorek odpovídal rozměrům 3,0 x 3,0 m. Důležitým parametrem při návrhu rozměrů zkušební pece je její hloubka, která má vliv na teploty uvnitř pece. Při zkoumání vlivu hloubky pece na její vnitřní teplotu, se ukázalo, že při zvětšující se hloubce pece, se vnitřní prostředí stalo jednotnější. Prokázalo se taky, že dochází ke snížení lokálních teplotních účinků na zkušební vzorek a opětovného záření tepla zpět od konstrukcí pece. Experimentální zkoušky vlivu hloubky pece na její vnitřní teplotu probíhaly v pecích s hloubkou 0,6 m, 1,2 m a 1,5 m [28].

Navržená zkušební pec pro malorozměrové zkoušky je o vnitřních rozměrech délky 1,2 m, šířky 0,8 m a hloubky 0,8 m. Výsledné rozměry pece vychází z požadavku požární laboratoře na UCEEB ČVUT v Praze, aby pec odpovídala 1/3 velikosti zkušebního zařízení Room Corner Test, který umožňuje testovat náchylnost povrchových úprav (výrobků) k rozvoji požáru a také lze stanovit reakci na oheň. Výsledné rozměry pece jsou znázorněny na obrázku (obr. 35). Na navržené peci lze tedy testovat svislé prvky na požární odolnost o rozměrech exponované části šířky 0,8 m a výšky 0,8 m, což odpovídá přibližně 5 % plochy při zkoušce v akreditované zkušebně. Dále pak vodorovné prvky o vnitřních rozměrech 1,2 x 0,8 m.



obr. 35 Rozměry zkušební pece

6.2 Materiál zkušební pece

Zkušební pec musí být postavena z nehořlavých materiálů dle normy ČSN EN 1363, dále musí být materiál o objemové hmotnosti menší než 1000 kg/m^3 a s minimální tloušťkou 50 mm. S vlastnostmi materiálů výše zmíněných musí být alespoň 70 % vnitřního povrchu pece. Při návrhu pece je uvažováno s nehořlavým materiálem, s přihlédnutím k objemové hmotnosti a procentuálnímu zastoupení materiálu.

Důležitou součástí při návrhu materiálu jsou tepelně technické vlastnosti zvoleného materiálu. Minimálně musí být známy tepelně technické vlastnosti jako součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita a objemová hmotnost. Uvedené vlastnosti musí být známy pro analýzu přestupu tepla do ohraničujících konstrukcí. Tepelné vlastnosti by měly být známy v rozmezí teplot, kterým se předpokládá, že materiály budou vystaveny. Přesné definování těchto vlastností při zvyšující se teplotě pomůže k přesnějším výsledkům. Nicméně tepelné vlastnosti je obtížné získat pro materiály, které během vystavení vysokých teplot ztrácejí hmotnost buď ztrátou vlhkosti nebo degradací materiálu. [24, 28].

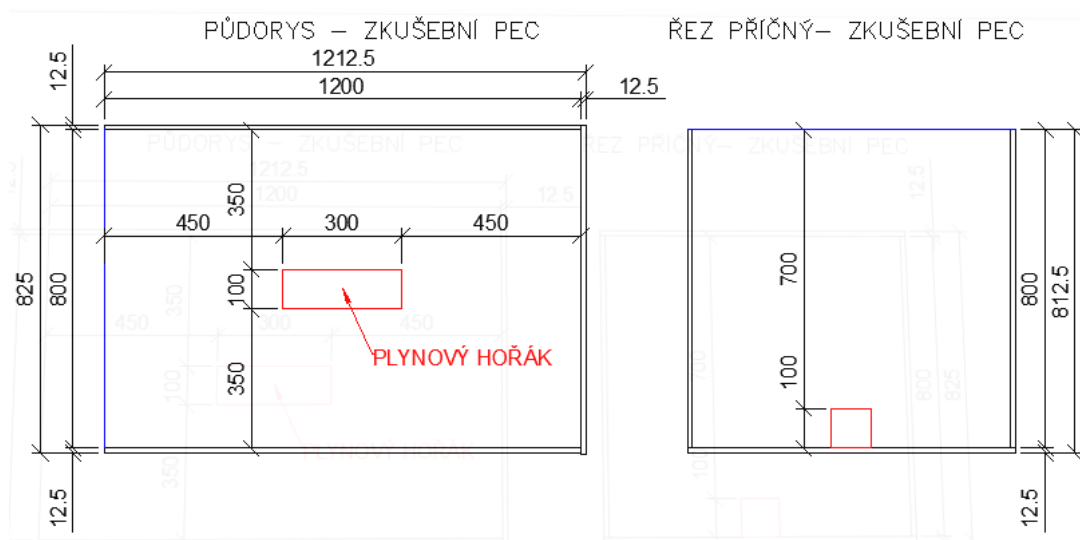
Na základě výše zmíněných požadavků je pec navržena z cementem pojené betonové desky se sendvičovou strukturou a povrchovými vrstvami oboustranně vyztuženými skelnou tkaninou. Jedná se o stavební desky Farmacell Powerpanel H₂O tloušťky 12,5 mm, desky jsou třídy reakce na oheň A1. Tepelně technické vlastnosti desky jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 8) [29].

tab. 8 Tepelně technické vlastnosti desky Farmacell Powerpanel [29]

Objemová hmotnost	1000 kg/m^3
Měrná tepelná kapacita	$1,0 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
Součinitel tepelné vodivosti	$0,17 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ při 20°C

6.3 Teplota v peci – plynový hořák

Pro dosažení požadovaných teplot v peci je navržený plynový hořák o délce 300 mm, šířce 100 mm a výšce 100 mm. Hořák je umístěn do středu pece pro zajištění rovnoměrného ohřevu vnitřního prostředí (obr. 36). Při návrhu umístění hořáku je přihlédnuto k tomu, aby nedocházelo k lokálnímu působení účinků tepla na zkoušenou konstrukci. Jako palivo plynového hořáku slouží propan.

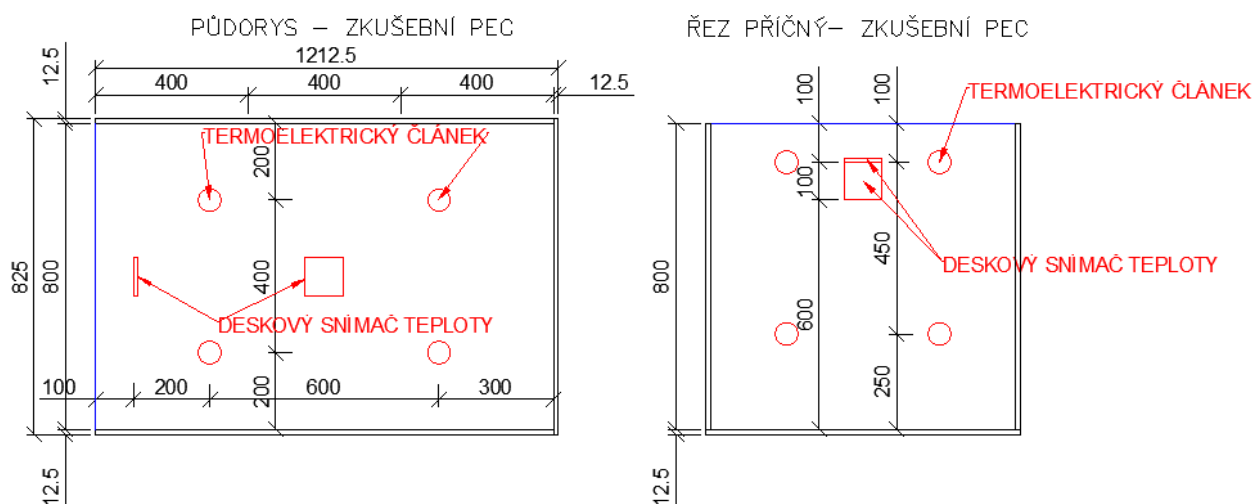


obr. 36 Umístění hořáku ve zkušební peci

6.4 Termočlánky

Rozmístění termočlánků by mělo být rovnoměrně v celém prostoru pece, aby mohla být co nejpřesněji měřena teplota v celém objemu pece. Navržené rozmístění by mělo být dostatečně vzdálené od plamenu hořáku a obvodové konstrukce, která by mohla ovlivňovat měřenou teplotu. Dále by mělo být uvažováno s možností potenciálního poškození v případě selhání konstrukce. Termočlánky by měly být umístěné minimálně 100 mm od vzorku a okrajů konstrukcí [28].

Pro měření teploty uvnitř pece bylo umístěno 8 termoelektrických článků typu K o průměru 3 mm, čtyři termoelektrické články v horní polovině pece a čtyři v dolní polovině. Dále byl umístěn vždy jeden deskový snímač teploty před vodorovný a svislý zkoušený vzorek. Přesná poloha umístěných termočlánků je zakreslená na obr. 37.

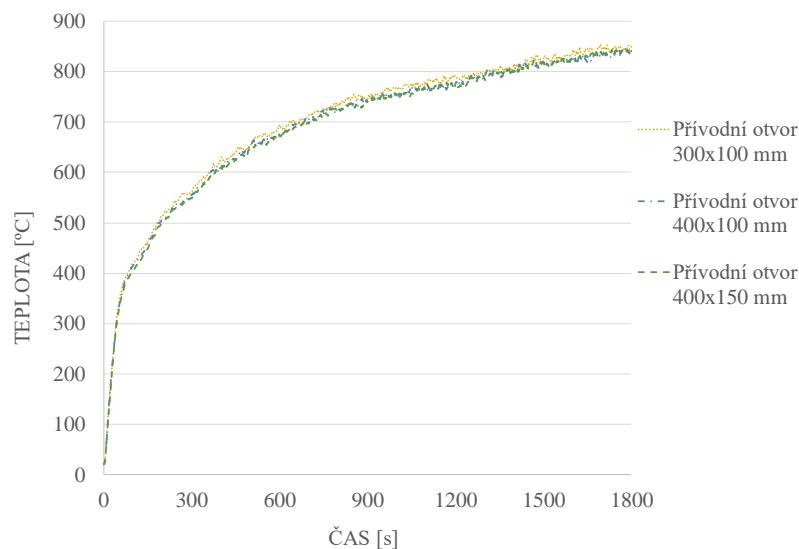


obr. 37 Umístění termočlánků ve zkušební peci

6.5 Ventilace ve zkušební peci

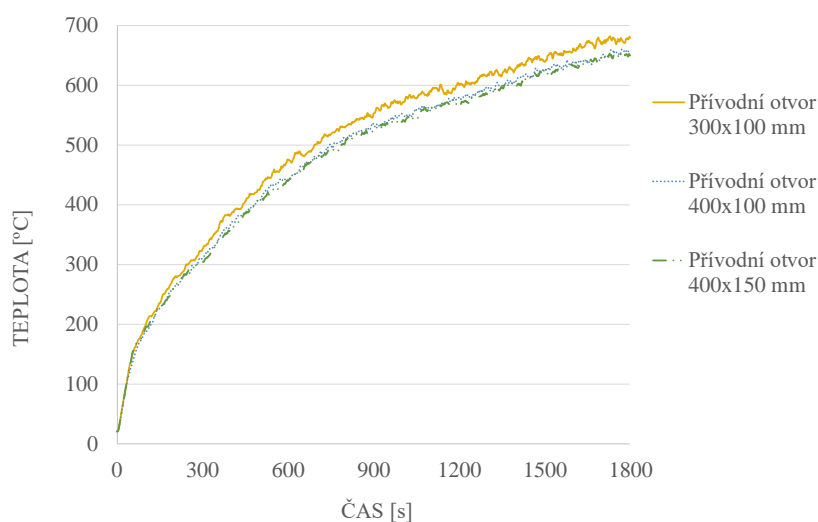
Dalším důležitým bodem při návrhu zkušební pece jsou otvory pro přívod vzduchu a odvod spalin hoření. Hoření v peci uvolňuje velké množství tepla, které způsobuje expanzi zahřátého plynu. V případě, kdyby nebyly umístěny otvory pro odvod horkých plynů, mohlo by dojít k přetlaku a roztrhnutí konstrukcí. Z tohoto důvodu je v normě ČSN EN 1363-1 také uveden požadavek na tlak uvnitř pece, který musí být dodržen při akreditované zkoušce požární odolnosti. Tento požadavek však v případě návrhu pece z technických důvodů zanedbáváme. Koncentrace kyslíku v peci by měla být při zkoušce více jak 6 %, což umožňuje při zkoušce požární odolnosti oxidaci uhlíku, která vede k rychlejšímu rozkladu materiálu. Tento jev může mít zásadní vliv na požární odolnost zkoušeného materiálu. Je tedy nutné navrhnout otvory pro zajištění dostatečného přívodu vzduchu a otvory pro odvod spalin. Aby byl využit maximálně komínový efekt, měl by být otvor pro odvod spalin umístěn co nejvýše a přívodní otvory čerstvého vzduchu pod vrstvou horkých plynů. Plocha, která slouží pro přívod vzduchu se dimenzuje jako jeden až dvojnásobek plochy, kterou odvádíme spaliny. Pokusy o vytvoření přívodních otvorů větších než dvojnásobek odvodních vedou k zanedbatelnému účinku [16, 28, 30].

