

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



VIRTUÁLNÍ PEC PRO ZKOUŠENÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI KONSTRUKCÍ

VIRTUAL FURNACE FOR FIRE-RESISTANCE TESTS OF STRUCTURES

Diplomová práce

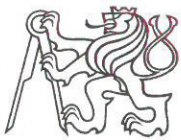
Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

Vedoucí práce: Ing. Kamila Cáblová, Ph.D.

Bc. Filip Zeman

Praha 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Zeman Jméno: Filip Osobní číslo: 396693

Zadávací katedra: Ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Virtuální pec pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí

Název diplomové práce anglicky: Virtual furnace for fire-resistance tests of structures

Pokyny pro vypracování:

- shrnutí problematiky
- experimentální studie
- numerický model
- závěrečná doporučení

Seznam doporučené literatury:

DRYSDALE, D. An introduction to fire dynamics. 3rd ed. Chichester. West Sussex : Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-31903-1.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D

Datum zadání diplomové práce: 11.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

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“.

13.10.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Kamily Cábové, Ph.D. a s použitím literatury a dalších zdrojů, které jsou citovány v práci.

V Praze dne 8. ledna 2018

Bc. Filip Zeman

Poděkování

Chtěl bych poděkovat své vedoucí diplomové práce Ing. Kamile Cábové, Ph.D., za odborné vedení, poskytnuté podklady, pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat všem členům grantu GAČR – Sdružený model pece pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí, především prof. Ing. Františku Waldovi, CSc. a Ing. Kamile Cábové, Ph.D. za možnost být členem tohoto kolektivu.

Obsah

Prohlášení	I
Poděkování	II
Obsah	III
Abstrakt	V
Abstract	V
Seznam použitých symbolů a zkratk	VI
1 Úvod	1
2 Současný stav poznání	2
2.1 Dynamika požáru v uzavřeném prostoru	2
2.2 Tlakové poměry a výměna plynů při požáru	2
2.3 Plně rozvinutý požár	3
2.3.1 Rovnice energetické rovnováhy pro plně rozvinutý požár	3
2.3.2 Teplota plynů v uzavřeném hořícím prostoru pro plně rozvinutý požár	4
2.4 Základy modelování CFD	5
2.4.1 Výpočtová síť	5
2.4.2 Modelování turbulence	6
2.5 Modelované pece	6
2.5.1 Cranfield University, Velká Británie	6
2.5.2 Instituto Politécnico de Bragança, Portugalsko	7
2.5.3 Efectis laboratoire, Francie	9
2.5.4 Kocaeli University, Turecko	10
3 Experimentální studie	12
3.1 Pec pro experimentální studii	12
3.1.1 Popis pece	12
3.1.2 Měření v peci	14
3.2 Prázdňá pec	16
3.3 Ocelový nosník	16
3.4 Dřevěné nosníky	17
4 Virtuální pec	20
4.1 Geometrie numerických modelů	20
4.1.1 Model prázdné pece	21
4.1.2 Model pece s ocelovým nosníkem	22
4.1.3 Model pece s dřevěnými nosníky	23
4.2 Materiály	24
4.3 Palivo pro hořáky	25
4.4 Nastavení výkonu hořáků	25
4.4.1 Výkon pro prázdnou pec	27
4.4.2 Výkon pro pec s ocelovým nosníkem	28
4.4.3 Výkon pro pec s dřevěnými nosníky	28
4.5 Ventilace	30
4.6 Teplota	31

4.7	Analýza citlivosti výpočetní sítě	32
4.8	Popis zdrojového kódu	33
5	Validace numerických modelů	34
5.1	Model prázdné pece	34
5.2	Model pece s ocelovým nosníkem	36
5.3	Model pece s dřevěnými nosíky	37
6	Porovnání numerických modelů	40
6.1	Řízení ventilace	40
6.2	Vliv hoření dřevěných nosníků	40
6.3	Teploty plynu	41
7	Závěr	44
Literatura	45
Seznam obrázků	46
Seznam grafů	47
Seznam tabulek	49
Příloha 1 – Rozmístění snímačů teploty v reálné peci	50
Příloha 2 – Rozmístění snímačů teploty v modelu pece	52
Příloha 3 – Tepelné vlastnosti použitých materiálů	54
Příloha 4 – Materiálové listy	56
Příloha 5 – Zdrojový kód	63

Abstrakt

Práce se zabývá vytvořením modelu virtuální pece. Jedná se o numerický model stropní pece pro zkoušku požární odolnosti konstrukcí. Zvolený software pro vytvoření virtuální pece je FDS (Fire Dynamics Simulator), který je založen na metodě CFD (Computational Fluid Dynamics). V první části se práce věnuje základním poznatkům dynamiky požáru. Následně jsou ukázány vybrané práce ze zahraničí, které se zabývaly tématikou vytvoření numerického modelu pece pro zkoušku požární odolnosti. Dalším bodem je náhled do problematiky modelování pomocí CFD, kde jsou vyjmenovány některé základní principy. Hlavním cílem práce je vytvoření numerického modelu pece. Práce popisuje vytvořený model a jeho výsledky. Důležitou částí je experimentální studie na základě, které byl model validován.

Klíčová slova

dynamika požáru; teplota plynu; tlak; zkouška požární odolnosti; model pece; CFD; FDS

Abstract

This thesis deals with creating a virtual furnace model. It is about a numerical model of a ceiling furnace for the fire resistance test of structures. For virtual furnace FDS (Fire Dynamics Simulator) is chosen. FDS is based on the CFD (Computational Fluid Dynamics) method. In the first part the thesis deals with basic knowledge in fire dynamics. Subsequently, works selected from abroad, which deal with the issue of the numerical model of the furnace for the fire resistance test are presented. A preview of CFD modelling with some basic principles is another point of the thesis. The main aim of this thesis is to create a numerical model of the furnace. The thesis describes the created model and its results. An experimental study serving for the validation of the model is an important part of the thesis.

Keywords

fire dynamics; gas temperature; pressure; fire resistance test; furnace model; CFD; FDS

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

c	Měrná tepelná kapacita	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$F(t)$	poměr průměrných výkonů hořáků v daném čase	-
P	Tlak	Pa
P_i	Tlak interiér	Pa
P_o	Tlak exteriér	Pa
$Q_{\emptyset}(t)$	Průměr výkonu hořáku v daném čase z experimentu	kW
$Q_{\emptyset,\text{max}}$	Maximální průměrný výkon z experimentu	kW
$Q_{\text{model}}(t)$	Výkon jednoho hořáku v daném čase	kW/m^2
\dot{Q}	Celkové množství uvolněného tepla	W
\dot{q}_L	Množství tepla odvedeného kouřem z prostoru	W
\dot{q}_W	Množství tepla spotřebovaného pro ohřev konstrukcí	W
\dot{q}_R	Množství tepla odvedeného sáláním z hořícího prostoru	W
\dot{q}_B	Množství tepla spotřebovaného na ohřev prostoru	W
S	Plocha hořáku v modelu	m^2
t	Čas	min

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}/(\text{mK})$
ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3
θ_g	Teplota plynu v požárním úseku	$^{\circ}\text{C}$

Zkratky

ATP	Adiabatická teplota povrchu
CFD	Computational Fluid Dynamics
DST	Deskový termočlánek

FDS	Fire Dynamics Simulator (software)	
HRRPUA	Maximální výkon jednoho hořáku v modelu	kW/m ²
MF	Mass flux	kg/(m ² ·s)
PO	Požární odolnost	
SMW	Smokeview (software)	
TC	Plášťový termočlánek	

1 Úvod

Pasivní požární ochrana staveb je tvořena stavebními konstrukcemi a jejich schopností odolávat účinkům požáru. Této schopnosti se říká „*požární odolnost konstrukcí*“ (dále jen PO). PO konstrukcí se může stanovit podle tabulek, výpočtem nebo zkouškou v akreditované zkušebně. PO určuje kritéria a dobu, po kterou je stavební konstrukce schopna odolávat účinkům požáru.

Stanovení PO konstrukcí pomocí experimentální zkoušky bývá velmi nákladné na finance a čas. Nicméně se tímto způsobem může zjistit PO konstrukcí, které mohou obsahovat nové materiály nebo mají atypické tvary a není tak možné je zařadit podle tabulek nebo stanovit jejich PO výpočtem.

Experimentální zkoušení se provádí v akreditovaných evropských zkušebnách. V České republice je takto akreditována zkušebna Pavus a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Zkoušení PO se provádí na horizontálních a vertikálních neboli stropních a stěnových pecí. Vytvořením takzvané „Virtuální pece“ tedy vytvořením numerického modelu pomocí vhodných softwarů, je možné dosáhnout snížení počtu experimentálních zkoušek a redukovat jejich vysoké finanční náklady.

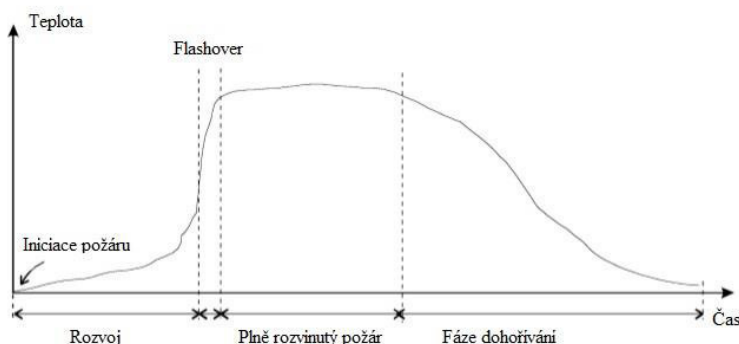
Obecně se uvádí, že teplota během zkoušky, je v každém místě zkušební pece stejná. Vytvořením modelu pece pro zkoušku požární odolnosti se mohou zaznamenat průběhy teplot v jakémkoli místě pece a zjišťovat rozdíly teploty plynu. Ve virtuální peci lze zjišťovat vliv zkušebních vzorků na průběh teploty a proudění horkých plynů. Cílem práce je vytvoření numerického modelu stropní pece pro zkoušku požární odolnosti konstrukcí.

2 Současný stav poznání

2.1 Dynamika požáru v uzavřeném prostoru

V oboru požárního inženýrství slouží dynamika požáru k dosažení číselného vyjádření hodnot potřebných pro návrh požární bezpečnosti staveb. Tímto se idealizuje skutečný rozvoj požáru, ke kterému může ve stavbách dojít [1].

Počátek rozvoje požáru uvnitř staveb se nejčastěji idealizuje k bodovému zdroji hoření na podlaze místnosti, který je popisován rychlostí uvolněné energie a tvorbou produktů hoření. Rychlost proudění plynných zplodin hoření je časově závislá veličina a roste vlivem rozdílů teploty a hustoty mezi produkty hoření a vnějším okolím. Důsledkem tohoto jevu vzniká vztlakový efekt. Průběh idealizovaného požáru v uzavřeném prostoru se rozděluje do čtyř základních fází [1, 2, 3]. Jednotlivé fáze jsou znázorněny na obr. 1.



Obr. 1 Fáze požáru v uzavřeném prostoru [1, 2, 3]

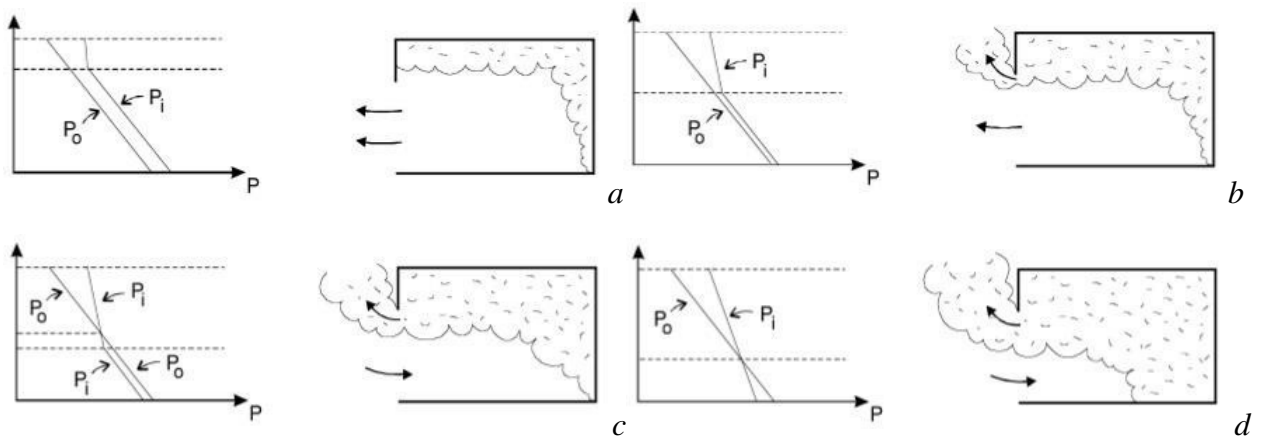
Během fáze plně rozvinutého požáru se dosahuje maximální intenzity hoření a požár je řízen dostupným palivem, nebo umožněným větráním. Plně rozvinutá fáze je popsána stálou intenzitou požáru dosahující maximálních teplot v posuzovaném prostoru. Tato část požáru je stěžejní při posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí a je simulována v peci pro zkoušku požární odolnosti [1]. Simulace této fáze se provádí pomocí nominálních křivek, více viz 2.3.2.

2.2 Tlakové poměry a výměna plynů při požáru

Pohyb plynů v uzavřeném prostoru při požáru je ovlivněn tlakovými poměry. Atmosférický tlak je způsobený tíhou vzduchového sloupce od povrchu země až po horní hranici atmosféry. Při technických výpočtech se obecně předpokládá hodnota atmosférického tlaku na zemském povrchu $101,3 \cdot 10^3$ Pa. Se vzrůstající vzdáleností od zemského povrchu se předpokládá pokles tlaku přibližně $10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ [1, 3].

Nejběžnějším způsobem pro vyjádření tlakových poměrů a pohybu plynů při požáru v uzavřeném prostoru je prostor s otevřeným okenním nebo dveřním otvorem sousedícím s otevřeným

prostorem. Schématické zobrazení tlakových poměrů je na obr 2. Průběh plnění místnosti kouřem a následná závislost na tlakových poměrech je znázorněna od písmene *a* po *d* [1, 3].



Obr. 2 Tlakové profily při požáru otvorem v obvodové stěně [1]

2.3 Plně rozvinutý požár

Požár po celkovém vzplanutí uzavřeného prostoru, kdy teploty dosahují nejvyšších hodnot, je ve většině případů řízen ventilací. Požár je v takovém případě závislý na množství kyslíku v hořícím prostoru. V rozměrných prostorách nebo dobře větraných místnostech může nastat situace, kdy je požár řízen palivem. Teploty během této fáze jsou v každém místě zasaženého prostoru téměř stejné. Doba trvání plně rozvinutého požáru je obvykle od 30 minut a může trvat až 3 hodiny. Plně rozvinutý požár obvykle končí po vyhoření 70 % paliva a nastává fáze dohořívání. Právě zahřátím podle normové teplotní křivky v pecích pro zkoušku požární odolnosti konstrukcí se simuluje fáze plně rozvinutého požáru. Fáze dohořívání už součástí zkoušky není [1].

2.3.1 Rovnice energetické rovnováhy pro plně rozvinutý požár

Podle fyzikálních zákonů je množství uvolněného tepla v uzavřeného prostoru zachováno. Pro plně rozvinutý požár je tedy stanovena základní rovnice energetické rovnováhy, která obsahuje působení jednotlivých složek tepla, viz obr. 3 [1].

$$\dot{Q} = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R + \dot{q}_B$$

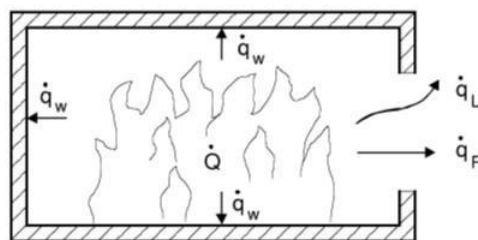
kde \dot{Q} celkové množství uvolněného tepla [W]

\dot{q}_L množství tepla odvedeného kouřem z prostoru [W]

\dot{q}_W množství tepla spotřebovaného pro ohřev konstrukcí [W]

\dot{q}_R množství tepla odvedeného sáláním z hořícího prostoru [W]

\dot{q}_B množství tepla spotřebovaného na ohřev prostoru (zanedbává se) [W]



Obr. 3 Tepelné ztráty během plně rozvinutého požáru [3]

Proto, aby mohla tato rovnice energetické rovnováhy platit, je potřeba přistoupit k určitým zjednodušujícím podmínkám. Tato zjednodušení jsou například výskyt požáru v celém prostoru, průběh výměny plynů bez vlivu překážek, předpoklad pro jednosměrné vedení tepla přes konstrukce [1].

2.3.2 Teplota plynů v uzavřeném hořícím prostoru pro plně rozvinutý požár

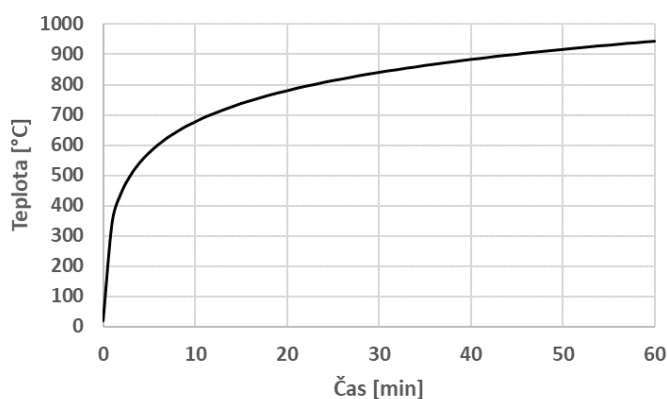
Pro stanovení teploty plynů v prostoru, kde došlo k flashoveru, tedy v plně rozvinuté fázi požáru, existuje řada postupů. Tyto postupy vycházejí z rychlosti uvolňování tepla, požárního zatížení, parametru odvětrání a jednotlivých složek rovnice energetické rovnováhy. Nejčastějším způsobem, jak popsat teploty plynu v této fázi požáru jsou teplotní křivky [1].

Teplotní křivky můžeme rozdělit do skupin na nominální a parametrické teplotní křivky. Mezi nominální teplotní křivky řadíme uhlovodíkovou křivku, křivku vnějšího požáru, křivku pomalého hoření a normovou teplotní křivku. Právě normová teplotní křivka je klíčem pro zjišťování požární odolnosti konstrukcí pozemních staveb. Ať se požární odolnost stanovuje pomocí tabulek, výpočtů nebo zkoušek, vždy je teplota plynu stanovena podle normové teplotní křivky (ISO 834), viz graf 1. Rovnice pro normovou teplotní křivku je dána následujícím vztahem [1]:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

kde θ_g teplota plynu v požárním úseku [°C]

t čas [min]



Graf 1 Normová teplotní křivka [1]

2.4 Základy modelování CFD

V oblasti požárního inženýrství je na výběr několik metod, jak lze daný požár modelovat. Dle základního dělení je možné rozlišovat modely fyzikální a modely matematické. Matematické modely zahrnují takzvanou skupinu deterministických matematických modelů. Do této skupiny patří nejčastěji používané zónové modely a také nejsofistikovanější modely typu pole (CFD, z ang. Computational Fluid Dynamics) [3, 4].

Největší výhodou výpočtových požárních modelů je schopnost předpovídat průběh modelovaného požáru v rozsahu zadaných parametrů. Touto metodou je tedy vhodné řešit konkrétní situaci neboli konkrétní návrhový scénář daného požáru [4].

Modely CFD jsou založeny na principu rozdělení výpočtové oblasti do množství trojrozměrných buněk neboli kontrolních objemů. Pro tyto kontrolní objemy jsou jednotlivě řešeny rovnice zachování hmotnosti, energie, hybnosti a částicového složení. Jedná se o řešení pomocí Navier-Stokesových rovnic. CFD model sám o sobě neřeší detaily související s požárem jako je například proces hoření. Ten je obsažen až v samostatném submodelu požáru doplněného do základního modelu CFD [3, 4].

Základní rozdělení modelu CFD [3]:

- Preprocesor (např. Pyrosim): definování geometrie řešeného prostoru, velikosti výpočetní sítě, parametrů fyzikálních a chemických jevů potřebné pro modelování, určení okrajových podmínek jako jsou například materiály konstrukcí. Některé softwary nemusí využívat preprocesor a požární scénáře je možné zadat přímo do vstupního kódu.
- Řešič (např. FDS): zde jsou neznámé proměnné pro další časový krok, dochází k aproximaci a k řešení rovnic.
- Postprocesor (např. Smokeview): umožňuje zobrazení vstupních a výstupních dat v různých formách.

2.4.1 Výpočtová síť

Výpočtovou oblastí se myslí prostor, ve kterém se provádí veškeré výpočty řešených veličin. Výpočtová síť se definuje tvarem, velikostí, počtem kontrolních objemů a počátečními podmínkami. Tvar a velikost výpočtové sítě se volí tak, aby co nejlépe odpovídala řešené geometrii prostoru [4].

Výpočetní síť, často označována jako „*MESH*“, je nejčastěji tvořena z na sebe navazujících trojrozměrných kontrolních objemů specifických tvarů. Počet kontrolních objemů ovlivňuje kvalitu sledovaných veličin a také dobu trvání samotného výpočtu numerického modelu. Pro dosažení kvalitních výsledků se postupuje tzv. metodou postupného zjemňování kontrolních objemů. Postupuje se tak, že prvotní výpočty se provádí na hrubé síti a postupně se zmenšuje velikost kontrolních objemů. Toto se provádí, dokud není hodnota sledovaných veličin u dvou po sobě jdoucích hustot výpočetních sítí minimální. Velikosti kontrolních objemů se v závislosti na

zvoleném požárním scénáři pohybují od milimetrů až do metrů. Pro každý kontrolní objem se počítají jednotlivé výpočty a tím je možné získat realističtější výsledky pro proudění plynů i v případech složitější geometrie řešeného prostoru [4].

2.4.2 Modelování turbulence

Velmi důležitou částí v CFD je hydrodynamický submodel, který řeší proudění tekutin. U požáru se vyskytuje turbulentní proudění a lze jej charakterizovat pomocí vírových struktur. Důležitou vlastností vírových struktur je jejich délkové měřítko. Toto délkové měřítko se u běžných požárů pohybuje okolo 1 mm. Z toho vyplývá, že pro diskretizaci Navier-Stokesových rovnic by se velikost kontrolních objemů měla stanovit podle délkového měřítka vírových struktur. Takto jemné kontrolní objemy by způsobovaly velkou náročnost na hardwarové vybavení a výpočetní čas, proto je nutné stanovit určité zjednodušení [4].

Řešením tohoto problému je numerická simulace turbulentního proudění, která se řeší třemi přístupy. První metodou je časové (Reynoldsovo) středování (RANS), za druhé lze postupovat metodou velkých vírů (LES) nebo třetí možností je metoda přímé numerické simulace (DNS) [4].

Metodou velkých vírů jsou rovnice proudění řešeny pro střední tok i pro největší vírové struktury vyskytující se u většiny požárních kuželů. Základním principem metody LES je, že víry, které jsou důsledkem směšování, jsou natolik velké, aby mohly být spočteny s přesností pomocí rovnic dynamiky tekutin. Tuto metodu numerické simulace turbulentního proudění používá software FDS [4].

2.5 Modelované pece

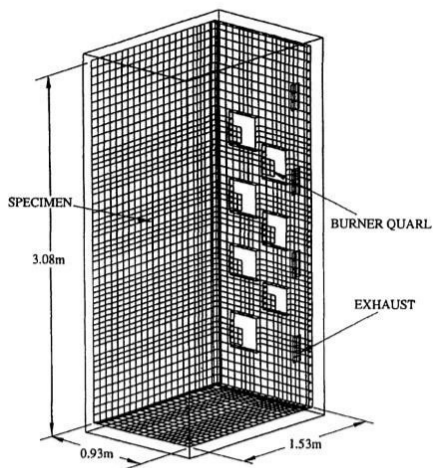
2.5.1 Cranfield University, Velká Británie

Na univerzitě v Cranfieldu v roce 1997 byla poprvé použita metoda CFD pro modelování pece pro zkoušení požární odolnosti. Použitý software byl SOFIE (Simulation Of Fires In Enclosures). Jednalo se o modelování pece o vnitřních rozměrech 1,53 m x 0,93 m x 3,08 m o celkovém objemu 8,76 m³ viz obr. 4. Model byl navržen tak, že modelovaná část byla pouze symetrická polovina pece. Pec byla zahřívána celkem čtrnácti plynovými hořáky (po sedmi na kratších stranách), kde palivem byla směs metanu a vzduchu. Ohřev pece byl řízen podle křivky ISO 834. Pec měla stěny z keramického zdiva o tloušťce 150 mm. Zkušební vzorkem v peci byl ocelový plech o tloušťce 50 mm [5].

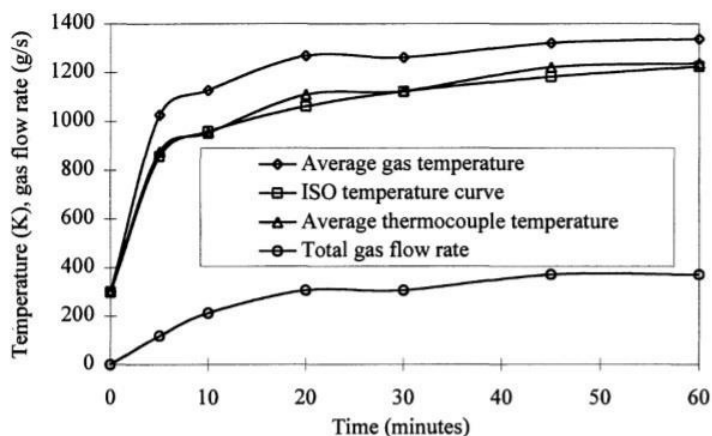
Do pece bylo umístěno celkem 18 termočlánků. Plocha o vlastnostech zrcadla v rovině symetrie měla výpočtovou síť 24 x 21 x 25 uzlů s 27 216 buňkami. Zrcadlo v rovině symetrie bylo použito z důvodů snížení náročnosti požadavků na paměť a výpočetní čas [5].

V modelu byly měřeny hodnoty odraženého a dopadajícího tepleného toku, teploty na termočláncích a na stěnách zkušební vzorku. Výsledky simulace ukázaly, že v modelu je teplota

plynu větší než podle ISO 834. Nicméně průměrná teplota termočlánků byla téměř totožná s křivkou ISO 834 a teploty se nelišily o více jak 50 K (graf 2). Výsledky tohoto modelu nebyly nikdy validovány pomocí výsledků z experimentů [5].



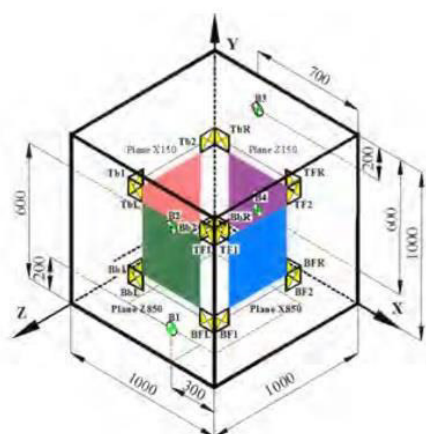
Obr. 4 Geometrie modelované pece [5]



Graf 2 Teploty a průtok plynu v peci [5]

2.5.2 Instituto Politécnico de Bragança, Portugalsko

V roce 2009 byl v laboratořích polytech. inst. v Braganca vytvořen virtuální model pece. Cílem této práce bylo zjištění rozložení teplot uvnitř pece za pomoci šestnácti deskových termočlánků. Deskové termočlánky byly umístěny tak, aby bylo možné měřit teploty ve čtyřech rovinách, viz obr. 5. Naměřené hodnoty se porovnávaly s referenčními termočlánky, podle kterých se řídí ohřev pece. Proběhly celkem tři experimentální testy, kdy první dva byly ohřívány podle křivky ISO 834 v délce 45 minut a třetí experimentální test byl zahříván podle uhlovodíkové křivky v době 30 minut [6].



a) Furnace model with four burners B_i ($i=1,4$).



b) Geometric position for plate thermocouples inside furnace.

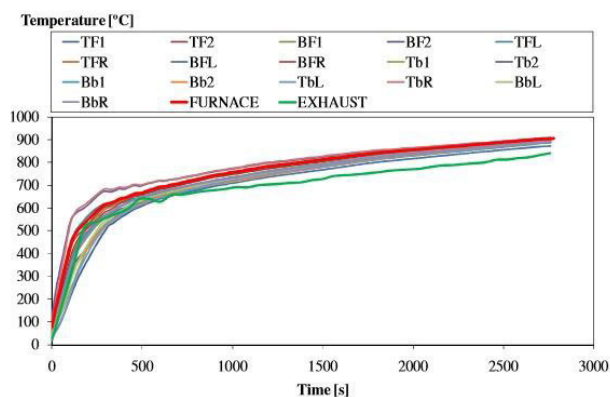


c) Furnace with opened door after running test 3.

Obr. 5 Model pece pro zkoušku požární odolnosti – Portugalsko [6]

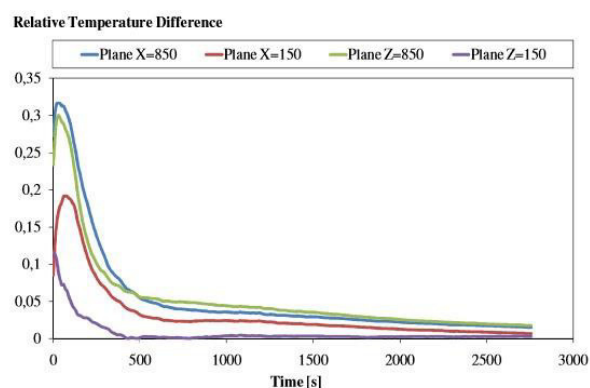
Zkoušky byly provedeny na peci s vnitřním objemem 1 m³. Pec měla čtyři propanové hořáky s výkonem 90 kW. Pec byla vybavena 16 deskovými termočlánky upevněnými na ocelové konstrukci, viz obr. 5 [6].

Z experimentálních dat bylo zjištěno, že v počáteční fázi ohřevu jsou naměřené teploty rozdílné od referenčních hodnot maximálně o 30 %. Po uplynutí doby 500 sekund jsou rozdíly menší než 5 %. Na grafu 3 je možné pozorovat naměřené teploty z první zkoušky a rozdíly naměřených teplot oproti referenčním hodnotám na grafu 4 [6].



a) Test 1 with ISO 834 nominal curve.

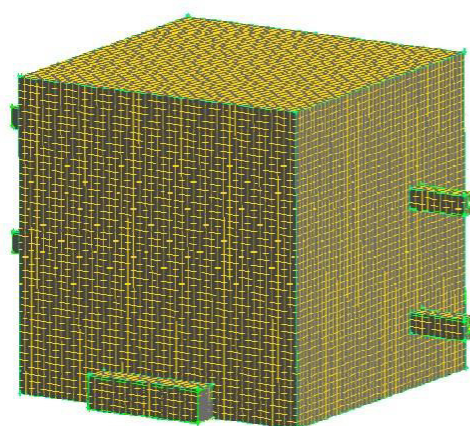
Graf 3 Teploty v experimentu test 1 [6]



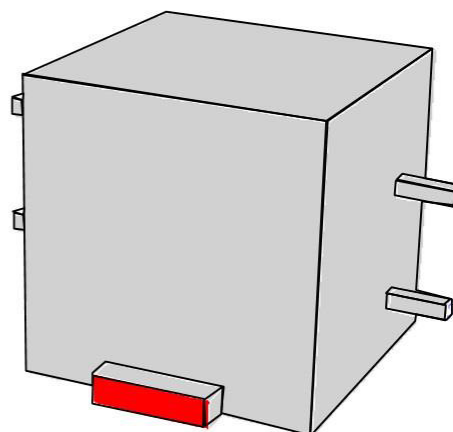
b) Test 1 with ISO 834 nominal curve.

Graf 4 Rozdíly teplot v experimentu test 1 [6]

Numerický model byl proveden pomocí Fluent CFD. Pro pohyb a reakce chemických látek byl použit Eddy Dissipation Model (EDM). Numerický model byl sestaven ze strukturované výpočetní sítě za použití 125 840 buněk, každá s délkou strany 0,02 m, viz obr. 6. Numerické výsledky byly srovnatelné s experimenty, přičemž relativní rozdíl byl menší než 5 % pro každý test. Numerické simulace také odhalily lokální účinek každého hořáku [6].



a) Finite volume mesh.

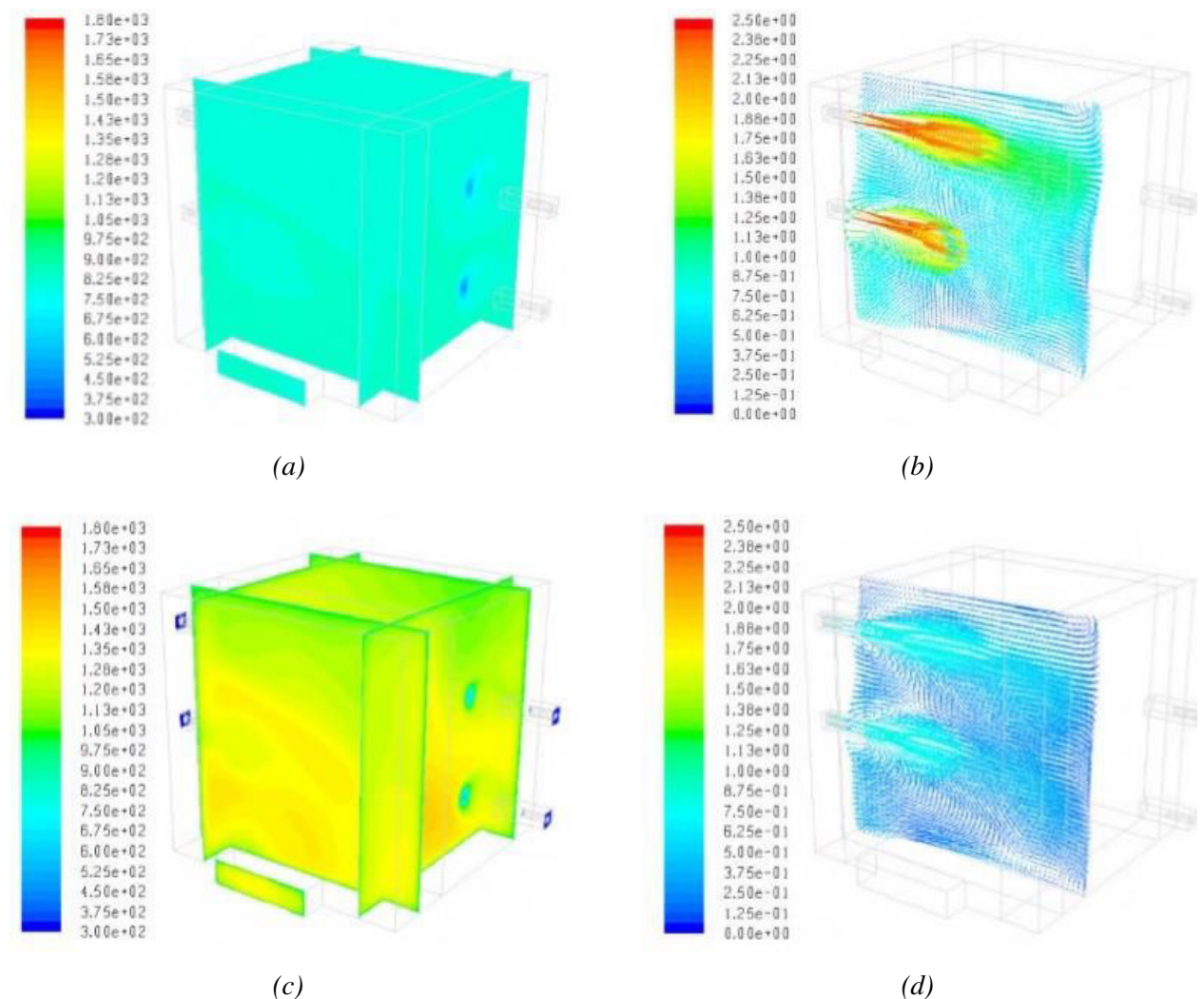


b) Solid Model, with 4 burners and exhausts.