Otvory byly navrženy na bočních stranách pece na středu. Na bočních stranách byly navrženy vždy dva otvory, jeden otvor pro přívod vzduchu a jeden pro odvod spalin. Otvor pro přívod vzduchu je umístěn u podlahy a otvor pro odvod spalin 150 mm pod stropem. V rámci optimalizace větrání byly provedeny 3 výpočty s různými velikostmi přívodních otvorů. U všech třech simulací je zvolený otvor na odvod spalin 300x100 mm. V první simulaci je přívodní otvor shodný s odvodovým o rozměrech 300x100 mm, v druhé 400x100 mm a ve třetí 400x150 mm. Všechny simulace probíhají za stejných podmínek pouze se změnou přívodních otvorů, z grafu (obr. 38) je vidět, že velikost přívodních otvorů v našem případě nemá téměř žádný vliv na průměrnou teplotu v horní vrstvě uvnitř pece, která je primární veličina, jenž je při návrhu sledována.



obr. 38 Vliv přívodních otvorů na průměrnou teplotu v horní polovině pece

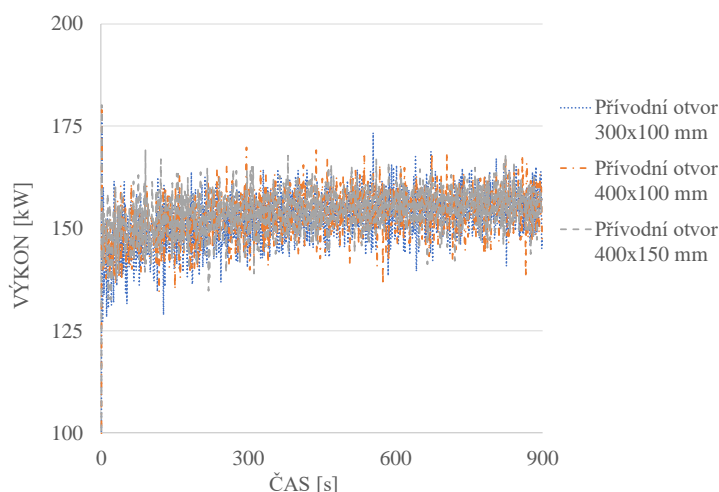
V následujícím grafu (obr. 39) jsou porovnány průměrné teploty v dolní polovině pece. Z výsledků plyne, že teploty s přívodními otvory 400x100 mm a 400x150 mm jsou téměř shodné, zatímco teploty při přívodním otvoru 300x100 mm jsou mírně vyšší, ale nikterak významně.



obr. 39 Vliv přívodních otvorů na průměrnou teplotu v dolní polovině pece

Hlavním problémem se při návrhu (optimalizaci) ventilace ukázal vliv otvorů na maximální výkon hořáku a s tím spojenou maximální teplotu, která byla v peci dosažena. Při výše definovaných otvorech hořák o výkonu 200 kW nedosáhl maximálního výkonu, tedy 200 kW. V případě, kdy byla provedena simulace po dobu 30 minut, bylo požadovaných teplot dle nominální teplotní křivky ISO 834 bez problémů dosaženo, avšak pokud byl čas simulace zvýšen na 60 minut, tak nebylo dosaženo normově požadovaných teplot, i když byl hořák spuštěný na 100 % jeho výkonu.

Na základě tohoto problému byly provedeny následující tři simulace, kde od první sekundy byl nastavený tepelný výkon hořáku na 200 kW po dobu 15 minut a porovnaná změřená křivka rychlosti uvolňování tepla (dále jen „HRR“). Žádaný tepelný výkon hořáku byl 200 kW, v následujícím grafu (obr. 40) je znázorněná křivka HRR, z níž vyplývá, že při takto definovaných otvorech nelze dosáhnout nastaveného tepelného výkonu. V případě požadovaných vyšších teplot uvnitř pece jich nelze docílit. Definovaný požár se stává limitován přísunem kyslíku (řízení ventilací).



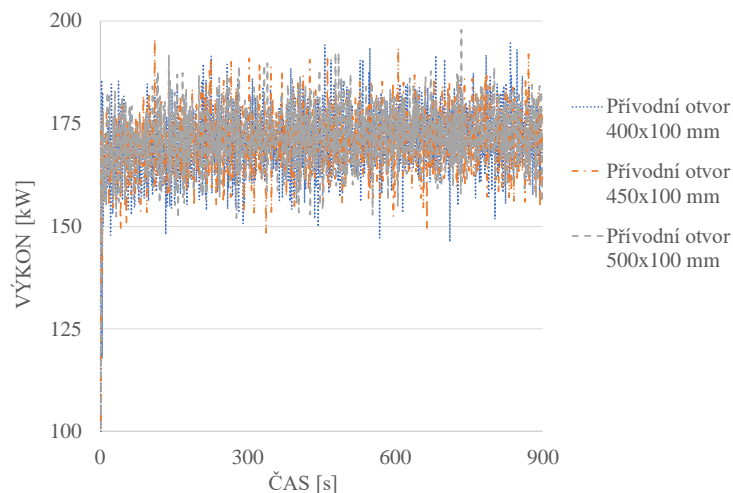
obr. 40 Tepelný výkon hořáku při změně přívodních otvorů

Z výsledných naměřených hodnot byl zjištěn maximální a průměrný výkon hořáku. Pro všechny definované otvory je výkon hořáku přibližně stejný. Žádaný tepelný výkon hořáku je 200 kW, v tab. 9 je znázorněn skutečně naměřený výkon hořáku redukováný ventilací. Z tabulky lze pozorovat tendenci, že při zvětšování přívodního otvoru dochází k nárůstu tepelného výkonu hořáku.

tab. 9 Vliv přívodních otvorů na výkon hořáku

Velikost přívodního otvoru	Průměrný výkon hořáku	Maximální výkon hořáku	Průměrná teplota [°C]	Max. teplota [°C]
300 x 100 mm	152,1 kW	178,4 kW	756	854
400 x 100 mm	153,2 kW	179,1 kW	762	859
400 x 150 mm	153,9 kW	180,2 kW	766	860

Z výše zmíněných důvodů byl tedy upraven otvor pro odvod spalin na rozměry 400x100 mm a přívodní otvory na rozměry 400x100 mm, 400x150 mm a 500x100 mm. V následujícím grafu (obr. 41) je znázorněn tepelný výkon za stejných podmínek jako v první zmiňované simulaci (tedy výkon hořáku na 200 kW po dobu 15 minut) a v tabulce (tab. 10) je znázorněný vliv přívodních otvorů na výkon hořáku.

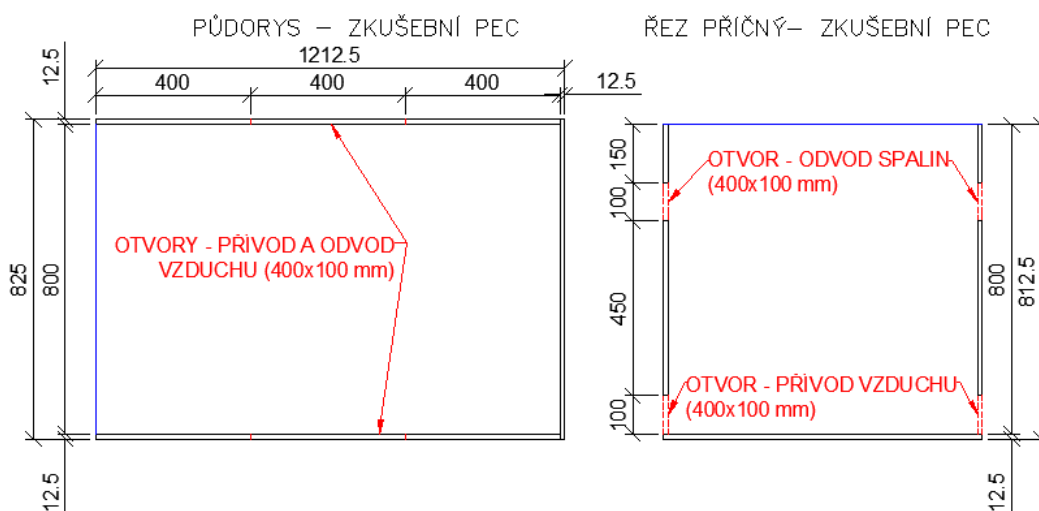


obr. 41 Tepelný výkon hořáku při změně přívodních otvorů a otvoru pro odvod spalin

tab. 10 Vliv přívodních otvorů a otvorů pro odvod spalin na výkon hořáku

Velikost přívodního otvoru	Průměrný výkon hořáku	Maximální výkon hořáku	Průměrná teplota [°C]	Max. teplota [°C]
400 x 100 mm	170,4 kW	194,7 kW	799	912
400 x 150 mm	170,4 kW	195,8 kW	804	900
500 x 100 mm	171,5 kW	197,9 kW	803	895

Při porovnání změřených dat v tab. 9 a tab. 10 je vidět, že při zvětšení přívodního a odvodního otvoru o 10 x 10 cm dojde ke zvětšení průměrného výkonu téměř o 20 kW. Průměrný tepelný výkon se se zvětšující velikostí přívodních otvorů dále zvyšuje, nejedná se však o nikterak významnější zvětšení a průměrné dosažené teploty jsou taktéž velmi podobné. Z výše zmíněných výsledků byl nakonec zvolen přívodní otvor 400 x 100 mm a odvodní otvor shodný s přívodním 400 x 100 mm. Shodná velikost otvorů je navržena i z důvodů konstrukčních, aby byla možnost jednoduché montáže desek a v důsledku teplotní roztažnosti nevznikala velká pnutí mezi deskami. Výsledné rozměry jsou zakresleny na obrázku (obr. 42).



obr. 42 Umístění ventilačních otvorů ve zkušební peci

7 Vývoj a validace pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti

V této části diplomové práce budou představeny CFD modely pece pro malorozměrové zkoušky, návrhy výkonu plynového hořáku a následně prezentovány výsledky matematických simulací. Výsledky simulací budou porovnány s požárními zkouškami. V rámci diplomové práce proběhly dvě matematické simulace, jedna referenční s nehořlavým opláštěním pece a druhá s hořlavým stěnovým vzorkem (OSB deska). Na základě simulací byly následně provedeny dvě požární zkoušky. Cílem porovnání referenční požární zkoušky s nehořlavým opláštěním a odpovídajícího modelu je ověřit funkčnost navržené pece. Požární zkouška s hořlavým stěnovým vzorkem a k tomu odpovídající simulace jsou provedeny za účelem porovnání výsledků s hořlavým materiálem. Návrh CFD modelu a následná FDS simulaci byla realizována zejména kvůli nastavení variabilnímu výkonu hořáku.

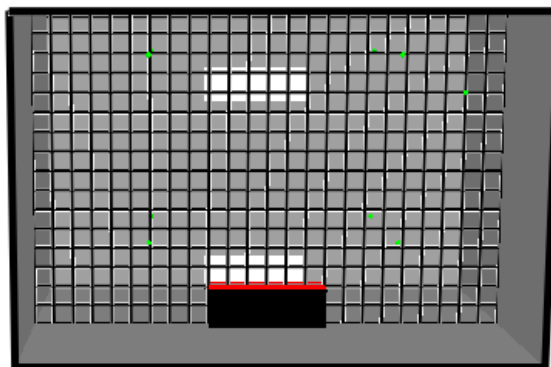
Při používání numerických analýz, jako je FDS simulace, je dobré provést validaci, aby byla potvrzena shoda mezi experimentálně změřenými daty a matematickým modelem. Validace výsledků mezi matematickou simulací a experimentem je důležitá zejména kvůli tomu, aby byla ověřena, zda matematická simulace souhlasí s fyzikální realitou.

7.1 Software

Modely pece byly vytvořeny pomocí zápisu vstupních dat do textového souboru pomocí zdrojového kódu (Příloha 1, 2). Výsledný výpočet byl proveden v programu Fire Dynamics Simulator 6.6.0 (FDS). K zobrazení výstupu simulace FDS byl použit vizualizační program Smokeview 6.6.0 (SMV). SMV je post-procesor, který umožňuje sledovat grafické výstupy výpočtů. Velkou výhodou SMV je, že umožňuje průběžně sledovat vizualizaci výsledků v průběhu výpočtů. Výsledky naměřených hodnot z programu FDS jsou ukládány do tabulkového editoru, z kterého byly následně převedeny do grafů.

7.2 Výpočetní oblast modelu

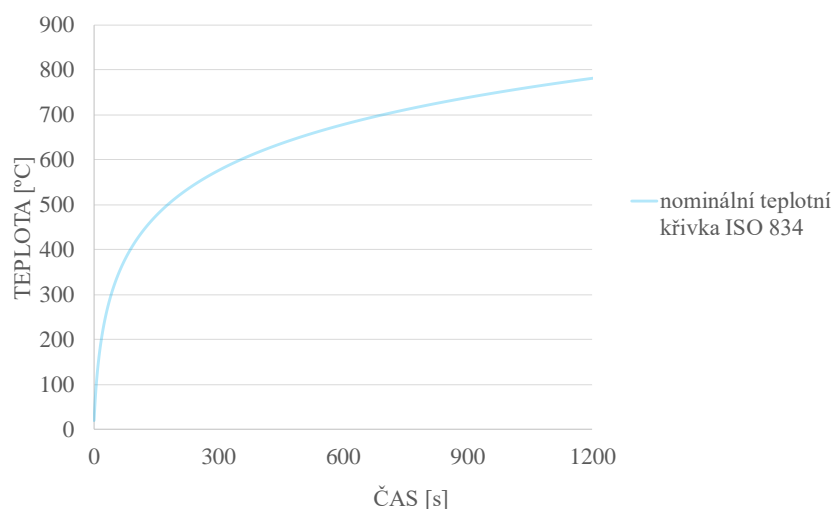
Velikost výpočetní oblasti je stěžejním úkolem při vytváření CFD modelu. Simulace probíhá v rámci definované výpočetní oblasti, kterou je nutno volit v závislosti na povaze výpočtu. Velikost a počet kontrolních objemů (buněk) je nutné nadefinovat s ohledem na požadovanou přesnost výpočtu a časovou náročnost. Pro simulaci je navržená pec s vnitřní sítí s počtem buněk 6144 (obr. 43). Velikost jedné buňky je 50x50x50 mm.



obr. 43 Výpočetní oblast modelu pece

7.3 Referenční FDS simulace s nehořlavým opláštěním

Cílem referenční FDS simulace bylo ověřit průběh teplot uvnitř navržené pece s nehořlavým opláštěním pece. Pec byla uzavřena ze všech stran deskami Farmacell Powerpanel H₂O tloušťky 12,5 mm, s výjimkou otvorů pro přívod vzduchu a odvod spalin. Průměrná teplota v horní polovině uvnitř pece by měla odpovídat nominální teplotní křivce ISO 834 (obr. 44).



obr. 44 Nominální teplotní křivka ISO 834

7.3.1 Nastavení výkonu hořáku pro referenční FDS simulaci

Návrh výkonu plynového hořáku je nastavený na základě průměrných teplot ze čtyř termočlánků umístěných v horní polovině zkušební pece 100 mm pod stropem. V prvotní fázi byl hořák od první sekundy spuštěný na plný výkon. Na základě změřených teplot byl dále upravován tepelný výkon hořáku. Tepelný výkon byl přizpůsobován tak, aby teploty v horní vrstvě odpovídaly co nejpřesněji nominální teplotní křivce ISO 834. Úprava byla založena na poměru mezi nárůstem teploty a tepelným výkonem hořáku. Nejdříve proběhla optimalizace tepelného výkonu, aby byla

co největší shoda teplot v prvních patnácti minutách, když toho bylo docíleno, tak následně došlo k nastavení až do 30. minuty, jenž je zvolena jako finální.