Obr. 6 Numerický model pece pro zkoušku požární odolnosti – Portugalsko [6]

Na numerickém modelu bylo pozorováno, že teplota plamene je závislá na několika faktorech v průběhu procesu spalování a významně ovlivňuje přenos tepla uvnitř pece. Na obr. 7 jsou

představeny teploty a rychlost proudění při simulaci zkoušky 1. Jsou zde také zobrazeny hořáky B3 a B4 [6].



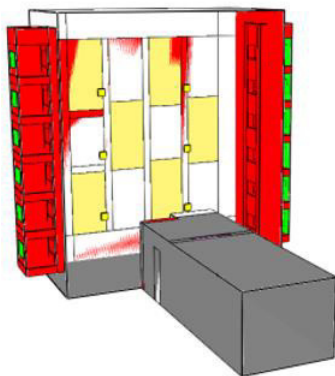
Obr. 7 Numerické výsledky simulace testu 1 a) Teploty [K] ve čtyřech rovinách, čas 300 s b) Vektor rychlosti v rovině pro hořáky B3/B4, čas 300 s c) Teploty [K] ve čtyřech rovinách, čas 3600 s d) Vektor rychlosti v rovině pro hořáky B3/B4, čas 3600 s [6]

Simulace pece ukázala lokální účinek hořáků a tento jev byl potvrzen i během experimentu. U simulací zkoušek 1 a 2 bylo dosaženo menších rozdílů než 10 % oproti referenčním hodnotám teploty v peci po uplynutí doby 500 sekund. Tyto výsledky ověřily funkční podmínky modelu pece pro zkoušku požární odolnosti a na jejich základě lze předpokládat téměř rovnoměrné rozdělení teploty uvnitř pece [6].

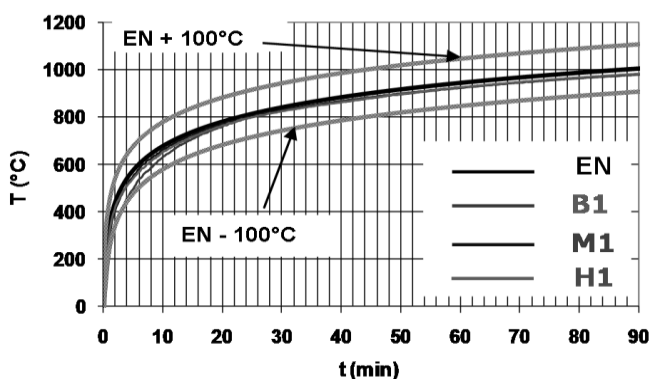
2.5.3 Efectis laboratoire, Francie

Numerický model pece z roku 2011 pochází z laboratoře Efectis z Francie. Proběhlo zde několik experimentálních zkoušek, kde zkoušenými vzorky byly betonová stěna, dřevěný poklop v pórobetonové desce, sádkartonová deska a fasádní sendvičové panely. Model pece byl

vytvořen pomocí softwaru FDS, viz Obr. 8. Pec byla ohřívána pomocí 12 plynových hořáků. Palivem byla směs zemního plynu a vzduchu. Řízení teploty v modelu bylo nastaveno pomocí šesti modelovaných deskových termočlánků. Na Obr. 8 je průběh teploty naměřené deskovými termočlánky v modelu s porovnáním s křivkou ISO 834 a limitními hodnotami pro zkoušení požární odolnosti. Model vytvořený ve Francii má dobře nastavené ovládání pro ohřev virtuální pece a dosahuje tak přesných výsledků s porovnáním s křivkou ISO 834 [7].



Obr. 8 Numerický model pece – Francie [7]

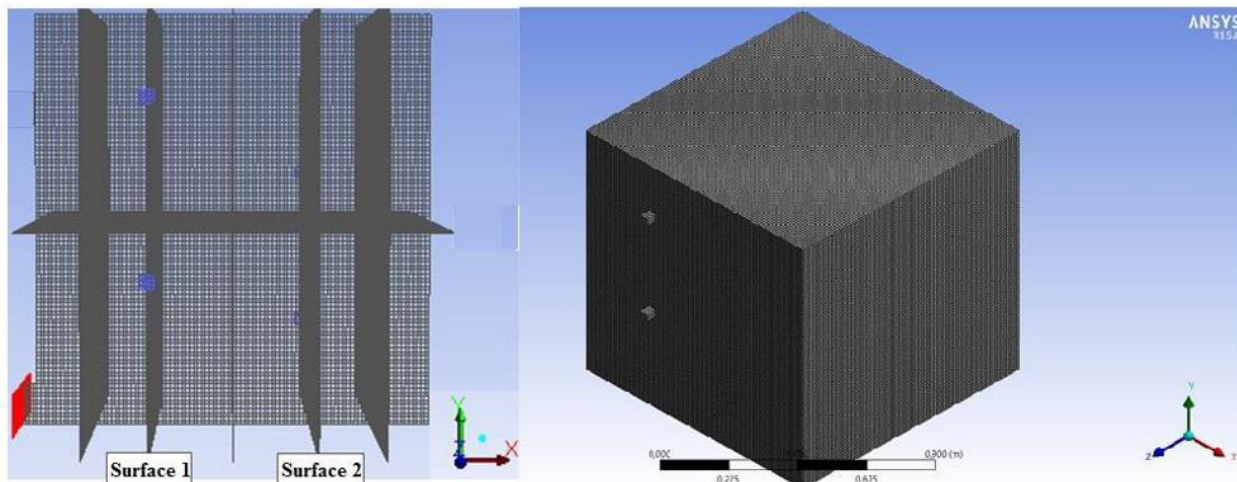


Graf 5 Teploty deskových termočlánků [7]

2.5.4 Kocaeli University, Turecko

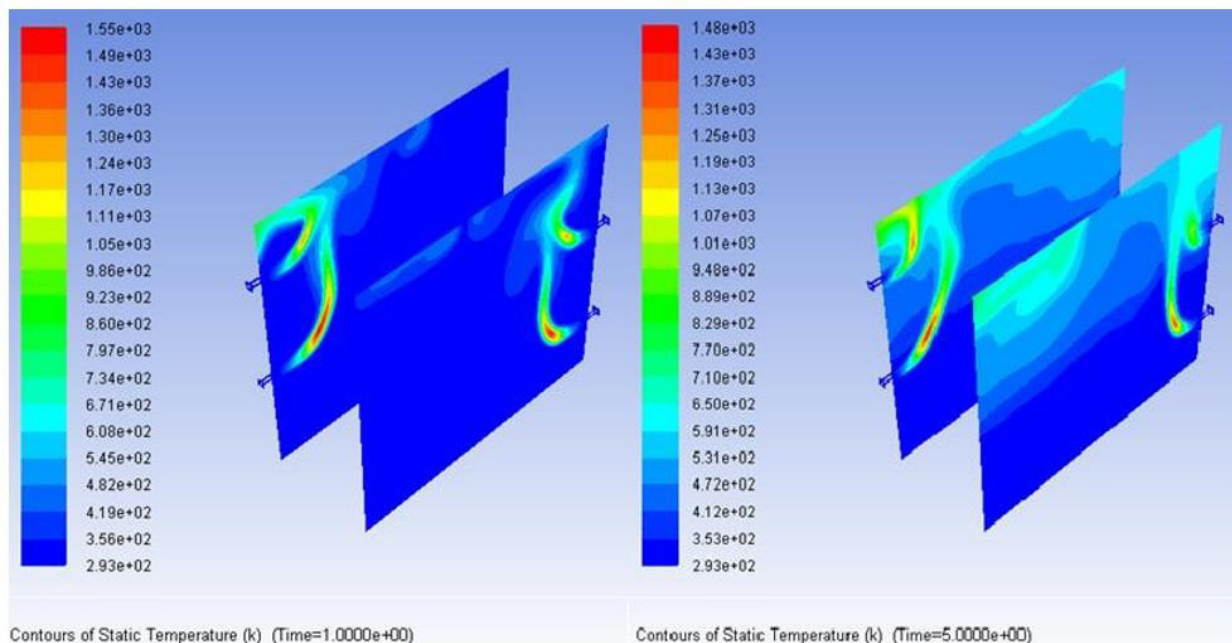
Na univerzitě Kocaeli v Turecku byla v roce 2016 zpracována studie na model trojrozměrné pece pro zkoušku požární odolnosti. Studie byla zpracována za účelem vyhodnocení a stanovení distribuce teploty uvnitř pece pro zkoušku požární odolnosti [8].

Pec pro zkoušku požární odolnosti byla navržena v souladu s TS EN 1363-1. Teplotní křivka ohřevu je ISO 834. V této studii je modelována pec o vnitřním rozměru 1 m³ se čtyřmi propanovými hořáky. Pro CFD analýzu byl použit výpočetní program ANSYS Fluent. Výpočtová síť byla tvořena 1 032 361 buňkami, viz obr. 9 [8].



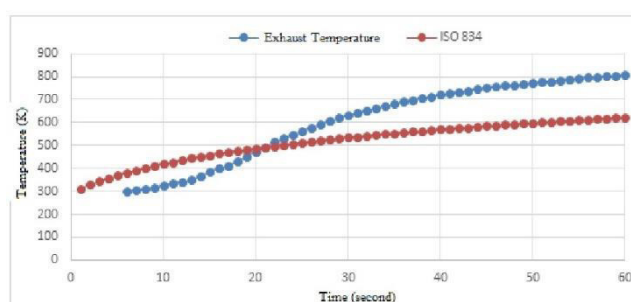
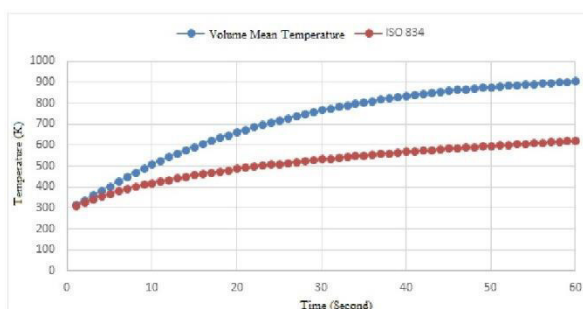
Obr. 9 Geometrie, síť a povrchy modelované pece – Turecko [8]

Modelem bylo zjištěno, že při dodání směsi propanu a vzduchu dochází k hoření jenom v přední části hořáku, viz obr. 10. Na obr. 10 je také možné vidět nárůst teploty na horním povrchu pece. Vzhledem k tomu, že teplota narůstá v horní části pece, větrací otvor byl umístěn v dolní části (červená část na obr. 9) [8].



Obr. 10 Rozložení teplot v 1. (vlevo) a v 5. (vpravo) sekundě [8]

Průměrná teplota v peci je znázorněna na grafu 6 s porovnáním oproti křivce ISO 834. S nárůstem času je rozdíl mezi průměrnou teplotou a křivkou ISO 834 větší. Důvodem rozdílu zjištěných hodnot teploty oproti křivce je, že uvnitř pece je více energie, než by mělo být. Následně byla zkoumána teplota odvětrávaných plynů, viz graf 7. Simulací bylo zjištěno, že v prvních 21 sekundách jsou teploty nižší než křivka ISO 834 a tím pádem zůstalo v peci více energie. Tím byly způsobeny větší teploty uvnitř pece oproti ISO 834 (graf 7) [8].



Graf 6 Průměrné teploty v peci vs ISO 834 [8] Graf 7 Teploty odťahovaných plynů vs ISO 834 [8]

3 Experimentální studie

3.1 Pec pro experimentální studii

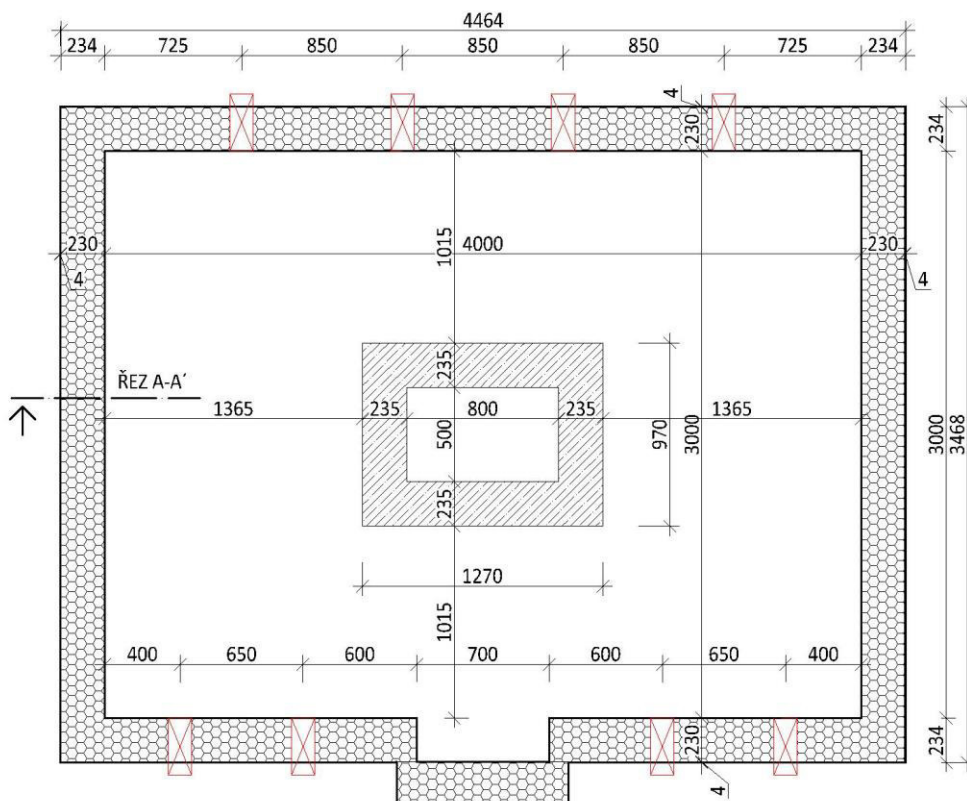
3.1.1 Popis pece

V rámci grantu GAČR 16-18448S Sdružený model pece pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí na Fakultě stavební, proběhlo několik experimentálních zkoušek pro validaci modelu virtuální pece. Experimenty se prováděly v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Zkoušky byly realizovány na horizontální neboli stropní peci (obr. 11).

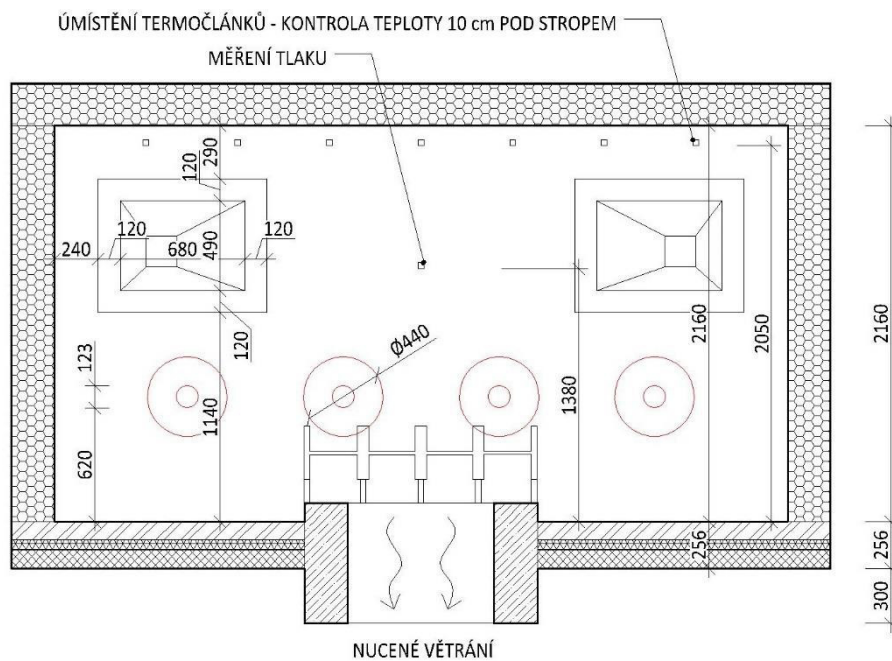


Obr. 11 Stropní pec v Pavus a.s.