Hořák v peci je namodelovaný pomocí kombinací příkazu VENT a SURF o rozměrech 300 x 100 x 100 mm. Zdroj hoření je definován v CFD modelu pomocí rychlosti uvolňování tepla HRR. Maximální výkon hořáku je přepočítán na výkon požáru na metr čtvereční plochy hořáku tzv. HRRPUA (Heat Release Rate per Unit Area). Výsledná hodnota HRRPUA hořáku je 6666,67 kW.

$$\text{HRRPUA} = \frac{\text{HRR}}{S} \text{ (kW/m}^2\text{)}$$

Tepelný výkon hořáku je HRR=200 kW. Plocha hořáku je $S = 0,3 \times 0,1 = 0,03 \text{ m}^2$.

$$\text{HRRPUA} = \frac{200}{0,03} = 6666,67 \text{ (kW/m}^2\text{)}$$

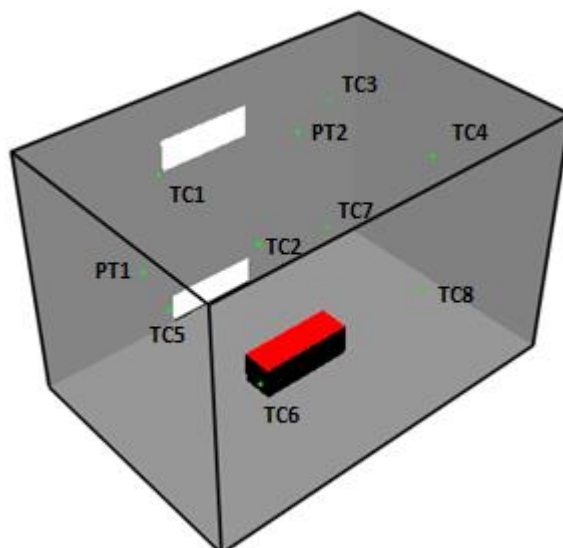
Zahřívání pece je definované příkazem RAMP_Q, kde výkon a čas jsou závislé veličiny. V čase T (s), ve kterém je stanovena konkrétní hodnota mezi poměrem maximálního výkonu F (-) a výkonem v daném čase. Výsledný návrh proměnného tepelného výkonu hořáku v závislosti na čase je vypsán do následující tabulky (tab. 11).

tab. 11 Výsledný návrh tepelného výkonu hořáku

Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)
0	0,0	150	88,0	570	117,0	990	127,6	1410	136,0
10	60,0	180	90,0	600	117,4	1020	128,0	1440	137,0
15	61,0	210	92,0	630	118,0	1050	128,4	1470	137,2
20	62,0	240	96,0	660	119,0	1080	128,6	1500	137,4
25	63,0	270	100,0	690	119,6	1110	128,8	1530	137,6
30	64,0	300	104,0	720	120,0	1140	128,84	1560	138,0
35	66,0	330	106,0	750	121,0	1170	128,90	1590	140,0
40	70,0	360	110,0	780	122,0	1200	129,0	1620	140,2
45	72,0	390	112,0	810	123,0	1230	130,0	1650	140,4
50	74,0	420	112,0	840	124,0	1260	132,4	1680	140,6
55	76,0	450	113,0	870	125,0	1290	133,0	1710	140,8
60	78,0	480	114,0	900	126,0	1320	133,1	1740	141,0
90	80,0	510	115,0	930	126,6	1350	133,4	1770	142,2
120	86,0	540	116,0	960	127,0	1380	134,0	1800	142,4

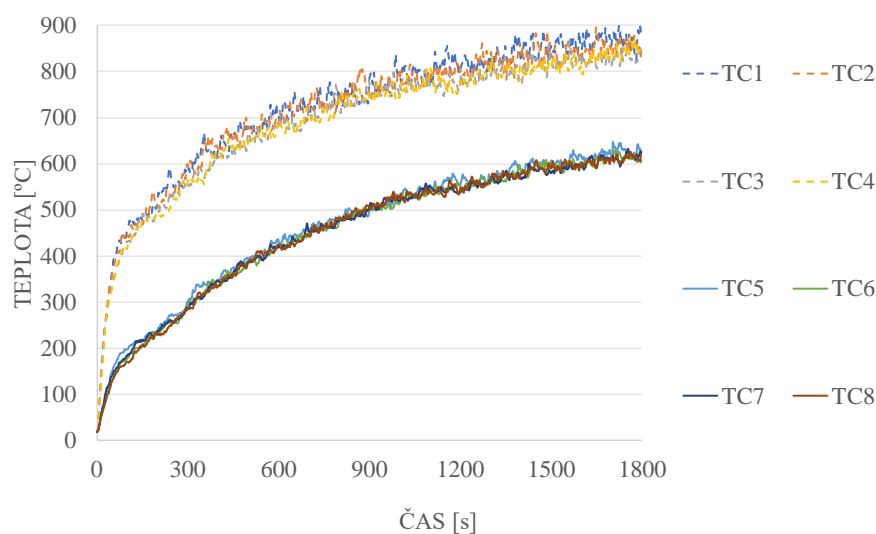
7.3.2 Výsledky referenční FDS simulace s nehořlavým opláštěním

Na základě výše zmíněných parametrů byl namodelovaný CFD model zkušební pece pro zkoušky požární odolnosti a spuštěný výpočet v programu FDS. Výsledný model zobrazený v programu Smokeview je znázorněný níže na obrázku (obr. 45).



obr. 45 CFD model pece s vyznačením termočlánků a deskových snímačů teploty

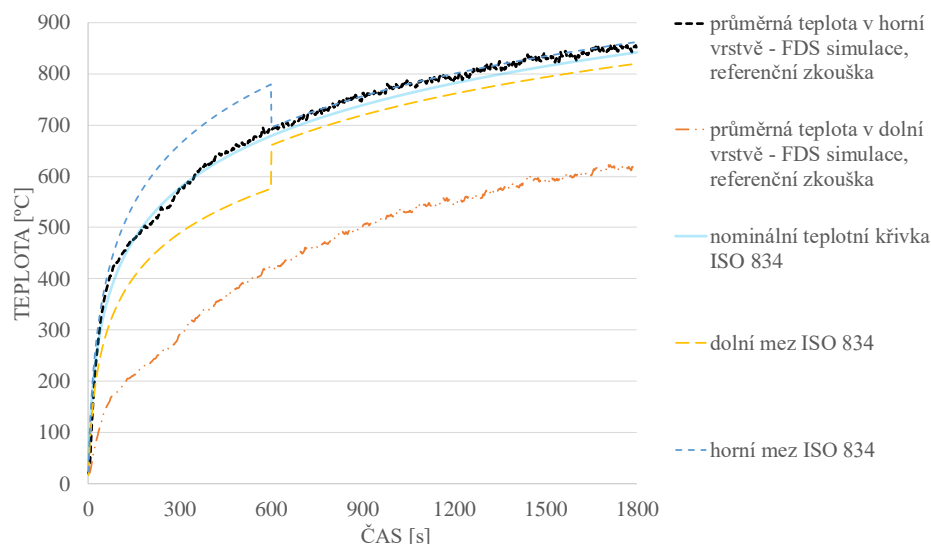
Ze zaznamenaných teplot jednotlivých termočlánků (obr. 46) lze pozorovat, že teploty na jednotlivých termočláncích uvnitř pece jsou v horní a dolní polovině v místech umístění termočlánků shodné.



obr. 46 Teploty jednotlivých termočlánků (čárkovaně jsou zobrazeny TC z horní poloviny, plnou čarou z dolní poloviny) – FDS simulace, referenční zkouška

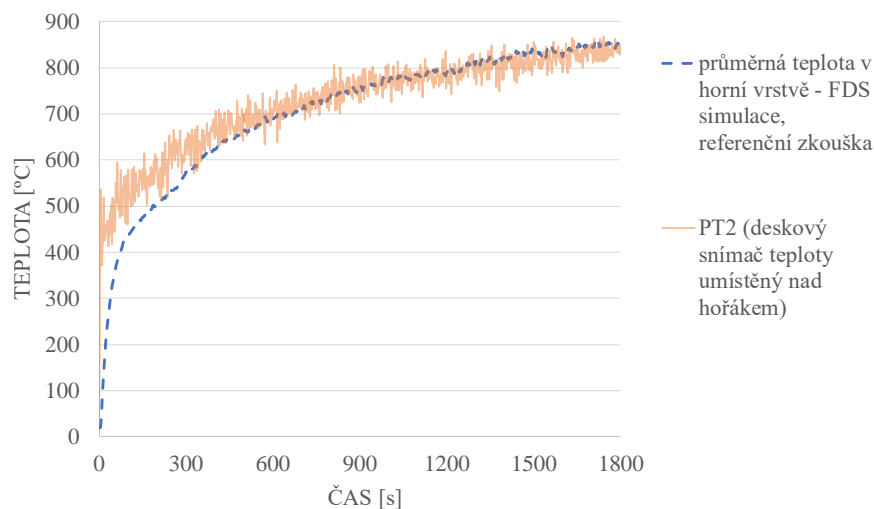
Z termočlánků v dolní a horní polovině byl vytvořen následující graf, který prezentuje průběh průměrných teplot uvnitř pece. Změřené teploty byly porovnány v grafu s nominální teplotní křivkou ISO 834 (obr. 47). Jak je vidět podařilo se docílit téměř ideální shody pro průměrnou teplotu v horní vrstvě, pro kterou byl definovaný tepelný výkon hořáku. Průměrná teplota v dolní polovině je značně nižší oproti nominální teplotní křivce ISO 834, což je způsobeno tím, že nedochází k akumulaci teploty vlivem odvádění spalin mimo pec. V grafu jsou následně doplněny mezní odchylky teploty pro normovou teplotní křivku při zkoušení požární odolnosti v akreditované zkušebně. Z výsledků je vidět, že v prvotní fázi přibližně do

30. sekundy se křivka pohybuje na hranici dolní meze. Tento čas je tak malý, že při ověřování požární odolnosti v malém měřítku je zcela zanedbatelný. Následně se teploty vyrovnávají a kolem 10. minuty teploty mírně převyšují nominální teplotní křivku ISO 834, stále se však pohybují na hranici horní meze.



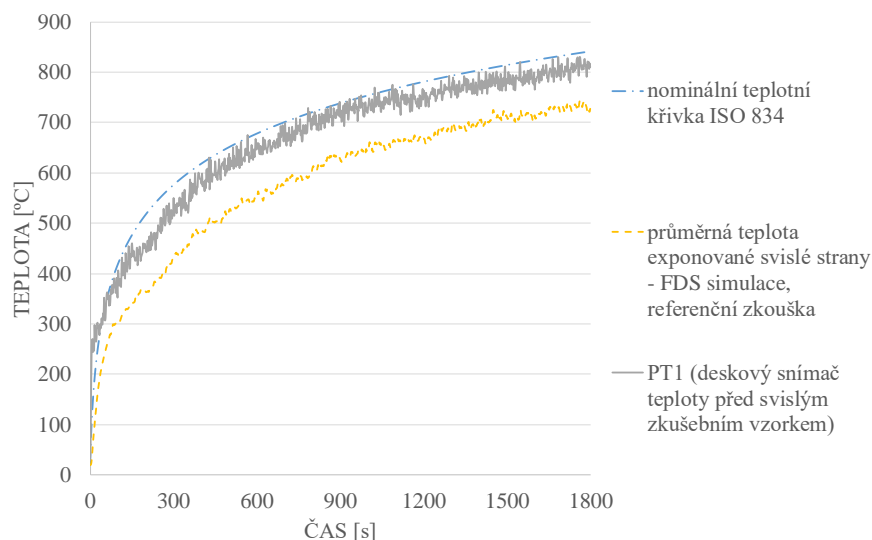
obr. 47 Porovnání teplot ve zkušební peci – FDS simulace, referenční zkouška

Ve zkušební peci 100 mm pod stropem přímo nad hořákem byl umístěn deskový snímač (PT2) zaznamenávající teplotu. Změřené hodnoty byly porovnány s průměrnou teplotou v horní vrstvě. Z grafu (obr. 48) je patrné, že teploty změřené deskovým snímačem teploty v prvních 15 minutách přesahují průměrnou teplotu v horní vrstvě, načež se v dalších 15 minutách teploty vyrovnávají. Přesah teplot zaznamenaný na deskovém snímači teploty (PT2) je způsobený tím, že je umístěn přímo nad ohniskem (plynovým hořákem), zatímco termočlánky jsou umístěny po stranách pece a musí nejdříve dojít k naakumulování teplot v horní polovině pece.

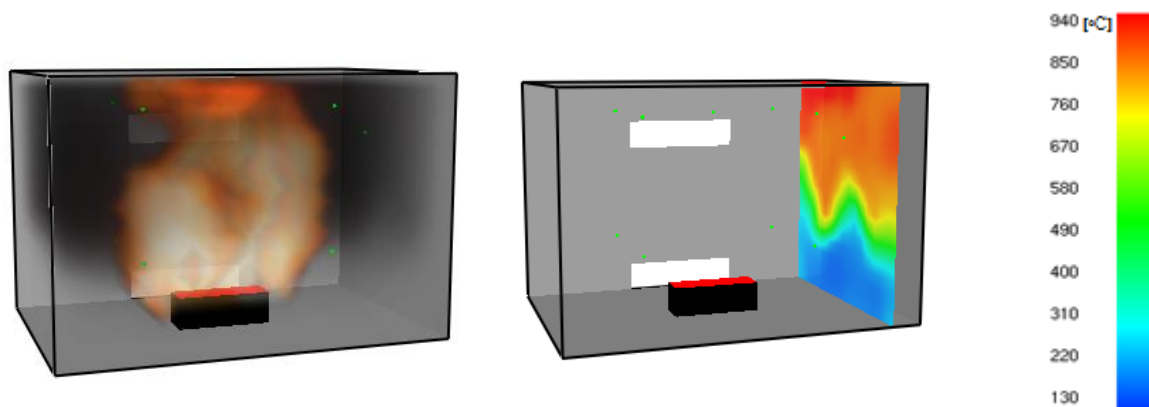


obr. 48 Teploty v horní vrstvě ve zkušební peci – FDS simulace, referenční zkouška

Dále byl umístěn jeden deskový snímač teploty 100 mm před svislou exponovanou stranu (PT1). Průměrná teplota plynu před svislou exponovanou stranou byla vytvořena jako průměr ze dvou termočlánků v dolní polovině pece a dvou termočlánků v horní. Ta byla následně porovnána s naměřenými teplotami deskovým snímačem (PT1) a nominální teplotní křivkou ISO 834 (obr. 49). Průměrná teplota plynu před exponovanou stranou je nižší než normová křivka, což je způsobeno tím, že do průměrné teploty jsou započítány termočlánky v dolní polovině, na které výkon pece nebyl dimenzován. Výsledkem tedy bude nerovnoměrný ohřev svislého zkoušeného vzorku (obr. 50).



obr. 49 Porovnání teplot na svislé exponované straně zkušební pece – FDS simulace, referenční zkouška



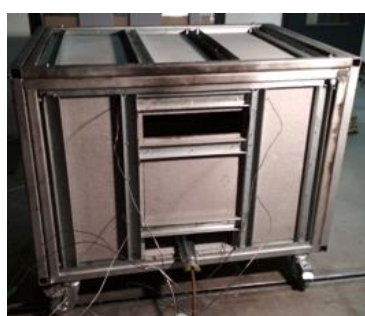
obr. 50 Nerovnoměrný ohřev – FDS simulace, referenční zkouška

7.4 Referenční požární zkouška s nehořlavým opláštěním

Dne 29.11.2018 byla provedena referenční zkouška na navržené peci. První zkouška proběhla v peci s nehořlavým opláštěním (celá uzavřena v deskách Farmacell Powerpanel H₂O), jedná se o validační zkoušku pro ověření funkčnosti pece. Referenční požární zkouška proběhla v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze.

7.4.1 Montáž pece

Zkoušce předcházela montáž pece, při které byly připraveny přesné rozměry a seskupení desek tak, aby zapadaly do sebe a odpovídaly navrženým vnitřním rozměrům. Prvním krokem bylo připevnění UD profilů do připravené jeklové konstrukce, do UD profilů byly osazeny sádkokartonářské CD profily, sloužící jako pomocná konstrukce pro osazení desek. Dalším krokem bylo uchycení připravených desek do připravené konstrukce. Před samotnou zkouškou proběhla instalace termočlánků v peci a umístění plynového hořáku dle navrženého CFD modelu. Výsledná konstrukce byla umístěna pod odsávací zvon zplodin v požární laboratoři a je zobrazena na a obr. 51. Průběh montáže pece s následnou fotodokumentací průběhu referenční zkoušky je znázorněn ve fotodokumentaci 1.



(a)



(b)



(c)

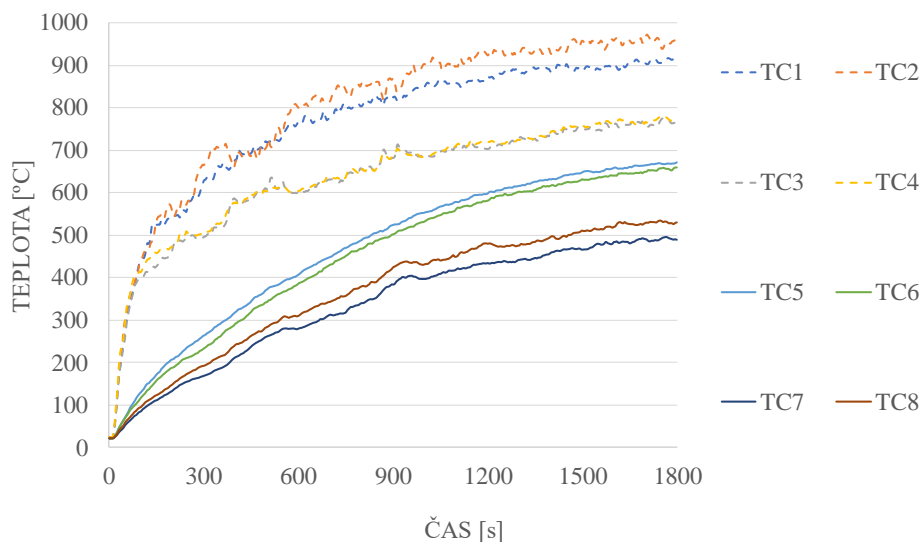


(d)

obr. 51 Reálný model pece: (a) pohled z boku – zapojení termočlánků a hořáku; (b) čelní pohled – zapojení termočlánků; (c) umístění hořáku; (d) pohled shora do prostoru pece

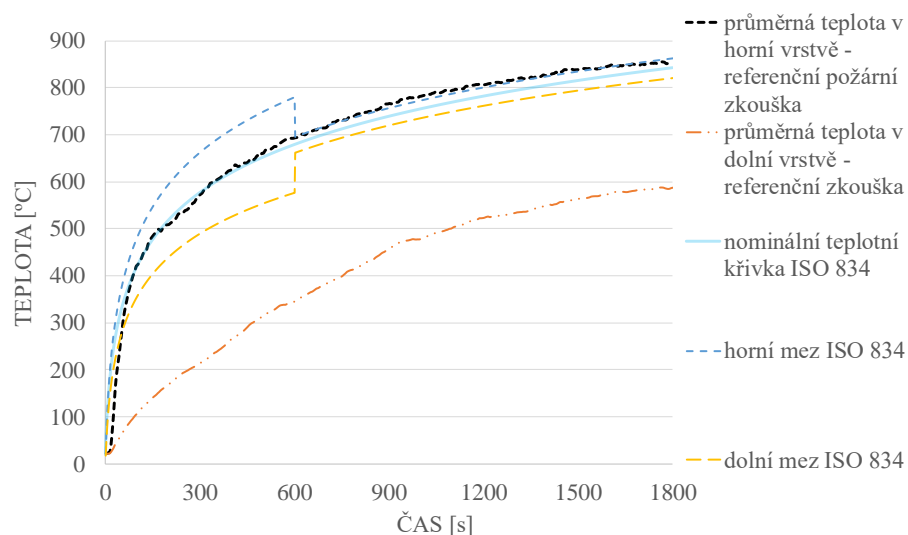
7.4.2 Výsledky referenční požární zkoušky s nehořlavým opláštěním

Níže uvedené grafy zobrazují teploty uvnitř pece během referenční požární zkoušky. Na grafu (obr. 52) jsou znázorněny změřené teploty z jednotlivých termočlánků v horní a dolní polovině pece. Oproti FDS simulaci (obr. 46), kde byly zaznamenané teploty v horní i dolní polovině takřka shodné, mají změřené teploty v referenční požární zkoušce mnohem větší rozptyl. To mohlo být nepřesným umístěním hořáku či termočlánků.



obr. 52 Teploty jednotlivých termočlánků (čárkovaně jsou zobrazeny TC z horní poloviny, plnou čarou z dolní poloviny) – referenční požární zkouška

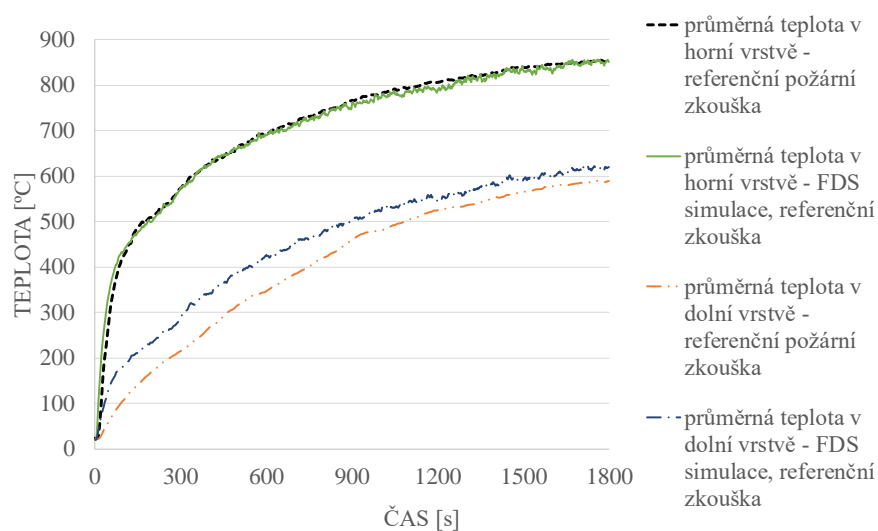
Na základě změřených teplot z jednotlivých termočlánků během referenční požární zkoušky byla vypočítána průměrná teplota v horní a dolní polovině pece. Následně byly porovnány průměrné teploty s nominální teplotní křivkou ISO 834 (obr. 53). Pro průměrnou teplotu v horní polovině pece lze z grafu pozorovat do páté minuty téměř ideální shodu teplot s nominální teplotní křivkou ISO 834, dále jsou teploty mírně vyšší, jak bylo předpokládáno v rámci nastavení tepelného výkonu, teploty se však stále pohybují v horní mezi nominální teplotní křivky ISO 834.



obr. 53 Porovnání teploty v horní polovině s ISO 834 – referenční požární zkouška

7.5 Porovnání výsledků referenční FDS simulace a referenční požární zkoušky

V grafu (obr. 54) jsou srovnány průměrné teploty referenční požární zkoušky a FDS simulace. Ačkoliv jsou změřené teploty v horní polovině pece na jednotlivých termočláncích při referenční zkoušce oproti FDS simulaci mnohem různorodější, průměrné teploty v horní polovině jsou téměř totožné. V dolní polovině lze pozorovat, že teploty v FDS simulaci se pohybují do 15. minuty přibližně o 50 °C výše. To může být způsobeno netěsnostmi v konstrukci (obr. 55), které vznikly při montáži, zatímco v FDS simulaci jsou konstrukce dokonale spojeny. Po 15. minutě mají teploty v dolní polovině sklon se vyrovnávat v důsledku zvyšujících se teplot a poklesu neutrální roviny. Ze zjištěných výsledků lze konstatovat, že zkušební pec lze považovat za funkční a podařilo se dosáhnout požadovaných výsledků.

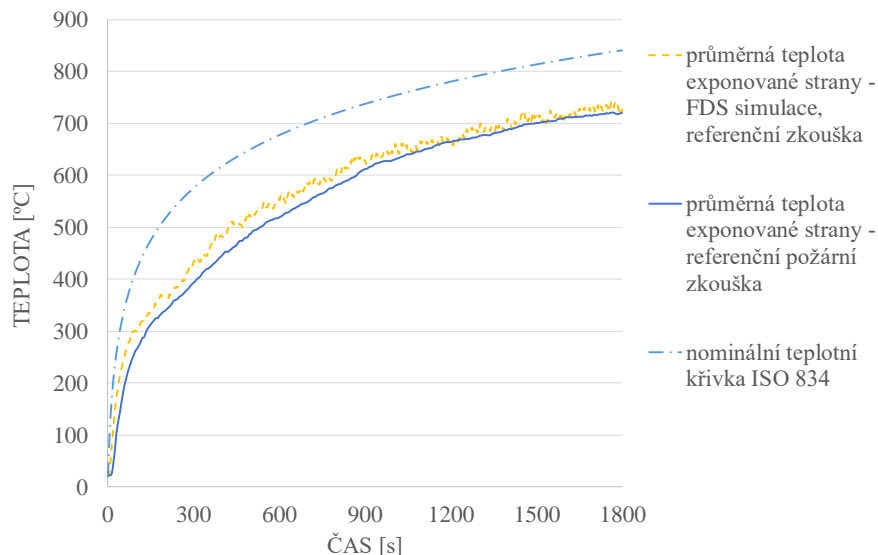


obr. 54 Porovnání teplot referenční požární zkoušky s FDS simulací



obr. 55 Netěsnosti v konstrukci pece

Ze změřených teplot působících na svislou exponovanou stranu pece, která je určena pro umístění svislého zkušební vzorku, jsou teploty mezi FDS simulací a referenční požární zkouškou takřka shodné (obr. 56). Čímž je potvrzena hypotéza, že dojde k nerovnoměrnému ohřevu svislého vzorku.



obr. 56 Porovnání teplot plynu u svislé exponované strany

7.6 FDS simulace s OSB deskou

Další matematický CFD model byl vytvořen pro hořlavý stěnový vzorek (OSB deska). Pec byla uzavřena ze tří stran deskami Farmacell Powerpanel H₂O, s výjimkou otvorů pro přívod vzduchu a odvod spalin. Čelo pece bylo nahrazeno OSB deskou tl. 15 mm.

Požární zkouška měla probíhat dle nastavené FDS simulace, bohužel se vyskytly při zkoušce technické problémy, které měly za následek zpětné předefinování výkonu hořáku dle požární zkoušky. V průběhu zkoušky došlo k vypnutí plynového hořáku přibližně po dobu 3. minut, více o nastavení výkonu je uvedeno v kapitole 7.6.2.

V nastaveném CFD modelu (viz kapitola 7.3) určeného pro referenční zkoušku došlo k několika úpravám. Jedná se zejména o nahrazení čelní stěny OSB deskou a s tím spojené úpravě tepelně technických vlastností a nastavení tepelného výkonu hořáku.

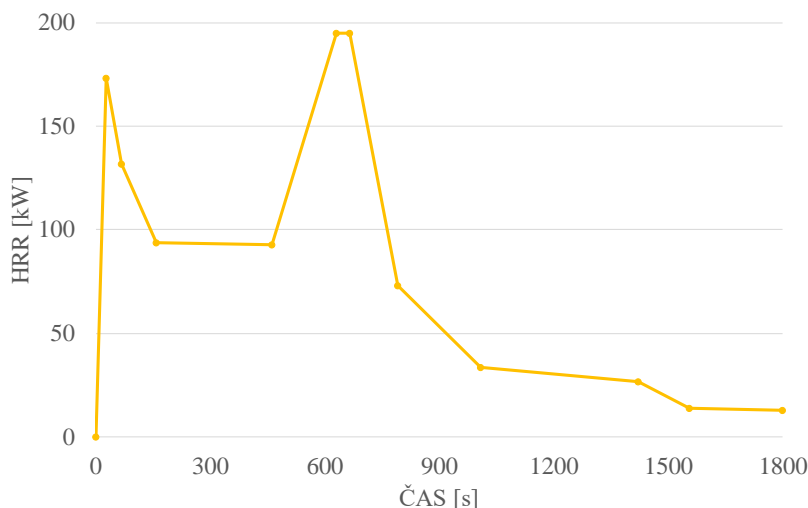
7.6.1 Tepelně technické vlastnosti OSB desky

OSB deska je hořlavý materiál a oproti referenční zkoušce vstupují do výpočtu další tepelně technické vlastnosti. Jedná se o efektivní výhřevnost, rychlost uvolňování tepla, zápalná teplota a rychlost uvolňování tepla. Materiálové vlastnosti OSB desky byly převzaty z DP vypracované na Fakultě stavební ČVUT v Praze a jsou znázorněny v následující tabulce (tab. 12). Rychlost uvolňování tepla je časově proměnná veličina, která představuje rychlost tepla uvolněného

v čase, použité hodnoty jsou znázorněny v grafu (obr. 57). Hodnoty rychlosti uvolňování tepla byly získány měřením v kónickém kalorimetru [31].

tab. 12 Materiálové vlastnosti OSB desky [31]

Objemová hmotnost	600 kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	1,55 kJ/(kg·K)
Součinitel tepelné vodivosti	0,12 W/(m·K) při 20 °C
Efektivní výhřevnost	14,5 kJ/kg
Zápalná teplota	250 °C



obr. 57 Rychlost uvolňování tepla – OSB deska

7.6.2 Nastavení výkonu hořáku pro FDS simulaci s OSB deskou

Nové nastavení tepelného výkonu hořáku proběhlo zejména proto, že při zkoušce dochází k uvolňování tepla a postupnému odhořívání OSB desky. To má za následek externí přídavek teplot oproti referenční zkoušce. Nastavení tepelného výkonu probíhalo stejně, jako je popsáno v kapitole 7.3.1. Výsledné teploty v horní polovině pece by měly odpovídat nominální teplotní křivce ISO 834.