Stropní pec má vnitřní půdorysné rozměry 3,0 m x 4,0 m (obr. 12) a světlou výšku stropu 2,16 m nad podlahou (obr. 13). V případě prováděných experimentů je strop tvořen dvěma tepelně izolačními panely s ocelovou konstrukcí uložených na obvodových stěnách o rozměrech 1,585 m x 4,4 m. Vstup do pece je možný dveřním otvorem v přední z delších stran. Dveře mají světlý rozměr 0,7 m x 1,795 m. Během zkoušek je možné nahlížet do vnitřku pece přes čtyři prosklené průzory. Tyto průzory se sešikmeným ostěním mají vnější rozměr 0,1 m x 0,1 m a vnitřní rozměr 0,68 x 0,49 m (obr. 13). V podlaze uprostřed pece je odvětrávací otvor. Kolem otvoru je zhotoven betonový límec s výškou 0,1 m a tloušťkou 0,235 m. Samotný otvor má světlé rozměry 0,5 m x 0,8 m. Výsledný vnitřní rozměr numerického modelu pece je co nejvíce přizpůsoben rozměrům této skutečné pece. Jednotlivé skladby konstrukcí a použité materiály v peci jsou podrobně rozepsány v kapitole 4.



Obr. 12 Půdorys zkušební pece

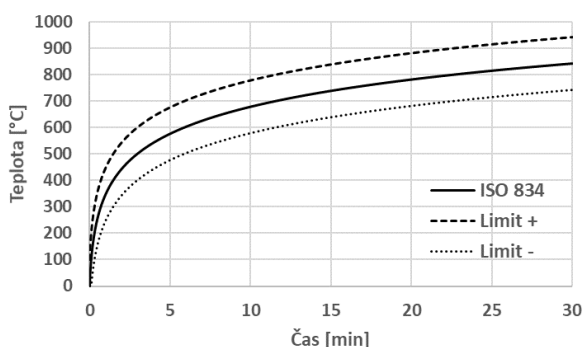


Obr. 13 Řez A-A' zkušební pece

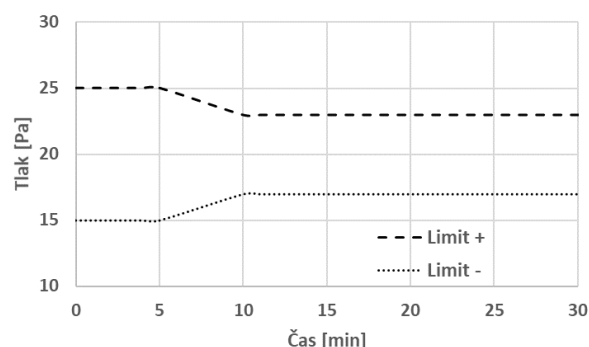
Horizontální pec je ohřívána osmi plynovými hořáky, vždy čtyřmi na jedné z delších stran. Hořáky jsou umístěny 0,68 m nad podlahou (obr. 13). Palivem je směs zemního plynu a vzduchu. Nejčastěji se pec ohřívá podle nominálních křivek. Řízení teploty probíhá pomocí deskových

termočlánků umístěných 0,1 m pod stropem. Tyto deskové snímače teploty řídí na základě zjištěných teplot výkonu hořáků. Výkony hořáků je možné regulovat podle průměrné teploty z řídicích deskových termočlánků nebo jednotlivě přiřadit hořák ke konkrétním deskovým termočlánkům. Tento způsob je velmi efektivní a ve stropní peci se dosahuje velmi přesných teplot podle nominálních křivek. Při zkoušení PO podle normové teplotní křivky jsou podle normy ČSN EN 1363-1 dány limity ± 100 °C oproti ISO 834 [9]. Na grafu 8 je zobrazena normová teplotní křivka s dovolenými limity.

Neméně důležitým parametrem je měření přetlaku v peci oproti okolnímu tlaku vzduchu. Samotné měření se provádí čidlem na zadní straně pece ve výšce 1,38 m nad podlahou. Rozdíl hodnoty tlaků uvnitř a vně pece je dán normou ČSN EN 1363-1. Tato hodnota rozdílu přetlaků je 20 Pa. Norma dovoluje limity přetlaku ± 5 Pa do 5. minuty a ± 3 Pa od 10. minuty zkoušky (graf 9) [9]. Regulování tlaku pece probíhá přes obdélníkový otvor v podlaze a následným nuceným odtahem přes ventilátor potrubím ven. Kolem větracího otvoru v podlaze je betonový límec, který slouží i jako základ pro ocelovou konstrukci, která slouží k ochraně odtahu před padajícími částmi zkušebních vzorků. Odvodem pomocí tohoto otvoru se reguluje přetlak v peci, aby tak odpovídal normovým požadavkům.



Graf 8 Normová teplotní křivka s limity



Graf 9 Limity přetlaku

3.1.2 Měření v peci

V průběhu všech provedených experimentálních zkoušek byly měřeny teploty 16 deskovými snímači teploty (DST) a 25 plášťovými termočlánky typu K (TC). Seznam použitých snímačů je v tab. 1 a tab. 2. Rozmístění snímačů v peci je zobrazeno na schématech v příloze 1. Během experimentů byly snímače teploty vždy na stejné pozici tak, aby bylo možné zjišťovat vliv zkušebních vzorků na průběh teploty. Termočlánky byly umístěny tak, aby bylo možné sledovat průběh teploty v několika výškových a řezových rovinách. Plášťové termočlánky jsou umístěny v každém měřicím místě, zatímco deskové snímače teploty jsou umístěny především 0,1 m pod stropem.

Tab. 1 Seznam deskových snímačů teploty

Orientace rovnoběžně	Vzdálenost od stropu	Řez A-A'	Řez B-B'	Řez C-C'	Celkem DST
s podlahou	100 mm	20 – 23	25 – 28	31 - 34	16
s podlahou	750 mm	24	29 – 30	35	

Tab. 2 Seznam plášťových termočlánků

Vzdálenost od stropu	Řez A-A'	Řez B-B'	Řez C-C'	Celkem TC
100 mm	40 – 43	48 - 51	57 – 60	25
750 mm	44 – 46	52 – 55	61 – 63	
1250 mm	47	56	64	

Jako plášťové termočlánky byly použity termočlánky o průměru 2 mm z materiálu Inconel 600 (obr. 14). Snímači teploty byla měřena teplota plynu. Deskové snímače teploty byly použity o čtvercovém rozměru 100 mm x 100 mm (obr. 14). Měřením pomocí deskových snímačů teploty lze získat průběhy celkového tepelného toku, jeho částí od proudění, sálání a adiabatickou teplotu povrchu (ATP). Podrobnější informace ohledně použití termoelektrických článků je uvedeno v ČSN 1361-1.



Obr. 14 Plášťový termočlánek a deskový snímač teploty 100 mm pod stropem

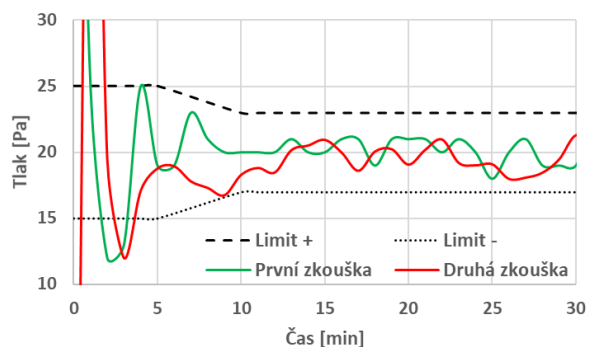
3.2 Prázdná pec

První experiment byl rozdělen na dvě části. První zkouška zahrnovala ohřev prázdné pece podle teplotní křivky ISO 834. Druhý experiment byl zahřívání prázdné pece při konstantním výkonu hořáků. Obě dvě zkoušky trvaly necelých 35 minut. Z těchto experimentů je zaznamenán průběh teplot v měřených bodech bez vlivu zkušebních vzorků. Data ze zkoušek posloužila pro zjištění výkonů hořáků a slouží k nastavení výkonů hořáků v numerickém modelu.

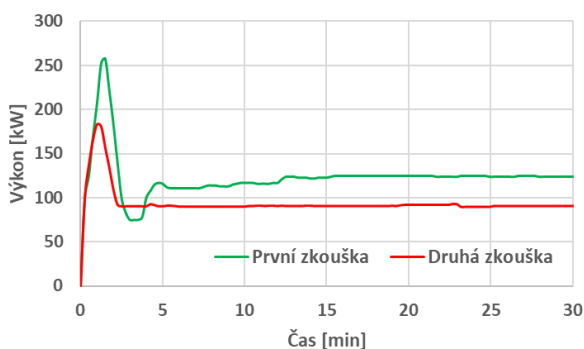
Na obr. 15 je pohled do pece skrze okenní otvor během experimentu. Na grafu 10 je vidět průběh rozdílu tlaků během obou zkoušek. Mimo počáteční fázi se rozdíl venkovního tlaku a vnitřního tlaku dařilo držet mezi limitními hodnotami stanovené normou. Graf 11 zobrazuje průběh průměrného výkonu osmi hořáků v peci z obou prováděných zkoušek. Průběh teploty plynu během experimentu je znázorněn na grafu 12, kde je záznam průměru naměřených hodnot deskovými snímači teploty.



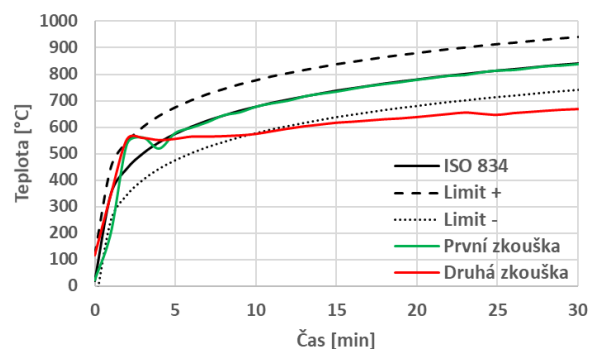
Obr. 15 Prázdná pec



Graf 10 Rozdíl tlaku během zkoušek



Graf 11 Průměrné výkony hořáků



Graf 12 Teploty během zkoušky

3.3 Ocelový nosník

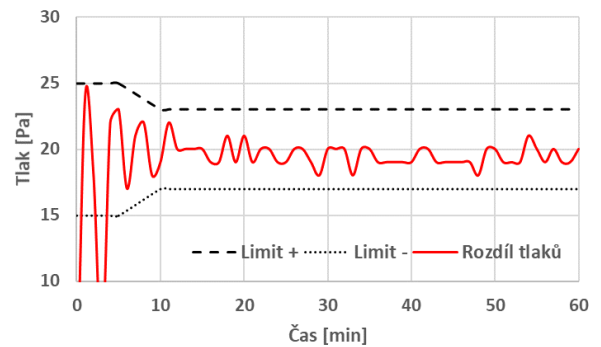
Dalším experimentem byla zkouška s ocelovým válcovaným nosníkem IPE 400 délky 3,81 m. Ohřev pece byl řízen podle normové teplotní křivky (ISO 834). Nosník byl zavěšen těsně pod strop zkušební pece. Zavěšení bylo provedeno na čtyřech závitových tyčích, tak aby nedošlo k jeho průhybu a nevznikla tak mezi horní pásnicí a stropem vzduchová mezera. Nosník byl orientován

rovnoběžně s delšími stranami pece. Naměřené průběhy teploty zahrnují vliv zkušební vzorku. Během experimentu byly měřeny i teploty samotného zkušební vzorku, a to jak plášťovými termočlánky, tak deskovými snímači teploty. Experiment trval necelých 65 minut.

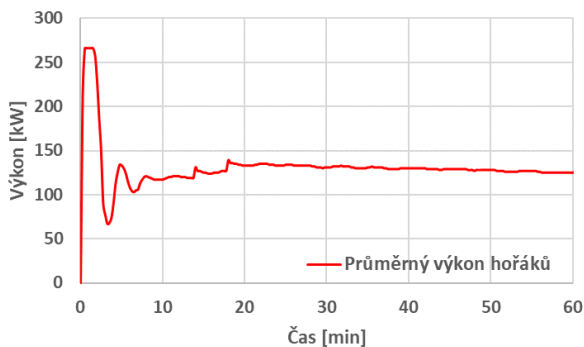
Na obr. 16 je pohled do pece během zkoušky, kde je vidět ocelový nosník zbarvený do svítivě červené. Kolem nosníku jsou vidět plášťové termočlánky a deskové snímače teploty. Graf 13 zobrazuje průběh rozdílu tlaků naměřený během zkoušky. Opět došlo k počátečnímu vychýlení jako u předchozího experimentu. Na grafu 14 je znázorněn průběh průměrného výkonu hořáků. Po srovnání tohoto průměrného výkonu s předchozím experimentem je vidět, že v případě zkoušky s ocelovým nosníkem je potřeba většího výkonu. Nosník během zkoušky odebírá teplo ze svého okolí, a tak hořáky musí dodávat více energie do prostoru pece. Průběh teploty plynu naměřeného z průměru deskových snímačů teploty je možné pozorovat na grafu 15. V grafu 15 jsou i znázorněny průběhy teploty ocelového nosníku naměřené plášťovými termočlánky.



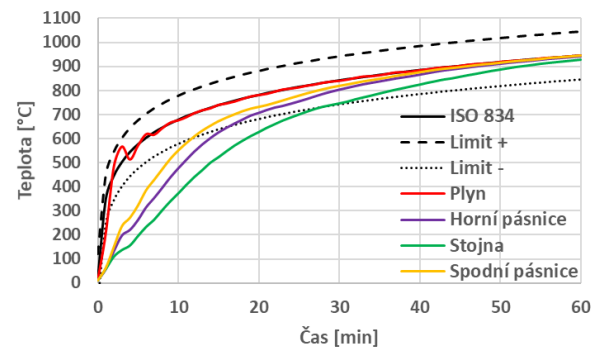
Obr. 16 Pec s ocelovým nosníkem



Graf 13 Rozdíl tlaků během zkoušky



Graf 14 Průměrný výkon hořáků



Graf 15 Teploty během zkoušky

3.4 Dřevěné nosníky

Třetím experimentem byla zkouška s třemi lepenými dřevěnými nosníky průřezu 100 mm x 240 mm. Tyto nosníky byly uloženy v příčném směru, tedy kolmo na delší strany pece. Tato orientace byla zvolena proto, aby se dosáhlo jiných podmínek během zkoušky než u experimentu s ocelovým nosníkem. Nosníky byly kotveny závitovými tyčemi a speciálními vruty skrze stropní

izolační panely. Nosníky byly zavěšeny tak, aby nevznikala mezi stropem a jejich vrchním povrchem vzduchová mezera.

V rámci grantu, kterého byl tento experiment součástí, proběhlo několik dalších měření a pozorování. První nosník byl opatřen na spodních rozích čtyřmi ocelovými „L“ úhelníky. Druhý nosník byl opatřen čtyřmi obdélníkovými plechy kotvenými svorníky vždy po dvou na svislých stranách nosníku a třetí byl ponechán bez úpravy (obr. 17). Následně do nich bylo zavedeno celkem 30 plášt'ových termočlánků (obr. 18). Ocelové plechy byly na dřevěné nosníky připevněny z důvodu pozorování vlivu přítomnosti plechů na odhořívání dřeva.



Obr. 17 Dřevěné nosníky

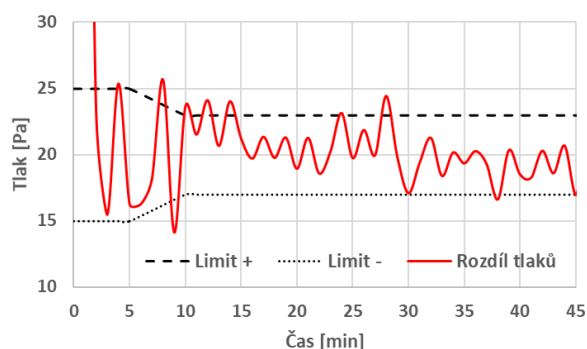


Obr. 18 Termočlánky v nosníku

Na obr. 19 je pohled do pece během zkoušky, kde jsou vidět odhořívající dřevěné nosníky a ocelové plechy. Během experimentu bylo možné pozorovat plamenné hoření nosníků. Graf 16 zobrazuje průběh rozdílu tlaků naměřený během zkoušky. Je patrné, že vlivem odhořívání dřevěných nosníků a jejich tepelným příspěvkem na celkovou energii pece docházelo k větším výkyvům přetlaku než u předchozích zkoušek. Opět došlo k počátečnímu vychýlení jako u předchozích experimentů.