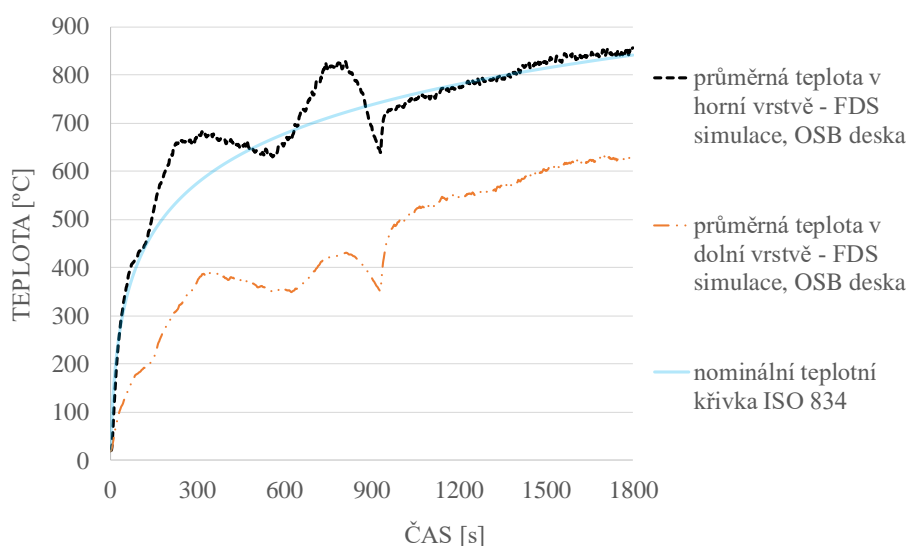
Finální návrh nastavení výkonu hořáku je zobrazen v následující tabulce (tab. 13). V tabulce je zobrazeno nastavení do 20. minuty, kdy došlo k ukončení požární zkoušky. Oproti původnímu návrhu je do nastavení výkonu zahrnut i výpadek plynového hořáku při požární zkoušce.

tab. 13 Nastavení výkonu plynového hořáku – CFD model s OSB deska

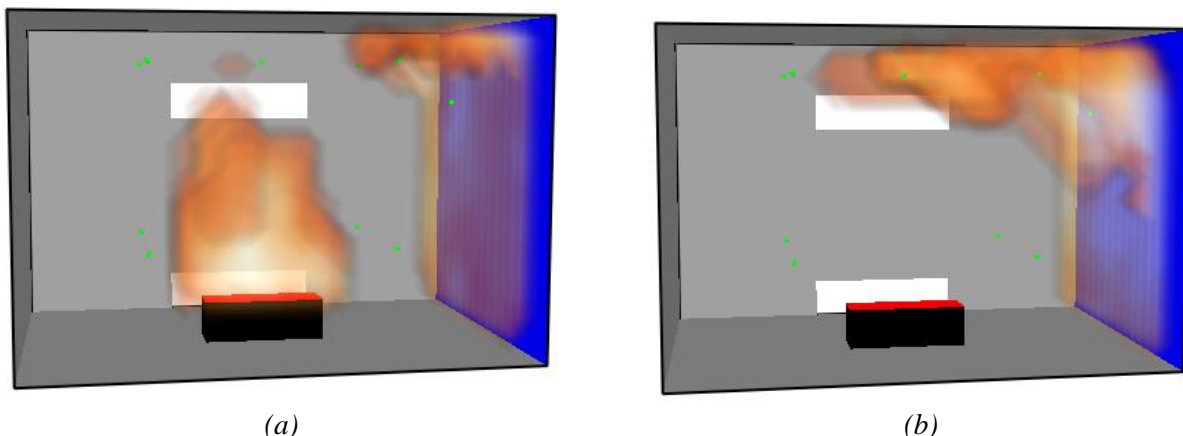
Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)
0	0	50	74	270	61	540	32	960	72
10	60	55	76	300	58	570	29	990	80
15	61	60	78	330	55	600	25	1020	88
20	62	90	80	360	51	630	22	1050	94
25	63	120	77	390	48	660	19	1080	98
30	64	150	74	420	45	690	16	1110	100
35	66	180	71	450	42	720	12	1140	104
40	70	210	68	480	38	926	0	1170	106
45	72	240	64	510	35	930	71	1200	108

7.6.3 Výsledky FDS simulace s OSB deskou

V následujícím grafu (obr. 58) jsou znázorněny výsledky FDS simulace dle požární zkoušky s OSB deskou. V grafu lze vidět dva vrcholy přesahující nominální teplotní křivku ISO 834. První vrchol přesahující křivku lze pozorovat kolem 5. minuty, kdy došlo ke vzplanutí OSB desky v horní části přibližně do vzdálenosti 200 mm od stropu (obr. 59a). Druhý vrchol přesahuje křivku kolem 13. minuty, kdy došlo k naakumulování teplot v celé horní polovině a vzplanutí celé horní poloviny desky (obr. 59b), to mělo za následek další skokový nárůst teplot. Po 15. minutě dochází k výraznějšímu poklesu teplot uvnitř pece z důvodu vypnutí hořáku, načež jsou následně teploty opět vyrovnávány pomocí tepelného výkonu plynového hořáku.



obr. 58 FDS simulace dle požární zkoušky s OSB deskou



obr. 59 Rozložení teplot v původní FDS simulaci: (a) 5. minuta; (b) 13. minuta

7.7 Požární zkouška s OSB deskou

Zkouška proběhla dne 3.12.2018 v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze. Zkouška proběhla na stejné peci, jako je uvedeno v kapitole 7.4. Při této požární zkoušce byla nahrazena čelní stěna OSB deskou (obr. 60). OSB deska byla osazena tak, aby došlo k uzavření celé čelní strany pece a byla uchycena na 4 místech pomocí drátu. Průběh požární zkoušky s OSB deskou je znázorněn ve fotodokumentaci 2.



(a)



(b)

obr. 60 Pec s OSB deskou: (a) čelní strana s OSB deskou; (b) uchycení OSB desky k peci

7.7.1 Průběh požární zkoušky s OSB deskou

V průběhu požární zkoušky s OSB deskou došlo po 3. minutě k prohnutí desky a viditelnému úniku kouře, přibližně v 7. minutě i viditelnému hoření nad zkoušeným vzorkem. To bylo následně zakryto minerální vatou a zatíženo cihlami, čímž byl tento problém částečně eliminován. Nadále však docházelo k úniku tepla a kouře v místě prohnutí (obr. 61).



obr. 61 Prohnutí OSB desky a následné zakrytí v průběhu požární zkoušky

Požární zkouška s OSB deskou byla ukončena ve 20. minutě, z důvodu, že OSB deska prohořela téměř do poloviny své výšky a ve zkoušce nemělo smysl dále pokračovat (obr. 62).

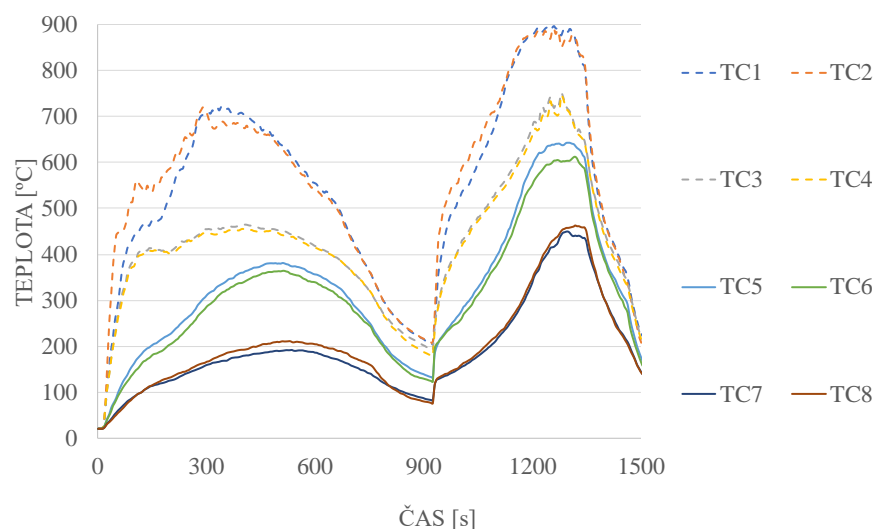


obr. 62 Ukončení požární zkoušky s OSB deskou ve 20. minutě

Jak již bylo zmíněno, v průběhu požární zkoušky došlo k přerušení důsledkem výpadku plynového hořáku. Výpadek hořáku byl způsoben tím, že pokud v počítači řídicí tepelný výkon hořáku klesne tepelný výkon pod 10 kW, dojde k vypnutí. To při nastavování tepelného výkonu hořáku před zkouškou nebylo bráno v potaz a došlo k přerušení. V bodě, kdy výkon vzrostl opět nad 10 kW, se hořák opět zapnul a byl vpouštěn propan. Hořák však nebyl zapálen, jelikož se zapálení musí provést manuálně. Po určitou dobu byl uvolňován plyn do prostoru pece bez iniciačního zdroje, poté co byla tato chyba odhalena, došlo k opětovnému zapálení a vzplanutí nahromaděného plynu, což mělo za následek prudký nárůst teplot.

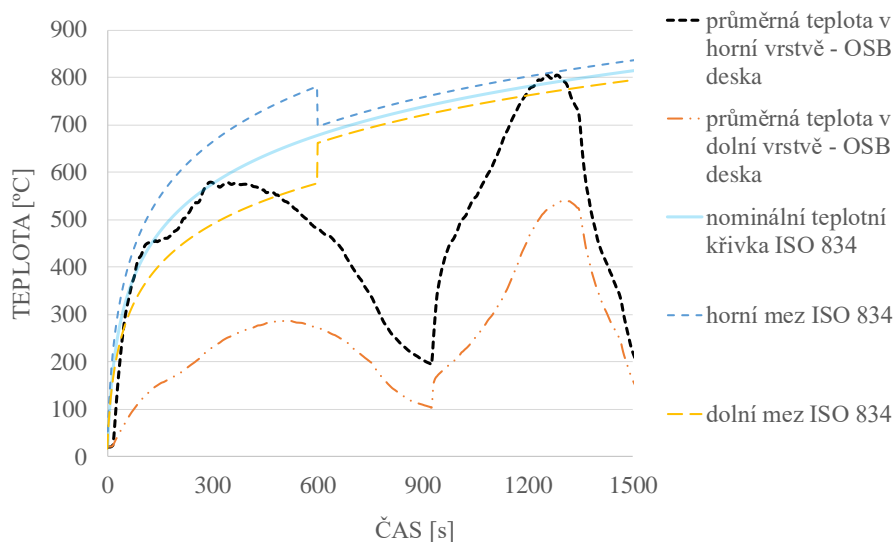
7.7.2 Výsledek požární zkoušky s OSB deskou

Požární zkouška byla ukončena ve 20. minutě (vypnutí hořáku), avšak teploty na jednotlivých termočláncích byly dále zaznamenávány. V následujícím grafu (obr. 63) je znázorněn průběh teplot v horní a dolní polovině pece, které byly naměřeny z jednotlivých termočlánců. Z grafu pro jednotlivé termočláncí lze pozorovat v 15. minutě skokový nárůst teplot vlivem vzplanutí nahromaděného plynu a opětovného zapálení OSB desky. Termočláncí umístěné u vzorku vykazují vyšší teploty z důvodů, že se nacházejí u OSB desky, která uvolňuje teplo (TC1, TC2 TC5, TC6).



obr. 63 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích (čárkovaně jsou zobrazeny TC z horní poloviny, plnou čarou z dolní poloviny) – požární zkouška, OSB deska

Z teplot změřených na jednotlivých termočláncích byly vytvořeny průměrné teploty v horní a dolní polovině pece. Průměrné teploty byly následně porovnány s nominální teplotní křivkou ISO 834 (obr. 64). V grafu lze vidět, že teploty v horní polovině odpovídají nominální teplotní křivce ISO 834 přibližně do 5. minuty, dále se teploty výrazně odchyľují od předpokládaného průběhu.

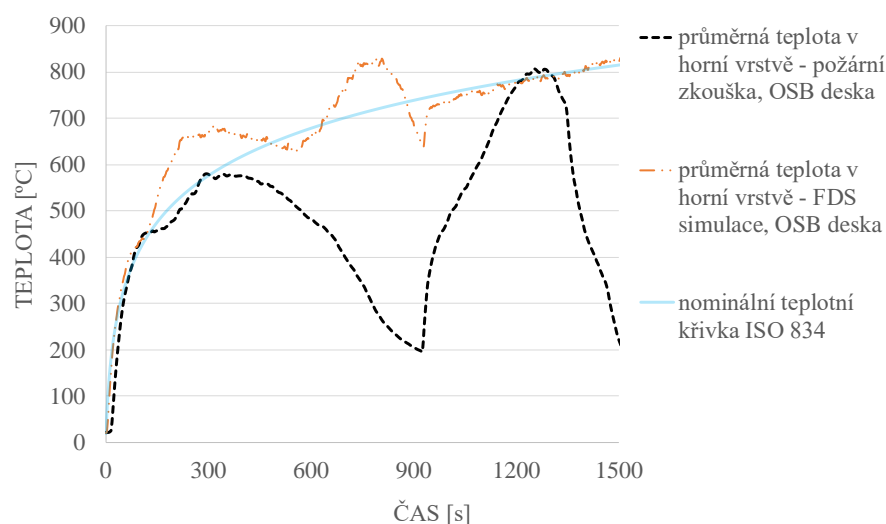


obr. 64 Porovnání průměrné teploty v horní polovině s ISO 834 – požární zkouška, OSB deska

7.8 Porovnání výsledků FDS simulace a požární zkoušky s OSB deskou

V následujícím grafu (obr. 65) jsou porovnány výsledné teploty pro průměrnou teplotu v horní polovině pece požární zkoušky s OSB deskou, FDS simulace a nominální teplotní křivky ISO

834. Přibližně do 3. minuty jsou průběhy teplot pro všechny tři křivky stejné, následně pak od 3. do 10. minuty mají křivky FDS simulace a požární zkoušky stejnou tendenci průběhu s rozdílem přibližně 100 °C. Lze předpokládat, že pokud by nedošlo k prohnutí desky a uvolňování tepla mimo konstrukci pece, měla by křivka velmi podobný průběh. Po 10. minutě se grafy průměrných teplot však začínají lišit. Dle FDS simulace došlo k zahoření konstrukce v celé horní polovině, následkem toho byl utlumován tepelný výkon plynového hořáku, aby byla dosažena co největší shoda průběhu teplot s nominální teplotní křivkou ISO 834. Při požární zkoušce následkem nižších teplot k zahoření nedošlo a dle předem nastaveného výkonu stejně docházelo ke snížení tepelného výkonu plynového hořáku, což mělo za následek výrazný pokles teplot. Po 15. minutě došlo opět k navýšení výkonu, konstrukce vzplanula a teploty prudce vzrostly do požadovaných hodnot. Dá se pozorovat tendence podobného růstu jako u druhého vrcholu v FDS simulaci, nicméně v pozdějším čase. Dále teploty již klesají, protože došlo k vypnutí hořáku a ukončení požární zkoušky. Nicméně to odpovídá vývoji křivky v FDS simulaci, jelikož po druhém vrcholu dochází taktéž k útlumu výkonu hořáku a následně dorovnání teplot pomocí tepelného výkonu hořáku.



obr. 65 Porovnání teplot – FDS simulace, požární zkouška, ISO 834

Modelování pyrolýzy OSB desky je náročná úloha, jedná se o desky vyrobené ze dřeva, které jsou spojeny lepidly za použití tlaku a vysoké teploty. Desky jsou vyráběny z lisovaných dřevěných štěpků nebo hoblin v různých tloušťkách, typ použitého pojiva závisí na výrobcích i na orientaci vrstev, či hrubosti povrchu. Do procesu pyrolýzy tedy vstupují parametry jako např. hořlavost použitého lepidla, obsah vody v materiálu, hustota dřeva (tvrdé listnaté dřevo je méně hořlavé než měkké jehličnaté) atd. V první fázi pyrolýzy dochází díky vysokému obsahu vody k vysušování desky, dále pak k uvolňování hořlavých plynů a tvorbě zuhelnatělé vrstvy, což působí jako retardér hoření (tepelná vodivost této vrstvy je asi 6x nižší než nepoškozené dřevo). Pro detailní modelování by tedy bylo vhodné zvolenou desku daného výrobce zadat do modelu pomocí kinetických vlastností jednotlivých materiálů. Zadaný proces pyrolýzy OSB desky v diplomové práci je na základě laboratorně změřené hodnoty HRR v kónickém

kalorimetru ve vodorovné poloze. Zatímco OSB deska je při požární zkoušce orientovaná ve svislé poloze, což má vliv na proces hoření. Hodnoty HRR se tedy mohou mírně lišit na základě výše zmíněných důvodů a to může být také jedna z příčin rozdílného průběhů grafů.

8 Závěr

V úvodních kapitolách byla shrnuta problematika požární odolnosti, metody zjišťování požární odolnosti, modelování požáru a prezentace pecí pro malorozměrové zkoušky. Požární odolnost a zkoušky požární odolnosti jsou v našich českých technických normách velmi dobře popsány. U nás i ve světě je vyrobena řada pecí pro malorozměrové zkoušky, jež se snaží aproximovat pece pro velkorozměrové zkoušky požární odolnosti. V textu byly některé pece pro ověřování požární odolnosti v malorozměrovém měřítku popsány, z čeho jsou vyrobeny a na jakém principu fungují. V českých technických normách není stanoveno jak při malorozměrových zkouškách postupovat, záleží tedy na každém výrobcí těchto pecí či zkušebně, jaký postup při výrobě a interpretaci výsledků zvolí, aby výsledky z malorozměrových zkoušek byly co nejpřesnější a odpovídaly skutečnému stavu. Při interpretaci výsledků je nutné brát v úvahu, že vzorky jsou v malém měřítku, což ovlivňuje množství spár i kotvících prvků. Výsledné chování výrobku ve velkém měřítku (zabudování do stavby) se může lišit, ve finále tedy záleží na tom, jak zkoušející dokáže s výsledky z malorozměrových zkoušek pracovat a využít je pro další vývoj.

Hlavním bodem diplomové práce byl návrh pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti a za účelem ověření funkčnosti návrhu provedení dvou požárních zkoušek (referenční zkoušky s nehořlavým opláštěním a zkoušky s OSB deskou). K provedení požárních zkoušek bylo nutné pec vyrobit v reálném měřítku, což proběhlo v prostorách požární laboratoře na UCEEB ČVUT v Praze, stejně jako následující požární zkoušky.

Navržená zkušební pec se jeví jako vhodná ke zkoušení vodorovných vzorků, kdy po dobu 30 minut teploty působící na vodorovné vzorky kopírují nominální teplotní křivku ISO 834. V případě svislých vzorků dochází k akumulaci teplot v horní polovině pece v závislosti na umístění navržených otvorů. Teploty v horní polovině pece kopírují nominální teplotní křivku ISO 834, ale v části pod neutrální rovinou jsou teploty nižší, než se požaduje při zkouškách požární odolnosti. Tím dochází k nerovnoměrnému ohřátí zkoušeného prvku, což může mít vliv na výsledek malorozměrové požární zkoušky. Řešení tohoto problému leží v lepším řešení ventilace pece. V navržené peci je velmi jednoduchý systém ventilace, který nevyžaduje žádné složitější přístroje či obsluhu. V diplomové práci proběhla optimalizace ventilace pomocí FDS simulací, aby bylo využití otvorů na odvod spalin a přívod vzduchu co nejefektivněji.

Referenční požární zkouška proběhla velmi úspěšně, pec byla uzavřena po všech stranách nehořlavými deskami Farmacell Powerpanel H₂O, a to včetně prostoru pro osazení zkoušených vzorků. Za účelem nastavení výkonu plynového hořáku byl namodelovaný CFD model a následně provedeny FDS simulace tak, aby průměrné teploty v horní polovině co nejvíce odpovídaly nominální teplotní křivce ISO 834. Dle nadefinovaného tepelného výkonu plynového hořáku pak byla provedena referenční požární zkouška. Výsledné teploty z FDS simulace a z referenční požární zkoušky jsou ve velmi dobré shodě a průměrné teploty v horní polovině

odpovídají nominální teplotní křivce ISO 834. Lze tedy konstatovat, že navržená pec je funkční a odpovídá požadovaným parametrům.

Dále pak byla provedena požární zkouška s hořlavou OSB deskou, přičemž deska byla osazena na čelní straně pece. Z důvodu nutnosti opětovného nastavení výkonu plynového hořáku byl namodelován CFD model, přičemž došlo k upravení tepelně technických vlastností, přičemž v modelu bylo také definováno odhořívání OSB desky. V průběhu požární zkoušky došlo k nečekaným chybám (prohnutí desky a výpadek plynového hořáku), jenž měly za následek zpětné přenastavení tepelného výkonu plynového hořáku a provedení nové FDS simulace za účelem porovnání výsledků za stejných podmínek. Zkouška byla ukončena po 20. minutách místo plánovaných 30. minut, poněvadž došlo k odhoření téměř poloviny desky. Požární zkouška s OSB deskou proběhl dle nominální teplotní křivky ISO 834 přibližně do 3. minuty, kdy došlo k prohnutí desky, dále se začaly změřené teploty lišit oproti plánovanému průběhu. Ačkoliv se změřené teploty z FDS simulace a požární zkoušky liší, mají podobnou tendenci průběhu. Vzhledem k složitosti modelování hořlavých materiálů jsou výsledky uspokojivé.

V momentě, kdy se ve zkoušeném vzorku vyskytuje hořlavý materiál, který zvyšuje teplotu v peci odhoříváním, je žádoucí vytvořit CFD a provést matematickou simulaci pro nastavení výkonu hořáku. Ve chvíli, kdy dojde k zahoření materiálu, je nezbytné snížit výkon tak, aby teploty co nejvíce odpovídaly nominální teplotní křivce ISO 834. K tomu poslouží právě matematický model. V případě užití ruční regulace výkonu hořáku, je dostupnou technikou velmi obtížné dosáhnout adekvátních výsledků. Je důležité také zmínit, že matematické simulace jako je FDS, není určena pro výpočet mechanického chování jednotlivých vrstev vzorku. V momentě, kdy je např. OSB deska zateplena z vnější strany minerální izolací, v matematické simulaci dojde po určité době k odhoření OSB desky. V realitě na ní závislá minerální izolace, v případě FDS simulace nadále plní svou funkci, což ovlivňuje výsledek FDS simulace. Na mechanických vlastnostech jednotlivých vrstev konstrukce jsou totiž závislé tepelně technické vlastnosti konstrukce jako celku, jenž vymezují mezní stavy požární odolnosti.

Do budoucna je možné řešit především způsob ventilace pece. Možností by bylo instalovat ventilátor na odtažení spalin na dně pece, který by zajistil požadovaný tlak a ventilaci pece dle normových požadavků. Tím by bylo dosaženo i ohřevu svislého vzorku v celé své délce.

Seznam obrázků

obr. 1 Požár v San Franciscu: (a) před požárem; (b) po požáru [3].....	3
obr. 2 Zkouška požární odolnosti kolem roku 1902 [4]	4
obr. 3 Mezní stavy požární odolnosti: (a) nosnost; (b) celistvost; (c) izolace; (d) radiace [9]	5
obr. 4 Druhy konstrukčních částí (schematicky znázorněné na sendvičové konstrukci): (a) konstrukce DP1; (b) konstrukce DP2; (c) konstrukce DP3 [9]	7
obr. 5 Požární experiment v rohu místnosti – obklad stěn B – s1, d0, podlaha C _{fl} [9].....	9
obr. 6 Požární experiment v rohu místnosti – obklad stěn D – s2, d0, podlaha C _{fl} [9]	9
obr. 7 Požární zkouška v Mokrsku [14].....	10
obr. 8 Zónové modely: (a) dvouzónový model; (b) jednozónový model [17]	12
obr. 9 CFD model [17].....	13
obr. 10 Srovnání požární odolnosti na třech velikostně rozdílných pecích [21]	15
obr. 11 Teploty v peci a jejich vliv na požární odolnost [21].....	16
obr. 12 Rozměry pece pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22].....	17
obr. 13 Umístění otvorů v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22].....	17
obr. 14 Umístění hořáku v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22].....	18
obr. 15 Umístění termočlánků v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22].....	18
obr. 16 Porovnání teplot při referenční zkoušce v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na UCEEB ČVUT v Praze [22]	19
obr. 17 Porovnání teplot při zkoušce požární odolnosti v peci pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti na ČVUT UCEEB [22]	19
obr. 18 Průběh zkoušky vzorku textilní rolety, zdroj: AVAPS, s.r.o.	20
obr. 19 Vzorek textilní rolety po zkoušce, zdroj: AVAPS, s.r.o.	20
obr. 20 WPI pec [23].....	21
obr. 21 Otvory pro hořáky WPI pec [23].....	22
obr. 22 Umístění PT WPI pec [23]	22
obr. 23 Porovnání teplot za použití CFD modelů WPI pec [23].....	23
obr. 24 Pec Koceali; modrá část – hořáky; červená část – otvor na odvod spalin [25]	23
obr. 25 Teplota v peci Koceali: (a) v 1. sekundě; (b) v 5. sekundě [25].....	24

obr. 26 Teplota v peci Koceali: (a) ve 20. sekundě; (b) ve 40. sekundě [25]	24
obr. 27 Porovnání teplot v peci Koceali [25].....	25
obr. 28 Porovnání teplot výfukových plynů v peci Koceali [25].....	25
obr. 29 Pec IPB: (a) model pece se čtyřmi hořáky; (b) geometrické pozice pro deskové snímače teploty uvnitř pece; (c) pec s otevřenou stěnou po skončení požární zkoušky č.3 [26]	26
obr. 30 Porovnání naměřených teplot při 1. experimentu s ISO 834 [26].....	26
obr. 31 Rozdíly průměrných teplot od ISO 834 [26].....	27
obr. 32 Porovnání teplot numerické simulace a experimentu [26].....	27
obr. 33 Heat-Transfer Rate Inducing System (H-TRIS) [7]	28
obr. 34 Mechanický rám (H-TRIS) [7].....	29
obr. 35 Rozměry zkušební pece	31
obr. 36 Umístění hořáku ve zkušební peci.....	32
obr. 37 Umístění termočlánků ve zkušební peci.....	33
obr. 38 Vliv přírodních otvorů na průměrnou teplotu v horní polovině pece	34
obr. 39 Vliv přírodních otvorů na průměrnou teplotu v dolní polovině pece	34
obr. 40 Tepelný výkon hořáku při změně přírodních otvorů	35
obr. 41 Tepelný výkon hořáku při změně přírodních otvorů a otvoru pro odvod spalin	36
obr. 42 Umístění ventilačních otvorů ve zkušební peci.....	36
obr. 43 Výpočetní oblast modelu pece.....	38
obr. 44 Nominální teplotní křivka ISO 834	38
obr. 45 CFD model pece s vyznačením termočlánků a deskových snímačů teploty.....	40
obr. 46 Teploty jednotlivých termočlánků (čárkovaně jsou zobrazeny TC z horní poloviny, plnou čarou z dolní poloviny) – FDS simulace, referenční zkouška	40
obr. 47 Porovnání teplot ve zkušební peci – FDS simulace, referenční zkouška.....	41
obr. 48 Teploty v horní vrstvě ve zkušební peci – FDS simulace, referenční zkouška	41
obr. 49 Porovnání teplot na svislé exponované straně zkušební pece – FDS simulace, referenční zkouška	42
obr. 50 Nerovnoměrný ohřev – FDS simulace, referenční zkouška.....	42
obr. 51 Reálný model pece: (a) pohled z boku – zapojení termočlánků a hořáku; (b) čelní pohled – zapojení termočlánků; (c) umístění hořáku; (d) pohled shora do prostoru pece	43
obr. 52 Teploty jednotlivých termočlánků (čárkovaně jsou zobrazeny TC z horní poloviny, plnou čarou z dolní poloviny) – referenční požární zkouška.....	44
obr. 53 Porovnání teploty v horní polovině s ISO 834 – referenční požární zkouška.....	44
obr. 54 Porovnání teplot referenční požární zkoušky s FDS simulací.....	45

obr. 55 Netěsnosti v konstrukci pece	45
obr. 56 Porovnání teplot plynu u svislé exponované strany	46
obr. 57 Rychlost uvolňování tepla – OSB deska	47
obr. 58 FDS simulace dle požární zkoušky s OSB deskou.....	48
obr. 59 Rozložení teplot v původní FDS simulaci: (a) 5. minuta; (b) 13. minuta	49
obr. 60 Pec s OSB deskou: (a) čelní strana s OSB deskou; (b) uchycení OSB desky k peci	49
obr. 61 Prohnutí OSB desky a následné zakrytí v průběhu požární zkoušky	50
obr. 62 Ukončení požární zkoušky s OSB deskou ve 20. minutě.....	50
obr. 63 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích (čárkovaně jsou zobrazeny TC z horní poloviny, plnou čarou z dolní poloviny) – požární zkouška, OSB deska.....	51
obr. 64 Porovnání průměrné teploty v horní polovině s ISO 834 – požární zkouška, OSB deska	51
obr. 65 Porovnání teplot – FDS simulace, požární zkouška, ISO 834	52