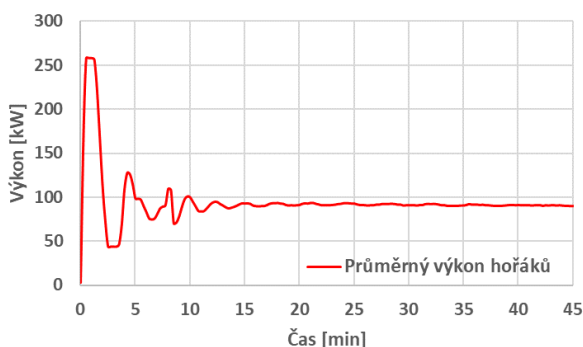
Obr. 19 Pec s dřevěnými nosníky



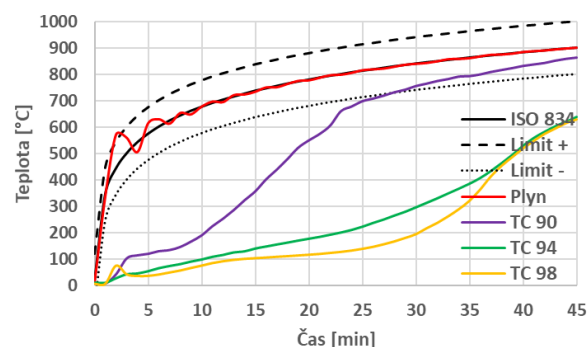
Graf 16 Rozdíl tlaku během zkoušky

Na grafu 17 je znázorněn průběh průměrného výkonu hořáků. Po srovnání tohoto průměrného výkonu s předchozími experimenty je vidět, že v případě zkoušky s dřevěnými nosníky je potřeba menšího výkonu. To je způsobeno příspěvkem tepelné energie uvolněné z hořících nosníků. Průběh teploty plynu naměřeného z průměru deskových termočlánku je možné zjistit z grafu 18.

V grafu 18 jsou zobrazeny i průběhy teploty naměřené v dřevěném nosníku bez ocelových plechů. Je zde vidět, že plášťový termočlánek TC 90, který byl umístěn nejbližší povrchu na hraně nosníku, začal po odhoření dřeva měřit teplotu plynu.



Graf 17 Průměrný výkon hořáků

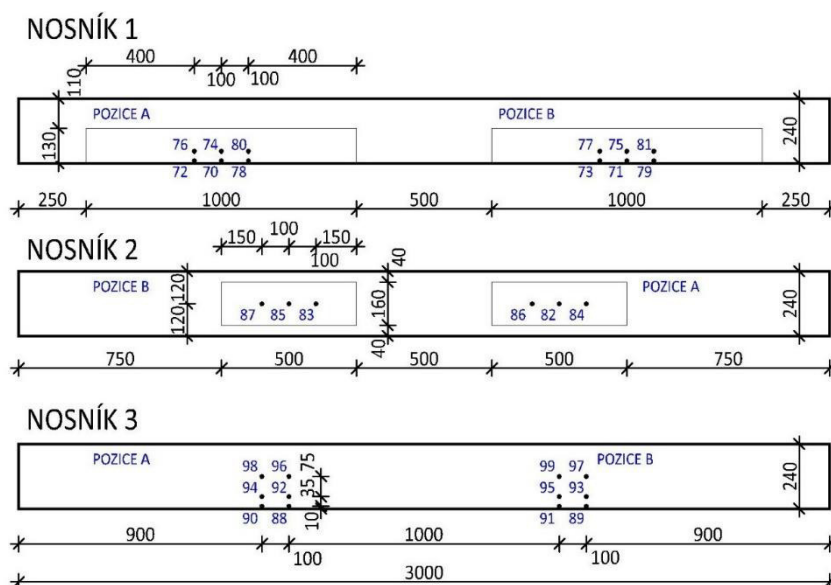


Graf 18 Teploty během zkoušky

Plášťové termočlánky pro měření teploty byly osazeny na nosnících v různých hloubkách a pozicích. Některé měřily teplotu ocelových plechů a jiné teplotu uvnitř dřevěných nosníků. V tabulce 3 je uveden seznam plášťových termočlánků, jejich účel měření teploty a umístění na nosníku. Na obrázku 20 je schéma rozmístění jednotlivých snímačů na dřevěných nosnících.

Tab. 3 Seznam plášťových termočlánků v dřevěných nosnících

Měřený materiál	Hloubka [mm]	Číslo plášťového termočlánku					
		Nosník č. 1		Nosník č. 2		Nosník č. 3	
		poz. A	poz. B	poz. A	poz. B	poz. A	poz. B
dřevo	10	70, 74	71, 75	82	83	88, 92, 96	89, 93, 97
dřevo	30	72, 76	73, 77	84	85	90, 94, 98	91, 95, 99
ocel	0	78, 80	79, 81	86	87	/	/



Obr. 20 Dřevěné nosníky s pozicemi snímačů teploty

4 Virtuální pec

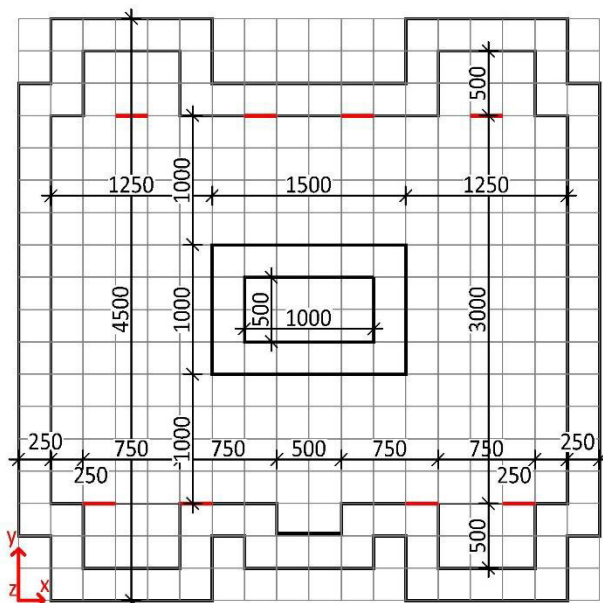
Numerický model pece je vytvořen pro stropní pec pro zkoušku požární odolnosti stavebních konstrukcí v Pavus a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Jedná se o pec, na které se prováděly experimenty zmíněné v kapitole 3. Zvolený software pro vytvoření numerického modelu je FDS 6.5.4 [10]. Jedná se o program, který je založen na matematické metodě modelování CFD. Software FDS (z angl. Fire Dynamic Simulator) je například schopný modelovat tyto fyzikální jevy: přestup tepla mezi pevným povrchem a vzduchem, přestup tepla prouděním a sáláním, pyrolýzu pevných částic nebo hoření plynných produktů a mnoho dalšího [11]. Program FDS je proto vhodný pro vytvoření numerického modelu pece pro zkoušku požární odolnosti konstrukcí. Jako vizualizační program je použit postprocesor Smokeview 6.4.2. [12].

Virtuální pec vychází z původní verze numerického modelu z diplomových prací Ing. Petry Novotné [13] a Ing. Nikolý Liškové [14]. Hlavními úpravami jsou změny velikosti výpočetní sítě a upravení počtu kontrolních objemů. Dále je upravena geometrie jednotlivých pevných povrchů. Důležitým přidaným prvkem je nastavení nuceného odtahu přetlaku pomocí ventilátoru umístěného v otvoru podlahy. Nově jsou u vybraných materiálů vnitřní obálky pece nastaveny materiálové vlastnosti závislé na teplotě. Novější verze FDS přinesla vylepšení modelování v oblasti měření adiabatické teploty povrchů pomocí deskových snímačů teploty. S touto verzí je možné simulovat měření adiabatické teploty povrchu pomocí deskových snímačů teploty v přesné pozici jako u experimentu (tzn. nemusí se měření umísťovat na pevný povrch).

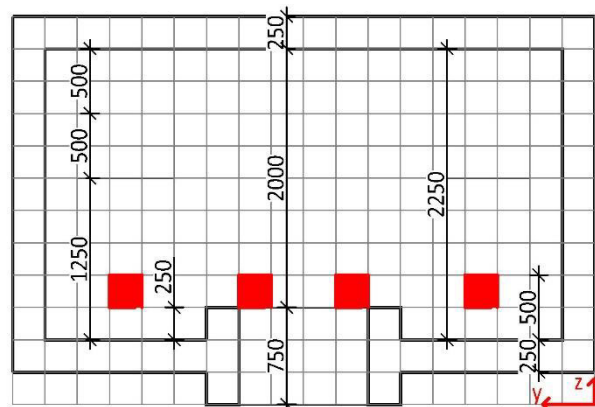
4.1 Geometrie numerických modelů

Modelování ve vybraném softwaru umožňuje vytvořit pouze jeden konkrétní případ simulace zkoušky v peci. Z tohoto důvodu je vytvořen zdrojový kód pro každý experiment. V zásadě se jednotlivé modely od sebe neliší, jsou pouze přidány nebo odebrány zkušební vzorky a jejich měřící zařízení.

Základní tedy společná geometrie numerických modelů vychází ze zvolené výpočetní sítě. Původní model měl geometrii pece uzpůsobenou velikosti výpočetní sítě 4,5 m x 4,5 m x 3,00 m s velikostí jednoho kontrolního objemu 250 mm x 250 mm x 250 mm (obr. 21 a 22). Výpočetní síť obsahovala 3 888 kontrolních objemů. Veškeré konstrukce a měřící zařízení musely být modelovány v tomto modulu. Pro modelování zkušebních vzorků byla nastavena lokální jemnější síť s velikostí kontrolního objemu 50 mm x 50 mm x 50 mm, aby jemné kontrolní objemy přímo navazovaly na hrubé kontrolní objemy. Výhodou této hrubé sítě byla menší náročnost na výpočetní čas. Bylo tak možné efektivně a v krátkém čase vyzkoušet jednotlivá nastavení numerických modelů.



Obr. 21 Zobrazení výpočetní sítě v půdorysu



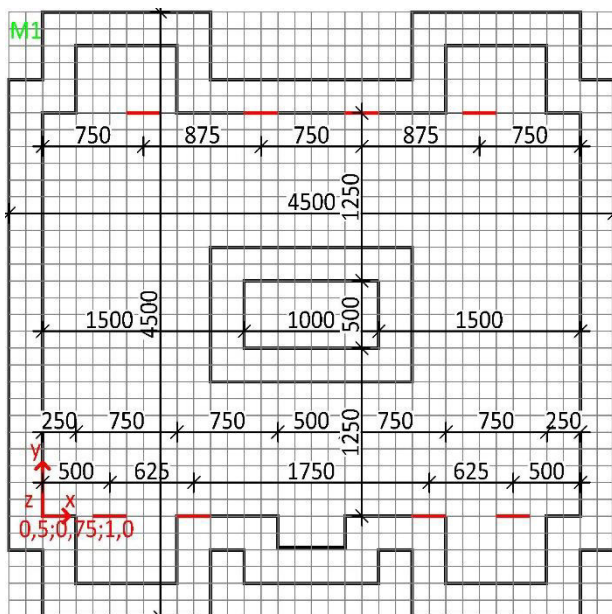
Obr. 22 Zobrazení výpočetní sítě v řezu

Po ověření funkčnosti modelu bylo možné upravit výpočetní síť a velikost kontrolních objemů tak, aby se výsledná geometrie numerických modelů přizpůsobila co nejvíce skutečné peci. Zjemněním výpočetní sítě také došlo k lepšímu navázání mezi lokálně zhuštěnou a základní výpočetní sítí. Při výběru velikosti sítě je velmi důležité dbát na počet kontrolních objemů ve směru osy Y a Z. Protože při velkém množství výpočtů je používán Poissonův řešič založený na algoritmu rychlé Fourierovy transformace. Proto je vhodné volit takový počet kontrolních objemů, aby výsledná hodnota ve směru osy Y a Z byla rozložitelná na součin prvočísel 2, 3 a 5 [11]. Díky dodržení tohoto pravidla dochází ke zkrácení doby výpočtu.

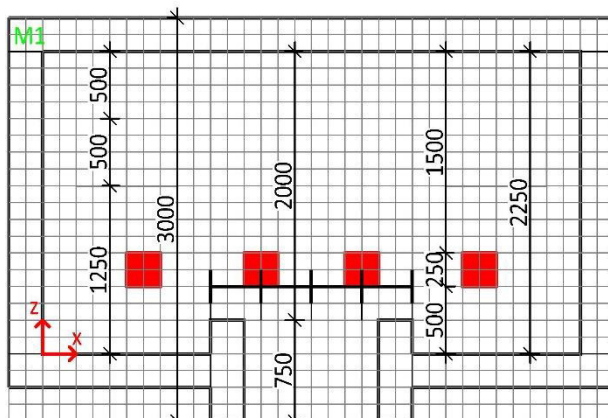
4.1.1 Model prázdné pece

Výsledná geometrie odpovídá výpočetní síti „M1“ o velikosti 4,5 m x 4,5 m x 3,0 m s velikostí jednoho kontrolního objemu 125 mm x 125 mm x 125 mm, tedy s počtem kontrolních objemů v jednotlivých osách $X = 36$, $Y = 36$, $Z = 24$ a je společná pro všechny numerické modely. Výpočetní síť bez lokálního zhuštění obsahuje 31 104 kontrolních objemů. Zvýšení počtu kontrolních objemů způsobilo nárůst potřebné doby na výpočet, ale umožnilo přesnější modelování geometrie pece a zkušebních vzorků.

Na obrázcích 23 a 24 je řez a půdorys numerického modelu prázdné pece. Černou tlustou čarou jsou zobrazeny jednotlivé konstrukce pece, jako jsou stěny, podlaha, strop a límec z izolačního žárobetonu kolem větracího otvoru. Veškeré konstrukce jsou modelovány v tloušťce 250 mm. Nicméně FDS umožňuje nastavení přesné tloušťky jednotlivých konstrukcí pro výpočet přestupu tepla a množství odebrané energie z prostoru do konstrukce. Přesné rozměry konstrukcí jsou sepsány v kapitole 4.2. Červenou barvou jsou znázorněny modelované hořáky, které jsou umístěny podle skutečné pece s ohledem na výpočetní síť. Ochranná ocelová konstrukce ventilačního otvoru je namodelována jako tenká překážka pro proudění plynu s reálnou tloušťkou konstrukce 30 mm.



Obr. 23 Zobrazení sítě v půdorysu

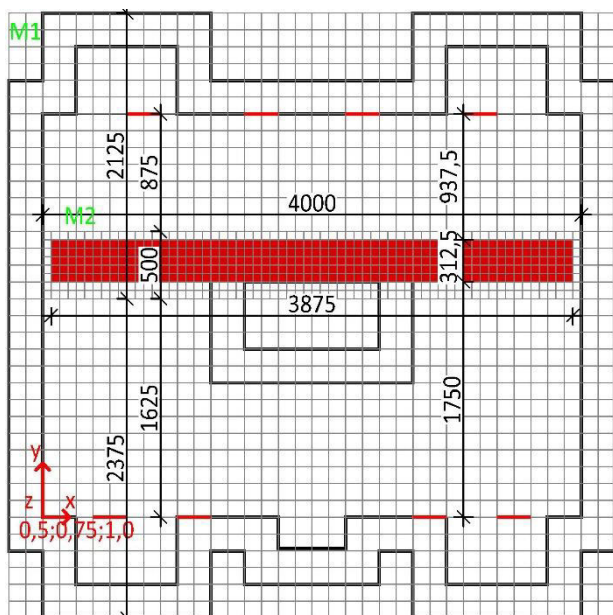


Obr. 24 Zobrazení sítě v řezu

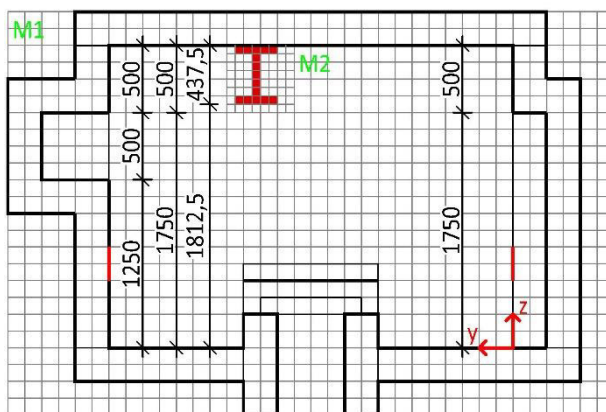
Změnou oproti původnímu numerickému modelu je nastavení počátku souřadného systému do vnitřního rohu pece na podlahu. Díky nastavení počátku na tuto pozici je umožněná snadná orientace ve vnitřním objemu pece a snadnému umístění měřících zařízení a zkušebních vzorků podle naměřených hodnot z experimentů.

4.1.2 Model pece s ocelovým nosníkem

Model pece s ocelovým nosníkem vychází z původního modelu prázdné pece a má přidanou jednu lokálně zhuštěnou výpočetní síť „M2“ s rozměry 4,0 m x 0,5 m x 0,5 m s velikostí kontrolního objemu 62,5 mm x 62,5 mm x 62,5 mm s počtem 4 096 kontrolních objemů (obr. 25 a 26).