Seznam tabulek

tab. 1 Kritéria mezních stavů požární odolnosti [11].....	5
tab. 2 Základní kritéria pro rozdělení na druhy konstrukčních částí	7
tab. 3 Třídy reakce na oheň stavebních materiálů [9].....	8
tab. 4 Velkorozměrové zkoušky požární odolnosti [4].....	10
tab. 5 Porovnání skutečného modelu se zmenšeným [20].....	14
tab. 6 Nejvýznamnější bezrozměrné skupiny pro změny měřítka [16]	15
tab. 7 Rozdílné teploty teplotní křivky ASTM E199 a ISO 834.....	21
tab. 8 Tepelně technické vlastnosti desky Farmacell Powerpanel [29]	31
tab. 9 Vliv přívodních otvorů na výkon hořáku.....	35
tab. 10 Vliv přívodních otvorů a otvorů pro odvod spalin na výkon hořáku.....	36
tab. 11 Výsledný návrh tepelného výkonu hořáku	39
tab. 12 Materiálové vlastnosti OSB desky [31]	47
tab. 13 Nastavení výkonu plynového hořáku – CFD model s OSB deska	48

Literatura

- [1] JAMES RANDALL LAWSON*. *A History of Fire Testing: Past, Present, and Future*. B.m.: Journal of ASTM International, Vol. 6, No.4. 2009
- [2] VYTENIS BABRAUSKAS a ROBERT BRADY WILLIAMSON. The historical basis of fire resistance testing — Part I. *Fire Technology* [online]. nedatováno, 1978(14 (3)), 184–194. Dostupné z: doi:10.1007/bf01983053
- [3] GROSSI, P., I. FEHR, R. MUIR-WOOD a Inc RISK MANAGEMENT SOLUTIONS. *The 1906 San Francisco Earthquake and Fire: Perspectives on a Modern Super Cat* [online]. B.m.: RMS, Incorporated, 2006. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=kigVHAAACAAJ>
- [4] JOHN GALES, CRISTIAN MALUK a LUKE BISBY. *Large-scale Structural Fire Testing - How did we get here, Where are we, and Where are we going?* B.m.: 15th International conference on experimental mechanics: Fire symposium, 2012.
- [5] CRISTIÁN MALUK a LUKE BISBY. *120 YEARS OF STRUCTURAL FIRE TESTING: MOVING AWAY FROM THE STATUS QUO*. B.m.: Invited plenary presentation at the 2nd Fire Engineering Conference. Valencia, Spain 2012
- [6] THOMAS, Philip. SFPE Classic Paper Review: Fire Behavior in Rooms by Kunio Kawagoe. *Journal of Fire Protection Engineering* [online]. 2004, 14(1), 5–8. Dostupné z: doi:10.1177/1042391504039408
- [7] C. MALUK, L. BISBY, G. TERRASI, M. KRAJCOVIC a J. L. TORERO. *Novel Fire Testing Methodology: Why, how and what now?* Hong Kong: Proceedings of the Mini Symposium on Performance-based Fire Safety Engineering of Structures as part of the 1st International Conference on Performance Based land Life Cycle Structural Engineering, 2012.
- [8] ČSN 730810. *Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [9] POKORNÝ, Marek a Petr HEJTMÁNEK. Pasivní požární ochrana stavebních konstrukcí v rámci bytové a občanské výstavby. In: *Seminář ČKAIT* [online]. Karlovy Vary. 2017. Dostupné z: <http://pozar.fsv.cvut.cz/akce/10-seminar-ckait-pasivni-pozarni-ochrana-stavebnich-konstrukci.html>
- [10] KUPILÍK, Václav. *Konstrukce pozemních staveb 80: požární bezpečnost staveb : přednášky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-80-01-03056-1.
- [11] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada, 2006. ISBN 978-80-247-1329-8.
- [12] ČSN EN 13501-2+A1 *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení*. B.m.: Praha: ÚNMZ. 2009

-
- [13] KUČERA, Petr, Tereza ČESELKÁ a Pavlína MATEČKOVÁ. *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-094-4.
- [14] WALD, František a Petra KALLEROVÁ. *Požární zkouška na experimentálním objektu v Mokru - Zpráva ze zkoušky*. B.m.: České vysoké učení technické v Praze. 2008
- [15] PAVUS a.s. *Pavus* [online]. 2004. [Citace: 1.1.2019] Dostupné z: <http://www.pavus.cz>
- [16] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION a SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS, ed. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. Quincy, Mass.: Bethesda, Md: National Fire Protection Association; Society of Fire Protection Engineers, 2002. ISBN 978-0-87765-451-3.
- [17] KUČERA, Petr a Jiří POKORNÝ. *Požární inženýrství v souvislostech*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2013. ISBN 978-80-7385-141-5.
- [18] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ a Ivo SCHWARZ. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [19] ČSN EN 1363-1. *Zkoušení požární odolnosti- Část1: Základní požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [20] KRAJČÍR, Maroš a Jana MÜLLEROVÁ. 3D Small-scale Fire Modeling Testing Preparation. *Procedia Engineering* [online]. 2017, 192, 480–485. ISSN 1877-7058. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.083](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.083)
- [21] NORÉN, Joakim a Birgit ÖSTMAN. Contribution to fire resistance from building panels. In: *Fire Safety Science: First International Symposium: Fire Safety Science: Proceedings of the First International Symposium* [online]. B.m.: Hemisphere, 2011, s. 325–335 [vid. 2016-09-13]. Dostupné z: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-12087>
- [22] FLÍDR, Václav. *Alternativní zjišťování požární odolnosti stěnových prvků*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební.
- [23] ING, Alexander, Kevin LYNCH, Dylan MARTEL a Tara SHARP. *Design of Small-Scale Furnace for Fire Resistance Testing of Building Construction Materials*. B.m.: Worcester Polytechnic Institute. 2017
- [24] PHAN, Long T., Therese P. MCALLISTER a John L. GROSS. *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. B.m.: National Institute of Standards and Technology. 2010
- [25] KARABAŞ, Ogan, Özgür KAPLAN, Kadri Süleyman YIĞIT a Mesut GÜR. *Numerical Investigation of Temperature Distribution in a Fire Resistance Test Furnace*. B.m.: Alanya/Antalya: 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science. 2016
-

-
- [26] CAPOTE, Jorge A a Daniel ALVEAR PORTILLA. *Fire protection and life safety in buildings and transportation systems advanced research workshop*. Santander: GIDAI, 2009. ISBN 978-84-8102-559-0.
- [27] MALUK, Cristian, Luke BISBY, Michal KRAJCOVIC a Jose Luis TORERO. A Heat-Transfer Rate Inducing System (H-TRIS) Test Method. *Fire Safety Journal* [online]. 2016. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.05.001>
- [28] BEYLER, Craig, Jesse BEITEL, Nestor IWANKIW a Brian LATTIMER. *Fire Resistance Testing for Performance-based Fire Design of Buildings. Final Report*. B.m.: The Fire Protection Research Foundation. 2007
- [29] *Fermacell Product Data Sheet* [online]. B.m.: Fermacell. 2014. Dostupné z: https://www.fermacell.com/fermacell_powerpanel_h2o_1240.php
- [30] SVENSSON, Stefan a STATENS RÄDDNINGSVÄRK (SWEDEN). *Fire ventilation*. Karlstad, Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2005. ISBN 978-91-7253-279-3.
- [31] JIŘÍČEK, Zdeněk. *Analýza odstupových vzdáleností od pergoly a přístřešků*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební.

Příloha 1 – Zdrojový kód pro CFD model – referenční zkouška

Zdrojový kód CFD modelu pro referenční zkoušku

```

*** Obecné informace o modelu ***
&HEAD
    CHID='FDS refmodel',
    TITLE='simulace referenční zkoušky/'
*** Čas simulace a výpočetní oblast ***
&TIME T_END=1800.0/      čas simulace
&DUMP DT_RESTART=30.0/  ukládání simulace po 30 sekundách
                        pro restartování výpočtu nutno
                        přidat příkaz pro MISC RESTART = .TRUE.

&MESH
    ID='sit'
    IJK=24,16,16,
    XB=0.0,1.2,0.0,0.8,0.0,0.8/  vnitřní výpočetní síť,
                                velikost jedné buňky 50x50x50 mm

*** Počáteční okrajové podmínky ***
&MISC
    SURF_DEFAULT='STENA'
    TMPA=20.0/      defaultní povrch a okolní teplota

*** Povrch a materiál požárně odolné desky Farmacell Powerpanel ***
&SURF
    ID='STENA'
    MATL_ID='FARMACELL'
    COLOR='GRAY'
    THICKNESS=0.0125/  SURF=surface,
                       tloušťka 12,5 mm (0,0125 m)

&MATL
    ID='FARMACELL'
    DENSITY=1000.0,
    SPECIFIC_HEAT=1.0
    CONDUCTIVITY=0.17/  MATL=materiál,
                       hustota (kg/m3),
                       specifické teplo (J/(kg.K)),
                       souč. tepelné vodivosti "lambda" (W/(m.K))

*** Otvory (OPEN = otevřená plocha)***
&VENT
    XB=0.4,0.8,0.0,0.0,0.0,0.1
    SURF_ID='OPEN'/  otvor pro přívod vzduchu - boční 1 (400x100 mm)

&VENT
    XB=0.4,0.8,0.8,0.8,0.0,0.1
    SURF_ID='OPEN'/  otvor pro přívod vzduchu - boční 2 (400x100 mm)

&VENT
    XB=0.4,0.8,0.0,0.0,0.55,0.65
    SURF_ID='OPEN'/  otvor pro odvod kouře - boční 1 (400x100 mm)

&VENT
    XB=0.4,0.8,0.8,0.8,0.55,0.65
    SURF_ID='OPEN'/  otvor pro odvod kouře - boční 2 (400x100 mm)

*** Hořák (OBST=obstruction) ***
&REAC
    ID='PROPANE'
    FUEL='PROPANE'
    C=3.0
    H=8.1
    SOOT_YIELD=0.024/  definice reakční hořící látky,
                       tj. propanu (plynový hořák)

&SURF
    ID='HORAK'
    HRRPUA=6666.666667
    RAMP_Q='fireramp'/  maximální výkon hořáku = 200 kW,
                       HRRPUA=200/(0,3,0,1)=6666.666667 kW/m2

&VENT
    XB=0.45,0.75,0.35,0.45,0.1,0.1
    SURF_ID='HORAK'
    COLOR='RED'/      hořící plocha hořáku

&OBST