Obr. 25 Zobrazení sítě v půdorysu

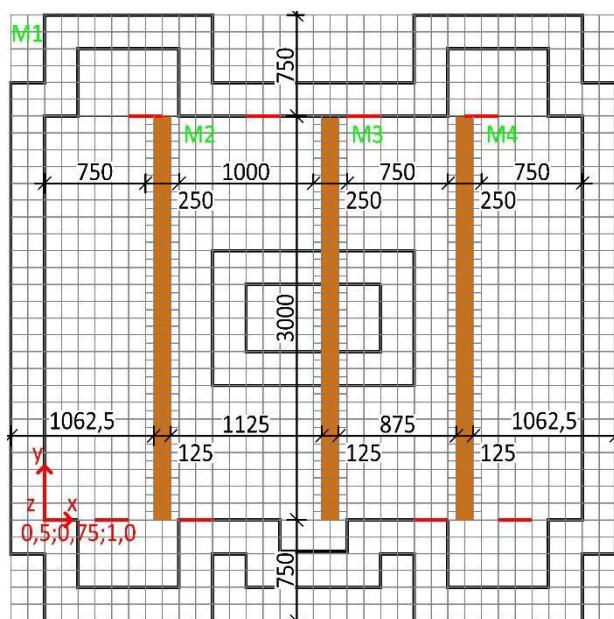


Obr. 26 Zobrazení sítě v řezu

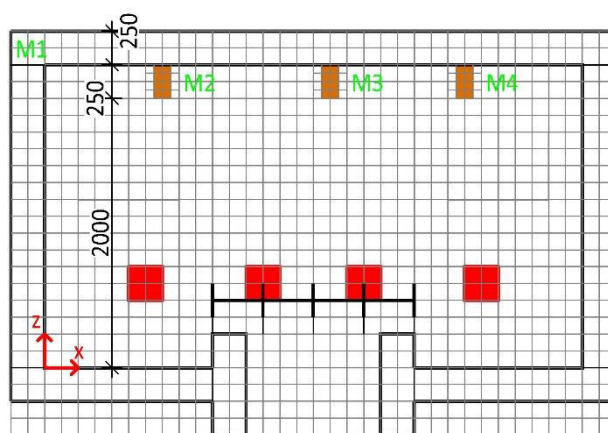
Lokální síť slouží k namodelování ocelového nosníku IPE 400, který je fyzicky modelován podle velikosti kontrolních objemů, ale s nastavenými tloušťkami konstrukce pro pásnici 13,5 mm a stojinu 8,6 mm. Jemná síť je nastavena s přesahy přes ocelový nosník, aby došlo k detailnějšímu výpočtu kolem zkušebního vzorku. Výška modelovaného nosníku odpovídá kontrolním objemům a je 437,5 mm. Šířka pásnic je namodelovaná na 312,5 mm, aby bylo možné umístit stojinu přesně doprostřed pásnic. Z půdorysu je patrné, že nosník není uložen od stěny ke stěně, ale je vynechána mezera 62,5 mm na každé straně, podobně jako tomu bylo během experimentu. Nosník je umístěn těsně pod stropem, aby nedocházelo k proudění plynu nad ním.

4.1.3 Model pece s dřevěnými nosníky

Numerický model pece s dřevěnými nosníky má stejnou základní výpočetní síť „M1“ a geometrii jako předchozí modely. Jsou zde nastaveny tři lokálně zhuštěné sítě „M2 – M3“ pro tři dřevěné nosníky. Velikost jedné jemné sítě je 0,25 m x 3,0 m x 0,25 m s kontrolními objemy 62,5 mm x 62,5 mm x 62,5 mm velkými (obr. 27 a 28). Počet kontrolních objemů v jedné síti je 748. Celkový nárůst činí 2 304 kontrolních objemů.



Obr. 27 Zobrazení sítě v půdorysu



Obr. 28 Zobrazení sítě v řezu

Velikost dřevěných nosníků odpovídá velikosti kontrolních objemů a mají průřez 125 mm x 250 mm podle kontrolních objemů. Lokálně zhuštěné sítě jsou opět s přesahem přes dřevěné nosníky, aby došlo k detailnějšímu výpočtu proudění horkých plynů kolem nosníku. Půdorysně jsou umístěny tak, aby se co nejvíce přiblížily pozici podle reálné zkoušky a byly správně umístěny s ohledem na výpočetní síť. Uložení nosníků je tentokrát od stěny ke stěně a opět s výškovou pozicí těsně pod stropem, aby nedocházelo k proudění mezi nimi a stropem.

4.2 Materiály

Jednotlivé konstrukce použité v modelu pece jsou namodelovány z materiálů, které jsou použity ve skutečné peci zmíněné v kapitole 3. Tato kapitola popisuje jednotlivé konstrukce, jejich skladbu, použité materiály a jejich tepelné vlastnosti. Software FDS umožňuje modelovat velikosti konstrukcí podle zvolené jemnosti výpočetní sítě a velikosti kontrolních objemů. Jelikož je vybrána síť s velikostní kontrolního objemu 100^3 mm, je možné fyzicky modelovat konstrukce pouze v tomto modulu. Nicméně pro výpočet přestupu tepla a množství odebrané energie do konstrukce jsou zadány skutečné hodnoty tloušťek konstrukcí. Jednotlivé konstrukce jsou popsány z vnitřní strany k vnější. V tabulce 4 jsou popsány tepelně technické vlastnosti použitých materiálů při teplotě 20 °C.

Podlaha

Vysocehlinité tvárnice TRIAL – AT60A	116	mm
Tepelněizolační tvárnice TRIZOL HB11	67	mm
Vápenno-silikátové desky KERASIL 1000	75	mm

Límeč kolem větracího otvoru

Tepelněizolační žarobeton IZOBET 1400/0,9	100	mm
---	-----	----

Stěny

Modulové bloky KERABLOK HPS 1260	205	mm
Rohože FIBRATEC HPS 1260	25	mm
Ocelová konstrukce pece	4	mm

Strop

Modulové bloky KERABLOK HPS 1260	205	mm
Rohože FIBRATEC HPS 1260	25	mm
Ocelová konstrukce tepelně izolačních panelů	4	mm

Ocelová ochranná konstrukce

Ocel	30	mm
------	----	----

Tab. 4 Tepelně technické vlastnosti použitých materiálů

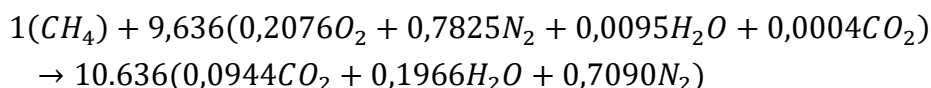
Materiál	ρ [kg/m ³]	c [kJ/(kg·K)]	λ [W/(m·K)]	Zdroj
Vysocehlinité cihly AT60A	2530	1,01*	1,2*	Refrasil s.r.o.
Tepelně izolační cihly HB11	1100	0,93*	0,41*	Refrasil s.r.o.
Kerasil 1000	230	0,13	0,71*	Keratech s.r.o.
Kerablok HPS 1260	192	1,13	0,04*	Keratech s.r.o.
Fibratec HPS 1260	129,7	0,72	0,05*	Keratech s.r.o.
Izolační žarobeton	900	1,00	0,20*	Prům. ker. s.r.o.
Ocel	7850	0,44*	53,3*	ČSN EN 1993-1-2
Dřevo	456,2	1,53*	0,12*	ČSN EN 1995-1-2
Inconel 600	8470	0,444	/	Special metals corp.
Poznámka: Hodnoty označené symbolem * mají zadané hodnoty závislé na teplotě. Grafy viz příloha 3. Tepelné vlastnosti jsou převzaty od výrobců nebo jejich materiálových listů viz příloha 4.				

Důležitým zlepšením modelu virtuální pece je nastavení materiálových tepelných vlastností závislých na měnící se teplotě (Příloha 3). Na katedře materiálového inženýrství na Fakultě stavební ČVUT v Praze proběhlo měření měrné tepelné kapacity u materiálu výrobku KERABLOK HPS 1260. Vlastnosti u ostatních výrobků jsou převzaty přímo od výrobců nebo jejich technických a materiálových listů (Příloha 4). U dřeva se hustota měřila v rámci experimentální studie a použitá hodnota 456,2 kg/m³ je průměr ze všech třech dřevěných nosníků.

4.3 Palivo pro hořáky

Palivem pro hořáky v reálné peci je směs zemního plynu a vzduchu. Numerický model má nastaveno stejné palivo jako je tomu ve skutečné peci. V programu FDS je možné definovat hořlavou plynnou látku příkazem „REAC“, která vstupuje do reakce hoření [11].

Palivo pro reakci hoření v FDS je zvolen metan CH₄, který je hlavní složkou zemního plynu. Do reakce hoření vstupuje vzduch definovaný procentuálním obsahem kyslíku O₂, dusíku N₂, vlhkosti H₂O a oxidu uhličitého CO₂. Aby chemická rovnice byla úplná, jsou definovány produkty hoření s jejich procentuálním zastoupením [10]. Numerický model obsahuje následnou chemickou reakci hoření [10]:



4.4 Nastavení výkonu hořáků

Hodnota výkonu hořáků v numerickém modelu je určena podle dat získaných během experimentálních zkoušek. V reálné peci je výkon hořáků řízen podle teploty naměřené deskovými snímači teploty 100 mm pod stropem, tak aby teplota odpovídala normové teplotní křivce. Přičemž každý hořák je regulován samostatně nebo průměrem naměřených hodnot z DST. Během

experimentů bylo možné pozorovat, že některé hořáky mají slabší výkon, jiné jsou zapnuty na plno a jiné zase vypnuty, vše samozřejmě proměnné v průběhu experimentu. Z experimentální studie bylo zjištěno, že maximální výkon jednoho hořáku je 266,0 kW. U numerických modelů je stanovena maximální hodnota výkonu hořáků z průměru všech osmi hořáku a nepatrně se liší od maximální hodnoty. Tímto způsobem dochází k dalšímu přiblížení se ke skutečnosti s numerickým modelem ke konkrétnímu experimentu. U modelu s dřevěnými nosníky není uvažován maximální průměrný výkon a je použita hodnota 266,0 kW

Numerický model má pevně definované hodnoty výkonu všech hořáků. Výkony hořáků jsou stanoveny podle podílu z průměrného výkonu hořáků v daném čase ku maximálnímu průměrnému výkonu hořáků z experimentu a je pro všechny hořáky stejný. Výkon jednoho hořáku je tedy určen podle:

$$Q_{model}(t) = F(t) \cdot HRRPUA$$

$$F(t) = \frac{Q_{\phi}(t)}{Q_{\phi,max}}$$

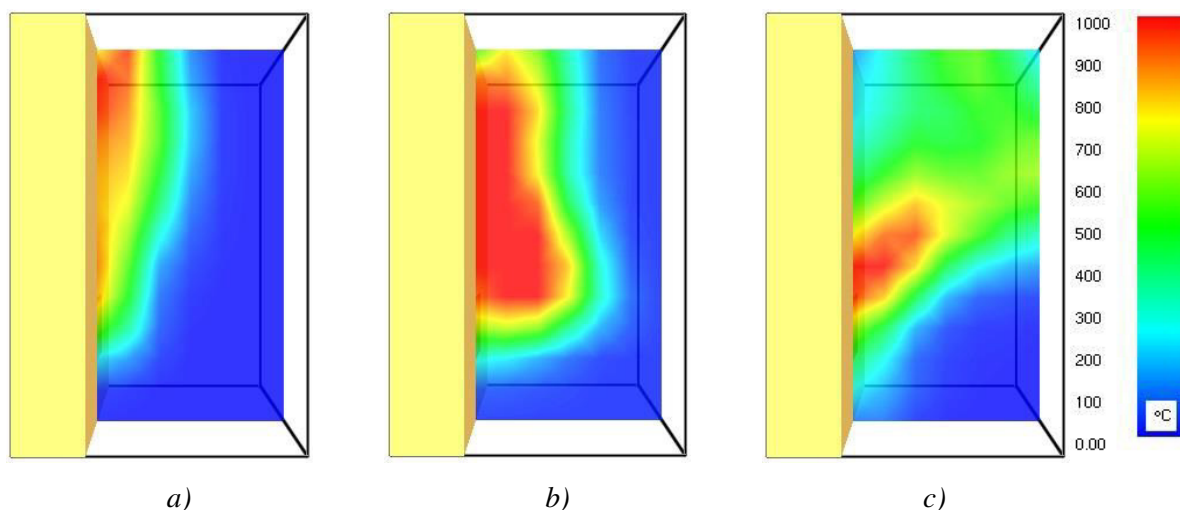
$$HRRPUA = \frac{Q_{\phi,max}}{S}$$

kde	$Q_{model}(t)$	výkon jednoho hořáku v daném čase [kW/m ²]
	$F(t)$	poměr průměrných výkonů hořáků v čase [-]
	$Q_{\phi}(t)$	průměr výkonu hořáku v daném čase z experimentu [kW]
	$Q_{\phi,max}$	maximální průměrný výkon z experimentu [kW]
	S	plocha hořáku v modelu [m ²]
	$HRRPUA$	maximální výkon jednoho hořáku v modelu [kW/m ²]

Výkon jednoho hořáku je tedy možné popsat křivkou v čase. Jednotlivé křivky výkonů hořáků jsou popsány v následujících kapitolách u konkrétních modelů. Důležitým krokem při zadávání maximálního výkonu hořáků do zdrojového kódu je přepočíst maximální výkon z kW na kW/m². Přepočet se provádí podle velikosti plochy, ze které je energie uvolňována. Velikost modelované plochy je 200 mm x 200 mm. V původním modelu byla plocha 250 mm x 250 mm a ukázalo se, že modelování hořáku přes tuto velkou plochu je efektivní (přesné výsledky teploty plynu s porovnáním s experimentem), a proto byla plocha s ohledem na výpočetní síť přibližně zachována.

Pro správné fungování hořáků je mimo jejich výkonu nutné definovat hmotnostní tok uvolňovaného paliva. Hmotnostní tok je definován maximální hodnotou a křivkou určující aktuální hodnotu hmotnostního toku v daném čase (stejně jako je tomu u nastavení výkonu hořáků). Maximální hodnota je stanovena na 2,0 kg/(m²·s). Křivka, která určuje množství hmotnostního toku v daném čase je totožná s křivkou výkonů hořáků $F(t)$. Takto definované množství hmotnostního toku paliva je efektivní a přináší dostatečně přesné výsledky. Tímto zjištěním je patrná přímá závislost na výkonu hořáků a množství paliva v numerickém modelu.

Pro ukázkou vlivu velikosti hmotnostního toku na šíření do prostoru jsou zobrazeny na obrázku 21 tři hodnoty. Na každém obrázku je jeden hořák (s konstantním výkonem) umístěn na levé straně modelu, ve třetině výšky. Teplotní pole ukazuje dosah účinku hořáku. Obrázek 29a) má nastavenou velikost hmotnostního toku na $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, obrázek 29b) s $2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ a obrázek 29c) s $4,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Ve virtuální peci je maximální hodnota nastavena na $2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ a je upravována křivkou. Podrobné zobrazení hodnot hmotnostního toku v průběhu zkoušek je zobrazeno u jednotlivých numerických modelů v kapitolách níže.



Obr. 29 Teplotní pole jednoho hořáku s vlivem hmotnostního toku
a) $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ b) $2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ c) $4,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

4.4.1 Výkon pro prázdnou pec

V numerickém modelu prázdné pece proběhly dvě simulace. První simulace zahrnuje ohřev pece podle normové teplotní křivky a druhá simulace je s ohřevem pece s nastaveným konstantním výkonem hořáků.

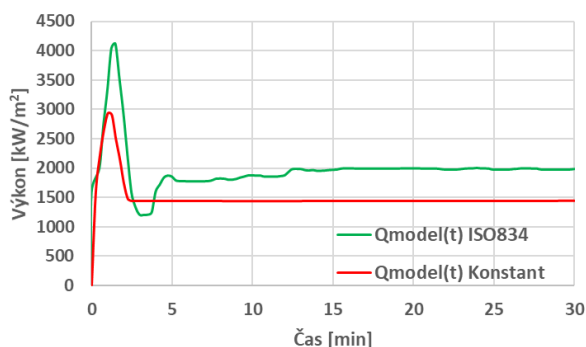
Maximální průměrný výkon jednoho hořáku zjištěný z experimentální studie pro ohřev pece podle normové teplotní křivky činí $257,65 \text{ kW}$. Maximální průměrný výkon jednoho hořáku zjištěný z experimentální studie pro ohřev pece s konstantním výkonem hořáků je $183,4 \text{ kW}$. Výpočet výkonu jednoho hořáku do numerického modelu pro obě simulace (stanovení maximální hodnoty výkonu hořáku v numerickém modelu) je proveden následovně:

$$HRRPUA_{ISO834} = \frac{Q_{\phi, \max}}{S} = \frac{257,65}{0,25 \cdot 0,25} = 4122,4 \text{ kW}/\text{m}^2$$

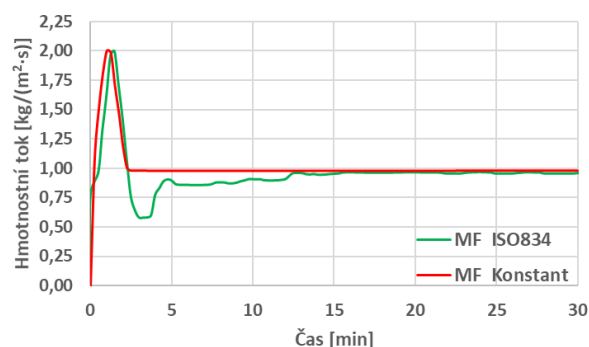
$$HRRPUA_{konstant} = \frac{Q_{\phi, \max}}{S} = \frac{183,4}{0,25 \cdot 0,25} = 2934,4 \text{ kW}/\text{m}^2$$

Tyto hodnoty jsou přímým vstupem do zdrojového kódu numerického modelu a jsou v čase upravovány křivkou poměru průměrných výkonů $F(t)$. Výsledný zadaný výkon jednoho hořáku je popsán na grafu 19. Stejnou křivkou je upravena v čase hodnota hmotnostního toku MF (z angl.

Mass flux). Průběh hmotnostního toku v čase je patrný z grafu 20. Z obou grafů je patrné, že zhruba po uplynutí 5 minut dojde k zredukování výkonu a hmotnostního toku přibližně na polovinu.



Graf 19 Průměrný výkon hořáků



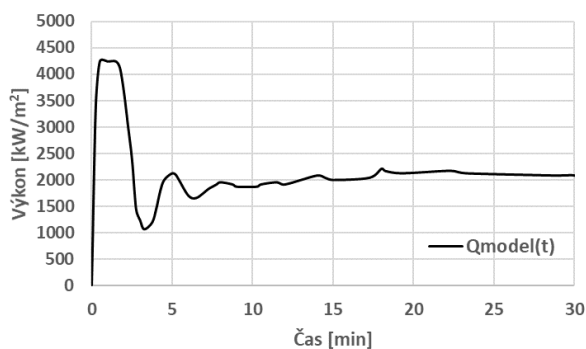
Graf 20 Hmotnostní tok

4.4.2 Výkon pro pec s ocelovým nosníkem

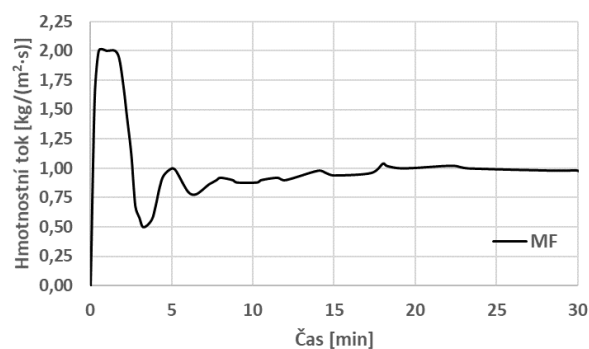
Maximální průměrný výkon jednoho hořáku zjištěný z experimentální studie pro ohřev pece s ocelovým nosníkem podle normové teplotní křivky činí 265,57 kW. Výpočet výkonu jednoho hořáku do numerického modelu (stanovení maximální hodnoty výkonu hořáku v numerickém modelu) je proveden následovně:

$$HRRPUA_{ISO834} = \frac{Q_{\phi, \max}}{S} = \frac{265,57}{0,25 \cdot 0,25} = 4249,12 \text{ kW/m}^2$$

Výsledný zadaný výkon do numerického modelu jednoho hořáku je popsán na grafu 21. Průběh hmotnostního toku v čase pro tuto simulaci je patrný z grafu 22.



Graf 21 Průměrný výkon hořáků



Graf 22 Hmotnostní tok

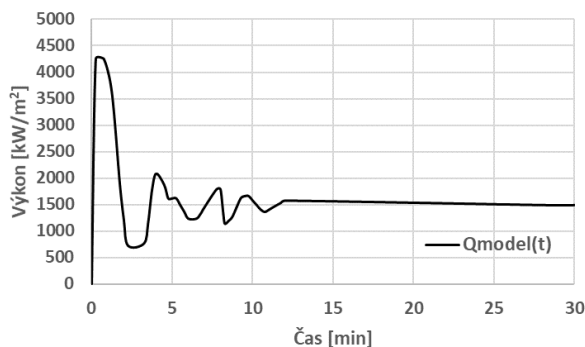
4.4.3 Výkon pro pec s dřevěnými nosníky

U tohoto experimentu s dřevěnými nosníky nejsou známy přesné hodnoty výkonu hořáků, ale pouze jejich procentuální využití. Na základě toho je hodnota maximálního výkonu nastavena na

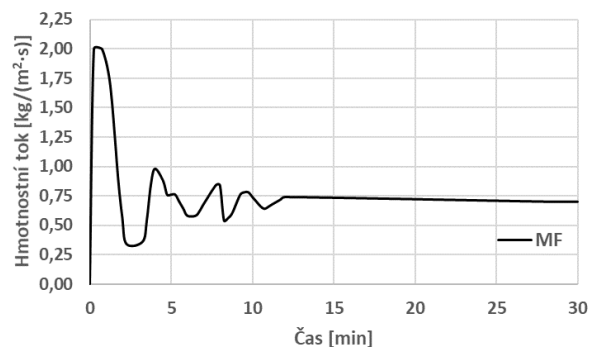
základní hodnotu 266 kW. Výpočet výkonu jednoho hořáku do numerického modelu (stanovení maximální hodnoty výkonu hořáku v numerickém modelu) byl proveden takto:

$$HRRPUA_{ISO834} = \frac{Q_{\phi, \max}}{S} = \frac{266,0}{0,25 \cdot 0,25} = 4256 \text{ kW/m}^2$$

Výsledný zadaný výkon do numerického modelu jednoho hořáku je popsán na grafu 23. Průběh hmotnostního toku v čase pro tuto simulaci je patrný z grafu 24.



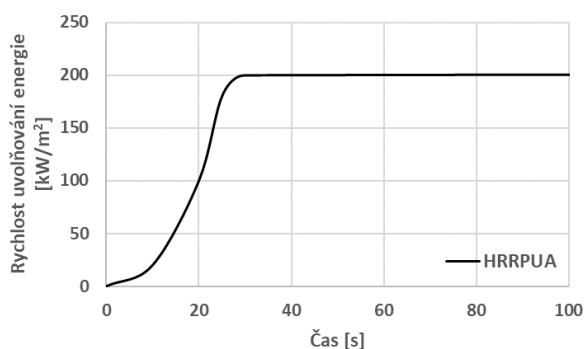
Graf 23 Průměrný výkon hořáků



Graf 24 Hmotnostní tok

Samotné nastavení výkonu hořáků v případě toho modelu nestačí. Jelikož je součástí této zkoušky hořlavý materiál a svým hořením přispívá k nárůstu teploty plynu v peci, je nutné tento jev simulovat. Modelované dřevěné nosníky mají nastavené parametry tak, aby v průběhu simulace započalo jejich hoření. Pro nastavení správných parametrů dřevěných nosníků byly využity data z [15], kde bylo úspěšně simulováno hoření dřevěných hranic v programu FDS.

Výhřevnost dřeva je stanovena na hodnotu 18 000 kJ/kg s teplotou zapálení 300 °C. Maximální rychlost uvolňování energie je $HRRPUA = 200 \text{ kW/m}^2$ a je řízena podle křivky na grafu 25. Po uplynutí 30 s je uvolňování energie 200 kW/m² až do doby vyhoření paliva.



Graf 25 Rychlost uvolňování energie

Program FDS dokáže v jedné simulaci počítat pouze s jednou látkou, která vstupuje ve výpočtech do reakce hoření [10, 11]. V případě virtuální pece je nastavena látka metan, která odpovídá reakci hoření paliva hořáků. To znamená, že dřevo se bude rozkládat na produkty podle definované reakce v kapitole 4.3, což není úplně správné řešení, avšak se současnou verzí FDS jediné možné.

4.5 Ventilace

Velmi důležitou částí v numerickém modelu je nastavení ventilace pro udržení rozdílu přetlaku vzduchu 20 Pa v peci oproti okolnímu tlaku vzduchu. Pro sledování hodnoty přetlaku ve virtuální peci je namodelované čidlo ve výšce 1,4 m nad podlahou a 0,1 m od zadní stěny. Virtuální pec má vymodelovaný otvor v podlaze o velikosti 0,6 m x 0,8 m odpovídající velikosti kontrolních objemů.

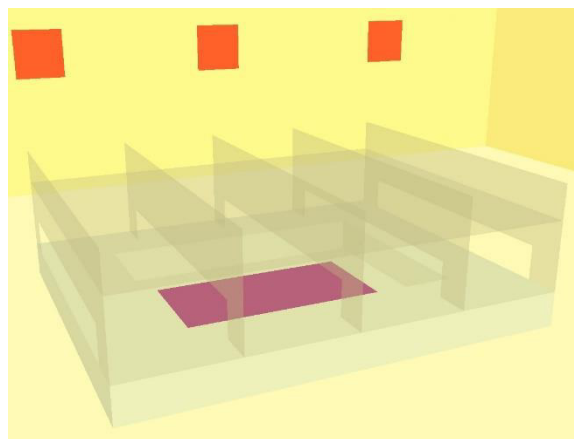
V případě ponechaného otevřeného otvoru v podlaze v průběhu simulace virtuální pece dochází k samovolnému úniku přetlaku z pece ven. Nicméně toto řešení se po prozkoumání vypočtených hodnot přetlaku ukázalo jako nedostatečné. Naměřený přetlak byl svou hodnotou nad limitní hranicí 25 Pa do páté minuty a 23 Pa ve zbylém průběhu simulace a model pece tak nesplňoval normové hodnoty.

Numerický model byl následně doplněn o prvek simulující odtahový ventilátor, který má za úkol přebytečný přetlak odebrat (viz obr. 30). Princip namodelovaného ventilátoru spočívá v tom, že pokud je na měřicím čidle naměřena hodnota přetlaku nad limitní hodnotu, ventilátor začne odtahovat plyn. Následně ventilátor odtahuje do té doby, než překročí spodní limitní hodnotu. Poté je ventilátor vypnutý a dochází k samovolnému odtahu plynu ven z pece. V případě, pokud opět dojde k překročení horního limitu, ventilátor sepne a je znovu aktivní. Celý tento proces je nastaven tak, aby mohl probíhat v průběhu celé modelované zkoušky. Pro model virtuální pece se jako efektivní hodnoty spodního a horního limitu ukázali hodnoty 18 Pa a 20 Pa. Vlivem setrvačnosti účinnosti modelovaného zařízení jsou limity v modelu jiné než normové hodnoty. Nicméně díky těmto mezním hodnotám pro fungování modelované ventilace dojde k nejefektivnějšímu získání naměřených hodnot přetlaku mezi limitními hodnotami danými normou. Druhou důležitou hodnotou, která se ukázala jako nejefektivnější, je nastavení množství odváděného plynu z pece ven. Tato hodnota je dána množstvím odváděného vzduchu za jednotku času a je stanovena na 4,0 m³/s po celou dobu trvání simulace experimentů.

Pro stanovení co nejpřesnějších okrajových podmínek pro proudění plynu v modelu pece je do modelu přidána ocelová konstrukce nad ventilačním otvorem (viz obr. 30 a 31). Tato konstrukce v reálné peci jednak chrání ventilační otvor před padajícími částmi zkušebních vzorků, ale také ovlivňuje směr proudění odtahovaného plynu. Díky této ocelové konstrukci je odtahovaný plyn odebírán z boku ochranné konstrukce, a ne přímo z místa nad otvorem, tedy prostředku pece. Je velmi důležité, aby byl tento prvek zahrnut ve virtuální peci.



Obr. 30 Ventilační otvor s ochrannou konstrukcí



Obr. 31 Ventilační otvor v numerickém modelu

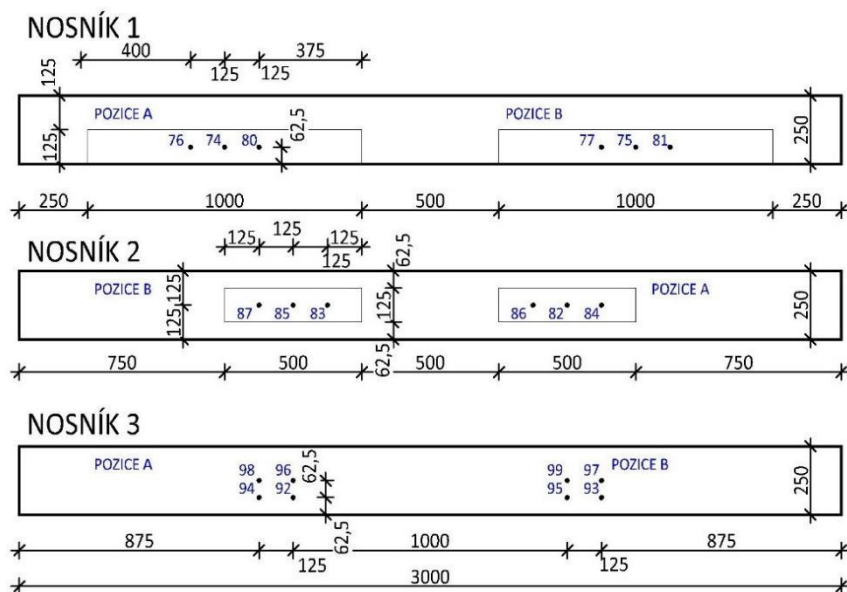
4.6 Teplota

Měření teploty plynu v numerickém modelu je možné několika způsoby. Může se měřit teplota v prostoru (teplota plynu), na konstrukci s vlivem přestupu tepla a uvnitř konstrukce. Snahou definovanými příkazy pro měření teploty plynu v numerickém modelu je simulovat měření v reálné peci pomocí plášťových a deskových snímačů teploty. Pozice snímačů ve virtuální peci jsou umístěny podle experimentální studie a s ohledem na výpočetní síť.

Měření teploty plynu pomocí plášťových termočlánků je simulováno příkazem „THERMOCOUPLE“. Tento příkaz má nastavené vlastnosti materiálu Inconel 600, jako je hustota 8470 kg/m^3 a měrná tepelná kapacita $0,444 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Modelovaný plášťový termočlánek má nastavený stejný průměr 2 mm jako je to v případě prováděných experimentů. Schémata s pozicemi snímačů jsou v příloze 2.

Deskové snímače teploty jsou simulovány pomocí příkazu „ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS“, který nejlépe vystihuje měření teploty v prostoru pece těmito snímači teploty. V dřívějších verzích FDS nebylo možné takto přímo definovat deskový termočlánek a muselo dojít k jeho namodelování. U takto modelovaných snímačů teploty je potřeba zadat emisivitu povrchu simulovaného snímače teploty, která je 0,9 a koeficient přestupu tepla $10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ [10].

Měření teploty dřevěných nosníků a plechů je v modelu nastaveno pomocí příkazu „INSIDE WALL TEMPERATURE“, který slouží pro měření teploty uvnitř konstrukcí. Na obrázku 32 jsou znázorněny dřevěné nosníky s velikostí upravenou podle geometrie zvolené sítě a s pozicemi jednotlivých snímačů teploty v modelu. Jelikož během experimentu byly některé snímače umístěny u okraje nosníků, nejsou s ohledem na jemnost výpočetní sítě modelovány. Zbývající snímače jsou simulovány na pozicích podle experimentu, ale s ohledem na geometrii výpočetní sítě. Hloubky jednotlivých snímačů jsou nastaveny přesně podle experimentální studie.



Obr. 32 Dřevěné nosníky s pozicemi snímačů teploty v modelu

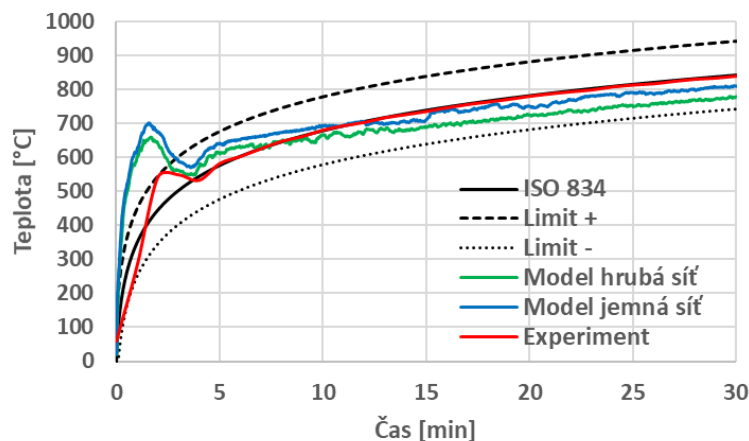
4.7 Analýza citlivosti výpočetní sítě

Velikost výpočetní sítě a kontrolních objemů je jeden z nejdůležitějších parametrů při sestavování modelu. Při simulaci proudění tekutin vychází software FDS ze základních zákonů zachování hmoty, hybnosti energie, a to na úrovni zvolených kontrolních objemů. Výpočty jsou v programu FDS založeny na aproximacích druhého řádu časových a prostorových derivací Navier – Stokesových rovnic. Chyba, která může vzniknout jako důsledek parciálních derivací, je úměrná druhé mocnině časového kroku nebo velikosti kontrolního objemu. Zmenšením kontrolního objemu na polovinu je teoreticky možné dosáhnout snížení chyby na čtvrtinu. Navzdory tomu potřebný výpočetní čas naroste přibližně šestnáctkrát. Při vytváření modelu a volbě velikosti a jemnosti výpočetní sítě je velmi důležité rozhodnout, jaké výsledky jsou natolik přesné, aby samotný výpočet modelu nebyl příliš náročný na čas potřebný pro jeho výpočet [11].

Z těchto důvodů byla na počátku zvolena hrubá síť, aby bylo možné v rámci krátkého časového úseku ověřit funkčnost virtuální pece. Následným krokem po prvotní validaci modelu s hrubou sítí bylo vyzkoušet nastavení jemnější sítě. Analýza citlivosti výpočetní sítě na vliv naměřených teplot ve virtuální peci je provedena na modelu prázdné pece. Prvotní model prázdné pece je popsán v kapitole 4.1 a obsahuje 3 888 kontrolních objemů. Model s jemnou sítí je složen z kontrolních objemů o velikosti 125 mm x 125 mm x 125 mm a obsahuje 31 104 kontrolních objemů.