```



```
XB=0.45,0.75,0.35,0.45,0.0,0.1
SURF_ID='INERT'
COLOR='BLACK'/ těleso hořáku
&RAMP ID = 'fireramp', T = 0.0, F = 0.0 / časově proměnlivý výkon,
T = čas (s),
F = % podíl v příslušném čase

&RAMP ID = 'fireramp', T = 3.0, F = 0.3 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 5.0, F = 0.3 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 10.0, F = 0.3 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 15.0, F = 0.305 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 20.0, F = 0.310 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 25.0, F = 0.315 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 30.0, F = 0.320 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 35.0, F = 0.330 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 40.0, F = 0.350 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 45.0, F = 0.360 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 50.0, F = 0.370 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 55.0, F = 0.380 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 60.0, F = 0.390 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 90.0, F = 0.400 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 120.0, F = 0.43 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 150.0, F = 0.44 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 180.0, F = 0.45 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 210.0, F = 0.46 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 240.0, F = 0.48 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 270.0, F = 0.50 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 300.0, F = 0.52 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 330.0, F = 0.53 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 360.0, F = 0.55 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 390.0, F = 0.56 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 420.0, F = 0.56 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 450.0, F = 0.565 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 480.0, F = 0.570 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 510.0, F = 0.575 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 540.0, F = 0.580 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 570.0, F = 0.585 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 600.0, F = 0.587 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 630.0, F = 0.590 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 660.0, F = 0.595 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 690.0, F = 0.598 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 720.0, F = 0.600 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 750.0, F = 0.605 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 780.0, F = 0.610 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 810.0, F = 0.615 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 840.0, F = 0.620 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 870.0, F = 0.625 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 900.0, F = 0.630 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 930.0, F = 0.633 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 960.0, F = 0.635 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 990.0, F = 0.638 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1020.0, F = 0.64 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1050.0, F = 0.642 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1080.0, F = 0.643 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1110.0, F = 0.644 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1140.0, F = 0.6442 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1170.0, F = 0.6445 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1200.0, F = 0.645 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1230.0, F = 0.65 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1260.0, F = 0.662 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1290.0, F = 0.665 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1320.0, F = 0.6655 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1350.0, F = 0.667 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1380.0, F = 0.67 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1410.0, F = 0.68 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1440.0, F = 0.685 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1470.0, F = 0.686 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1500.0, F = 0.687 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1530.0, F = 0.688 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1560.0, F = 0.689 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1590.0, F = 0.690 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1620.0, F = 0.701 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1650.0, F = 0.702 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1680.0, F = 0.703 /
```

```

&RAMP ID = 'fireramp', T = 1710.0, F = 0.704 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1740.0, F = 0.705 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1770.0, F = 0.706 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1800.0, F = 0.707 /
*** Termočlánky (°C) ***
&DEVC
  XYZ = 0.3,0.2,0.7
  QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
  ID = 'TC_1'
  PROP_ID='TC_1 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
  XYZ = 0.3,0.6,0.7
  QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
  ID = 'TC_2'
  PROP_ID='TC_2 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
  XYZ = 0.9, 0.2,0.7
  QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
  ID = 'TC_3'
  PROP_ID='TC_3 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
  XYZ = 0.9,0.6,0.7
  QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
  ID = 'TC_4'
  PROP_ID='TC_4 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
  XYZ = 0.3,0.2,0.25
  QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
  ID = 'TC_5'
  PROP_ID='TC_5 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
  XYZ = 0.3,0.6,0.25
  QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
  ID = 'TC_6'
  PROP_ID='TC_6 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
  XYZ = 0.9, 0.2, 0.25
  QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
  ID = 'TC_7'
  PROP_ID='TC_7 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
  XYZ = 0.9,0.6,0.25
  QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
  ID = 'TC_8'
  PROP_ID='TC_8 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&PROP ID='TC_1 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_2 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_3 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_4 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_5 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_6 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_7 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_8 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='PT_1 props', BEAD_EMISSIVITY=0.9/
&DEVC
  ID='PT_1',
  XYZ=1.1,0.4,0.6,
  QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS',
  ORIENTATION=-1.1,0.4,0.7,
  PROP_ID='PT_1 props'/ deskový snímač teploty - ve vzduchu
&DEVC
  ID='PT_2',
  XYZ=0.6,0.4,0.7,
  QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS',
  IOR=-0.6,0.4,0.7,
  PROP_ID='PT_1 props'/ deskový snímač teploty ve vzduchu
*** Barevné iso-plochy (SLICEFile) teplotní a rychlostní pole ***
&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBY = 0.4, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./

```

průměr termočlánku 3,0 mm

```
&SLCF PBX = 0.4, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./  
&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./  
*** Hodnoty na hranici výpočetní oblasti ***  
&BNDF QUANTITY = 'GAUGE HEAT FLUX' / BNDF = boundary file - dopadající tepelný tok  
&BNDF QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE' / teplota povrchů  
&BNDF QUANTITY = 'ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE' /  
*** Konec simulace ***  
&TAIL / konec simulace
```

Příloha 2 – Zdrojový kód pro CFD model – OSB deska

Zdrojový kód CFD modelu pro požární zkoušku s OSB deskou

*** Obecné informace o modelu ***

&HEAD

CHID='FDS',
TITLE='simulace požární zkoušky s OSB deskou/'

*** Čas simulace a výpočetní oblast ***

&TIME T_END=1800.0/ čas simulace
&DUMP DT_RESTART=30.0/ ukládání simulace po 30 sekundách
pro restartování výpočtu nutno
přidat příkaz pro MISC RESTART = .TRUE.

&MESH

ID='sit_1'
IJK=24,16,16,
XB=0.0,1.2,0.0,0.8,0.0,0.8/ výpočetní síť,
velikost jedné buňky 50x50x50 mm

*** Počáteční okrajové podmínky ***

&MISC

SURF_DEFAULT='STENA'
TMPA=20.0/ defaultní povrch a okolní teplota

*** Povrch a materiál požárně odolné desky Farmacell powerpanel + zkoušený vzorek OSB deska ***

&SURF

ID='STENA'
MATL_ID='FARMACELL'
COLOR='GRAY'
THICKNESS=0.0125/ SURF=surface,
tloušťka 12,5 mm (0,0125 m)

&MATL

ID='FARMACELL'
DENSITY=1000.0,
SPECIFIC_HEAT=1.0
CONDUCTIVITY=0.17/ MATL=materiál,
hustota (kg/m3),
specifické teplo (J/(kg.K)),
souč. tepelné vodivosti "lambda" (W/(m.K))

&OBST

XB=1.2,1.2,0.0,0.8,0.0,0.8
SURF_ID='VZOREK'
BULK_DENSITY=600.0
COLOR='BLUE/'

&MATL

ID='OSB'
DENSITY=600.0,
SPECIFIC_HEAT=1.55
CONDUCTIVITY=0.12
HEAT_OF_COMBUSTION=1.445E4/ MATL=materiál,
hustota (kg/m3),
specifické teplo (J/(kg.K)),
souč. tepelné vodivosti "lambda" (W/(m.K))
efektivní výhřevnost (kJ/kg)

&SURF

ID='VZOREK'
HRRPUA=195.0
RAMP_Q='OSB_RAMP_Q'
IGNITION_TEMPERATURE=250.0
BURN_AWAY=.TRUE.
BACKING='VOID'
MATL_ID(1,1)='OSB'
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0
THICKNESS(1)=0.015/

&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 0.0, F = 0.0/

časově proměnlivá rychlost uvolňování tepla (graf viz DP),
T = čas (s),
F = % podíl v příslušném čase

&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 25.6, F = 0.8877/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 66.25, F = 0.6768/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 159.6, F = 0.4816 /
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 460.73, F = 0.4764 /
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 629.36, F = 1.0 /
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 665.5, F = 1.0 /

```

&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 791.97, F = 0.3749 /
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 1008.78, F = 0.1718 /
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 1421.33, F = 0.138 /
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 1556.84, F = 0.0703 /
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T = 1800.0, F = 0.0667 /
*** Otvory (OPEN = otevřená plocha) ***
&VENT
  XB=0.4,0.8,0.0,0.0,0.0,0.1
  SURF_ID='OPEN'/   otvor pro přívod vzduchu - boční 1 (400x100 mm)
&VENT
  XB=0.4,0.8,0.8,0.8,0.0,0.1
  SURF_ID='OPEN'/   otvor pro přívod vzduchu - boční 2 (400x100 mm)
&VENT
  XB=0.4,0.8,0.0,0.0,0.55,0.65
  SURF_ID='OPEN'/   otvor pro odvod kouře - boční 1 (400x100 mm)
&VENT
  XB=0.4,0.8,0.8,0.8,0.55,0.65
  SURF_ID='OPEN'/   otvor pro odvod kouře - boční 2 (400x100 mm)
*** Hořák (OBST=obstruction) ***
&REAC
  ID='PROPANE'
  FUEL='PROPANE'
  C=3.0
  H=8.1
  SOOT_YIELD=0.024/   definice reakční hořící látky,
                       tj. propanu (plynový hořák)
&SURF
  ID='HORAK'
  HRRPUA=6666.666667
  RAMP_Q='fireramp'/   maximální výkon hořáku = 200 kW
&VENT
  XB=0.45,0.75,0.35,0.45,0.1,0.1
  SURF_ID='HORAK'
  COLOR='RED'/         hořící plocha hořáku
&OBST
  XB=0.45,0.75,0.35,0.45,0.0,0.1
  SURF_ID='INERT'
  COLOR='BLACK'/      těleso hořáku
&RAMP ID = 'fireramp', T = 0.0, F = 0.0 /   časově proměnlivý výkon,
                                           T = čas (s),
                                           F = % podíl v příslušném čase

&RAMP ID = 'fireramp', T = 3.0, F = 0.3 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 5.0, F = 0.3 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 10.0, F = 0.3 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 15.0, F = 0.305 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 20.0, F = 0.310 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 25.0, F = 0.315 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 30.0, F = 0.320 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 35.0, F = 0.330 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 40.0, F = 0.350 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 45.0, F = 0.360 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 50.0, F = 0.370 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 55.0, F = 0.380 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 60.0, F = 0.390 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 90.0, F = 0.400 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 120.0, F = 0.385 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 150.0, F = 0.37 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 180.0, F = 0.355 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 210.0, F = 0.34 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 240.0, F = 0.32 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 270.0, F = 0.305 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 300.0, F = 0.29 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 330.0, F = 0.275 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 360.0, F = 0.255 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 390.0, F = 0.24 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 420.0, F = 0.225 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 450.0, F = 0.21 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 480.0, F = 0.19 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 510.0, F = 0.175 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 540.0, F = 0.16 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 570.0, F = 0.145 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 600.0, F = 0.125 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 630.0, F = 0.11 /

```

```

&RAMP ID = 'fireramp', T = 660.0, F = 0.095 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 690.0, F = 0.08 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 720.0, F = 0.06 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 750.0, F = 0.0 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 926.0, F = 0.0 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 930.0, F = 0.355 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 960.0, F = 0.36 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 990.0, F = 0.40 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1020.0, F = 0.44 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1050.0, F = 0.47 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1080.0, F = 0.49 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1110.0, F = 0.50 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1140.0, F = 0.52 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1170.0, F = 0.53 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1200.0, F = 0.54 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1230.0, F = 0.55 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1260.0, F = 0.558 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1290.0, F = 0.559 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1320.0, F = 0.56 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1350.0, F = 0.565 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1380.0, F = 0.580 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1410.0, F = 0.590 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1440.0, F = 0.600 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1470.0, F = 0.605 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1500.0, F = 0.615 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1530.0, F = 0.625 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1560.0, F = 0.632 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1590.0, F = 0.638 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1620.0, F = 0.645 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1650.0, F = 0.650 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1680.0, F = 0.655 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1710.0, F = 0.660 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1740.0, F = 0.665 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1770.0, F = 0.670 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1800.0, F = 0.675 /
*** Termočlánky (°C) ***
&DEVC
    XYZ = 0.3,0.2,0.7
    QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
    ID = 'TC_1'
    PROP_ID='TC_1 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
    XYZ = 0.3,0.6,0.7
    QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
    ID = 'TC_2'
    PROP_ID='TC_2 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
    XYZ = 0.9, 0.2,0.7
    QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
    ID = 'TC_3'
    PROP_ID='TC_3 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
    XYZ = 0.9,0.6,0.7
    QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
    ID = 'TC_4'
    PROP_ID='TC_4 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
    XYZ = 0.3,0.2,0.25
    QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
    ID = 'TC_5'
    PROP_ID='TC_5 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
    XYZ = 0.3,0.6,0.25
    QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
    ID = 'TC_6'
    PROP_ID='TC_6 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
    XYZ = 0.9, 0.2, 0.25
    QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
    ID = 'TC_7'
    PROP_ID='TC_7 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
    XYZ = 0.9,0.6,0.25

```

```

QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_8'
PROP_ID='TC_8 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&PROP ID='TC_1 props', BEAD_DIAMETER=0.003/           průměr termočlánu 3,0 mm
&PROP ID='TC_2 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_3 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_4 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_5 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_6 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_7 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_8 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='PT_1 props', BEAD_EMISSIVITY=0.9/
&DEVC
  ID='PT_1',
  XYZ=1.1,0.4,0.6,
  QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS',
  ORIENTATION=-1.1,0.4,0.7,
  PROP_ID='PT_1 props'/           deskový snímač teploty ve vzduchu
&DEVC
  ID='PT_2',
  XYZ=0.6,0.4,0.7,
  QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS',
  IOR=-3,
  PROP_ID='PT_1 props'/           deskový snímač teploty ve vzduchu
*** Barevné iso-plochy (SLICEFile) teplotní a rychlostní pole ***
&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.4, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./
&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBX = 0.4, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE. /
&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE. /
*** Hodnoty na hranici výpočetní oblasti ***
&BNDF QUANTITY = 'GAUGE HEAT FLUX'/ BNDF = boundary file - dopadající tepelný tok
&BNDF QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE'/ teplota povrchů
&BNDF QUANTITY = 'ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE'/
*** Konec simulace ***
&TAIL /konec simulace

```

Fotodokumentace 1 – Výroba pece a referenční zkouška

Příloha 3 znázorňuje fotodokumentaci výroby pece, která byla následně použita na požární zkoušky. Fotodokumentace je seřazena po sobě jdoucích krocích, v první části je znázorněna výroba pece a ve druhé je znázorněna referenční požární zkouška.

Fotografie



Popis

- 1) Návrh velikosti jednotlivých desek, aby vnitřní rozměry odpovídaly navržené velikosti
- 2) Příprava přesných rozměrů k nařezání desek
- 3) Řezání desek bylo provedeno pomocí okružní pily
- 4) Případné nerovnosti byly pečlivě obroušeny, aby desky pasovaly



- 5) Vnější jeklová konstrukce pece



- 6) UD profily byly k jeklům uchyceny pomocí samořezných šroubů
- 7) Následně pak byly CD a UD profily mezi sebou sešroubovány obyčejnými šrouby



- 8) Montáž podlahy pece, která byla přichycena k CD profilům



- 9) Příprava bočních stěn pece.
- 10) Boční stěny byly smontovány ze 4 kusů desek, aby nedocházelo k pnutí ve spojích



- 11) Strop připravený k osazení do konstrukce



- 12) Smontovaná pec bez čelních stěn



- 13) Osazení čelních stěn k referenční zkoušce



- 14) Pec před referenční zkouškou s namontovanými termočlánky a připojeným plynovým hořákem



- 15) Začátek referenční zkoušky



- 16) Referenční zkouška po 15. minutách



- 17) Referenční zkouška ve 25. minutě
18) Ve 30. minutě byla zkouška ukončena

Fotodokumentace 2 – Požární zkouška s OSB deskou

V příloze 4 je znázorněna fotodokumentace požární zkoušky s OSB deskou. Fotografie jsou znázorněny po sobě jdoucích časových krocích.

Fotografie

Popis



1) Začátek zkoušky



2) Zkouška po 3. minutách

3) Dochází k prohnutí desky



4) Zkouška po 7. minutách



5) Zkouška po 9. minutách

6) Zakrytí vzniklého otvoru minerální vatou



7) Zkouška po 18. minutách

8) Deska hoří v horní části, kde jsou nejvyšší teploty



9) Zkouška ve 20. minutě

10) Ukončení požární zkoušky



11) Neexponovaná strana OSB desky po ukončení požární zkoušky



12) Exponovaná strana OSB desky po ukončení požární zkoušky