Porovnání modelů je provedeno na naměřených teplotách z deskových termočlánků umístěných pod stropem pece. Na grafu 26 jsou zobrazeny průměrné teploty naměřené deskovými termočlánky. Z grafu 26 vyplývá, že modely s hrubou a jemnou sítí se příliš od sebe neliší. V počáteční fázi, kdy dochází k největšímu ohřevu pece jsou největší rozdíly naměřených hodnot z obou modelů. Model s jemnější sítí má v počáteční fázi výrazně větší odchylku od experimentu, než je tomu u modelu s hrubší sítí. Za předpokladu, že zjemněním sítě dojde k zpřesnění modelu,

můžeme usoudit, že nastavení hořáků v počáteční fázi ohřevu podle experimentu není úplně nejlepším krokem. Nicméně po uplynutí 10 minut simulace jsou výsledky přesnější u modelu s jemnější sítí a dochází tak k většímu přiblížení ke skutečnosti. Rozdíly teplot z obou modelů jsou však zanedbatelné a další zjemňování výpočetní sítě by už nemělo takový význam a způsobovalo by zbytečné navýšení času potřebného pro výpočet modelu.



Graf 26 Analýza jemnosti výpočetní sítě

4.8 Popis zdrojového kódu

Modelování v programu FDS je umožněno prostřednictvím zdrojového kódu, do kterého jsou vepsány jednotlivé příkazy. Tato kapitola stručně popisuje obsah a rozdělení jednotlivých částí zdrojového kódu pro virtuální pec. Zdrojový kód virtuální pece je přiložen v příloze 5.

Hlavička zdrojového kódu obsahuje název simulace a parametry pro ukládání měřených dat. Konkrétně je nastaveno, aby se změřené hodnoty ukládaly každou 1 s. Důležitým vstupem do modelu v této části je nastavení doby simulace. Každý model virtuální pece má nastavenou délku simulace na 1 800 s.

První část zdrojového kódu obsahuje definice použitých materiálů pro konstrukce a samotné nastavení konstrukcí již dříve popsanych v kapitole 4.2. U materiálů jsou definované tepelné technické vlastnosti. Definování konstrukcí spočívá v nastavením použitého materiálu, reálné tloušťky konstrukce a barevnosti pro zobrazení v SMW. Následující část obsahuje nastavení výpočetních sítí s počtem kontrolních objemů a příkazy pro modelování konstrukcí. Jsou zde nastaveny stěny, strop, podlaha a další konstrukce pece rozepsané a znázorněné v kapitole 4.1.

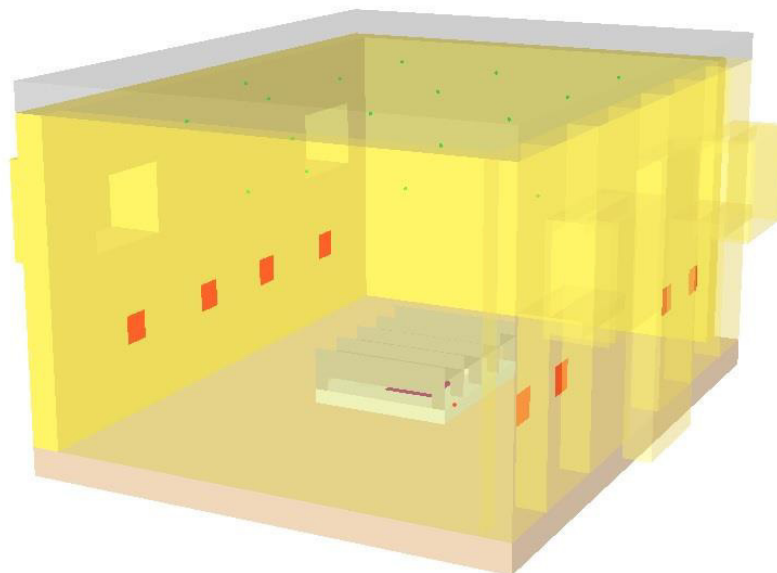
Třetí část obsahuje nastavení reakce hoření, hořáky a křivku uvolňování energie. Jsou zde definované hodnoty uvedené v kapitole 4.3 a kapitole 4.4. Čtvrtá část zahrnuje nastavení nuceného odtahu plynu z pece. Jsou zde nastaveny parametry z kapitoly 4.5.

Poslední část zahrnuje nastavení jednotlivých měřičů a jejich vlastností. Kromě zmíněných měřičů v kapitole 4.6 jsou zde nastaveny i barevné ISO plochy pro vizualizaci teploty a zobrazení povrchové teploty přes barevná teplotní pole přímo na povrchu konstrukcí pece.

5 Validace numerických modelů

5.1 Model prázdné pece

První vytvořený numerický model je pro zkoušku bez zkušební vzorku. Vytvořením tohoto modelu je možné ověřit správnost předpokladu nastavení výkonu hořáků v modelované peci a nastavení řízení přetlaku a jeho regulování pomocí ventilátoru v otvoru podlahy. Na obr. 33 je vidět numerický model zobrazený softwarem Smokeview. Pro správné ověření funkčnosti modelu prázdné pece je potřeba model validovat. Validace modelu je provedena na experimentech ve zkušebně Pavus ve Veselí nad Lužnicí (kapitola 3). Sledovanými parametry jsou teplota a tlak v peci. Průběh těchto veličin musí stejně jako u reálných zkoušek i u numerického modelu odpovídat podmínkám daných normou ČSN EN 1363-1.

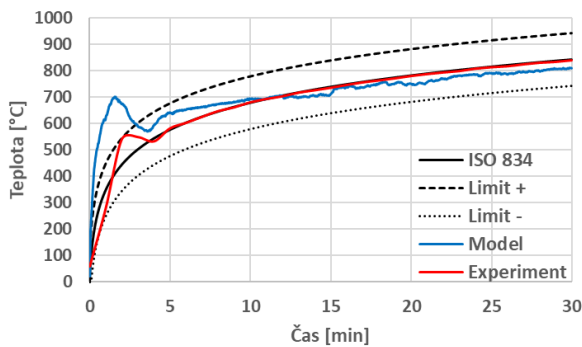


Obr. 33 Model prázdné pece

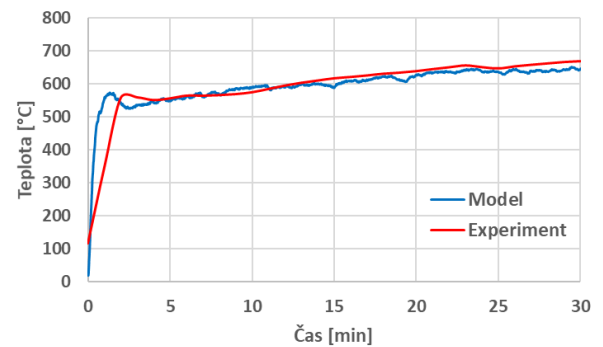
Níže uvedené grafy porovnávají naměřené teploty plynu během experimentů s teplotami plynu z modelu prázdné pece (graf 27 a 28). Na grafu 27 je porovnání výsledků z prázdné pece s ohřevem podle normové teplotní křivky (ISO 834) a na grafu 28 je záznam teplot z prázdné pece s ohřevem podle konstantního výkonu hořáků. Zobrazené teploty jsou průměrné hodnoty naměřené podstropními snímači teploty.

Z obou grafů je patrné, že teploty v numerickém modelu jsou v počáteční fázi vyšší. V numerickém modelu se pec ohřívá rychleji, než je tomu ve skutečnosti. U modelu s ohřevem podle normové teplotní křivky je teplota v prvních dvou minutách vyšší o téměř 150 °C oproti experimentu. Tento jev může být mimo jiné způsoben netěsností skutečné pece (stropní panely a jejich spoje), kde může určité množství tepla uniknout z pece ven. Modelovaná pec má zcela napojené konstrukce a nedochází k žádnému úniku tepla. Nicméně během průběhu simulace se teploty blíží k hodnotám z experimentu a rozdíly jsou maximálně 30°C.

V případě zkoušky s konstantním výkonem hořáků nejsou rozdíly naměřených hodnot tak vysoké. Maximální rozdíl teplot, v pokročilejší době simulace je 21 °C. V počáteční fázi ale pořád dochází k rychlejšímu ohřevu u numerického modelu. Rozdíl není už tak patrný, a to kvůli menšímu výkonu hořáků. Úpravou křivky výkonu hořáků v počáteční fázi ohřevu by mohlo dojít k přiblížení se naměřeným teplotám z experimentu. Na základě porovnání teplot z deskových snímačů teploty je patrné, že nastavení hořáků podle maximálního výkonu je správný krok z hlediska celkového průběhu simulace.



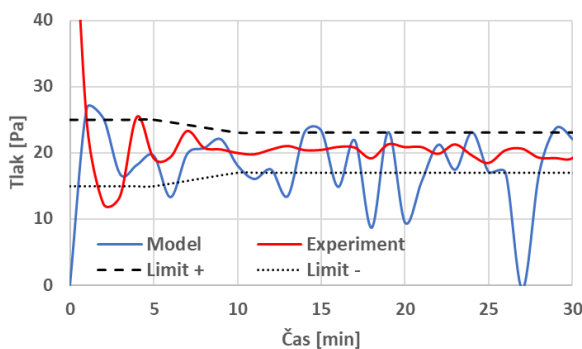
Graf 27 Teplota plynu – zkouška podle ISO 834



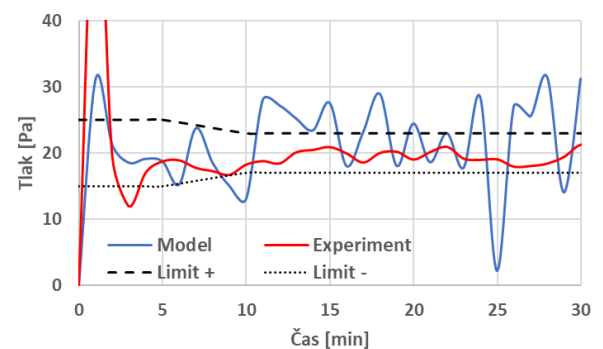
Graf 28 Teplota plynu – zkouška podle konstant.

Dalším krokem pro určení správnosti numerického modelu je porovnání naměřených hodnot rozdílů tlaků z experimentu s vypočtenými hodnotami z modelu. Grafy 29 a 30 porovnávají tyto údaje z obou prováděných zkoušek v prázdné peci. V případě numerického modelu dochází k regulaci tlaku pomocí ventilátoru v podlaze. Nicméně často dochází k překročení limitů tlaku stanovených normou.

Ventilátor umístěný v podlaze, který v případě překročení horního limitu tlaku začne odtahovat, ale vlivem setrvačnosti se tomu tak v místě měření tlaku neděje okamžitě, dochází k nárůstu tlaku nad limit. Tak je tomu i v případě vypnutí ventilátoru při dosažení spodního limitu, kdy vlivem setrvačnosti stále dochází k měření nižších hodnot tlaku. Toto nastavení řízení tlaku v peci je správnou cestou pro udržení hodnoty tlaku v mezích stanovených normou, ale vyžaduje lepší zkoumání a nastavení, aby nedocházelo k překračování limitních hodnot.



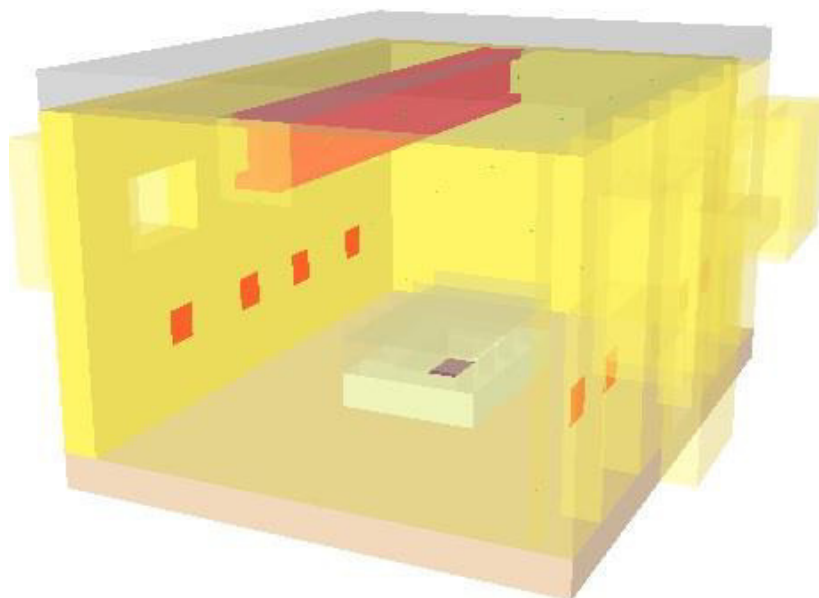
Graf 29 Tlak v peci – zkouška podle ISO 834



Graf 30 Tlak v peci – zkouška podle konstant.

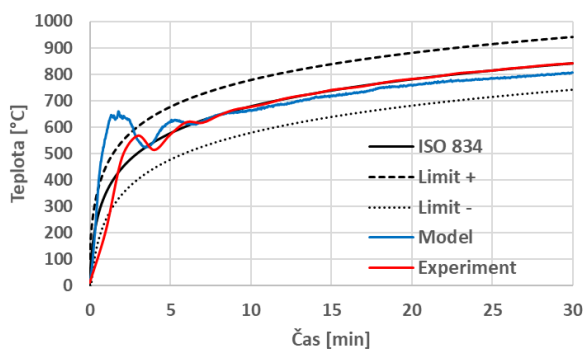
5.2 Model pece s ocelovým nosníkem

Po validaci modelu prázdné pece je potřeba zjistit, zda virtuální pec dokáže simulovat zkoušku požární odolnosti i se zkušebním vzorkem. Model s ocelovým nosníkem je validován na experimentu zmíněném v kapitole 3.3. Na obr. 34 je zobrazená pec s namodelovaným ocelovým nosníkem IPE 400.

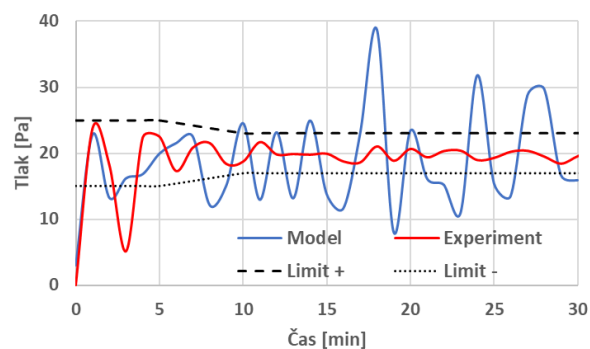


Obr. 34 Model pece s ocelovým nosníkem

Validace je provedena na porovnávání průměrné teploty naměřené podstropními deskovými snímači teploty. Graf 31 zobrazuje průběhy těchto teplot z numerického modelu a z experimentu. Je patrné, že i v tomto případě je v počáteční fázi simulace teplota výrazně vyšší než během experimentu. Po uplynutí 5. minuty dochází ke srovnání obou křivek a model má stejný průběh teploty jako v experimentu. Od 8. minuty simulace dochází k odchýlení sledované křivky. V čase 30 minut je teplota plynu o 29 °C nižší. Toto bylo možné pozorovat i u modelu prázdné pece, kdy v počátku je model rychleji zahříván a následně ke konci simulace má nepatrně nižší teploty oproti experimentu.



Graf 31 Teplota plynu

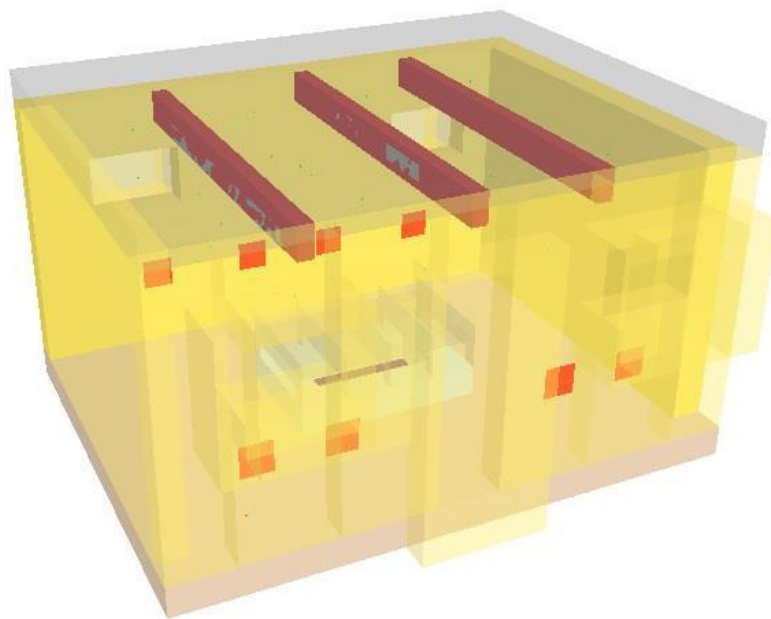


Graf 32 Průběh tlaku

Na grafu 32 jsou zobrazeny průběhy tlaku v peci naměřené během experimentu a v modelu. V případě prázdné pece docházelo k překračování limitů přetlaku v peci a je tomu tak i v tomto modelu. Z grafu 32 je patrné, že dochází k častější aktivaci, než tomu bylo u předchozího modelu. Ocelový nosník změnil podmínky pro proudění horkých plynů oproti modelu bez zkušebního vzorku a způsobuje tak větší přetlak v peci, který musí být častěji nuceně regulován.

5.3 Model pece s dřevěnými nosníky

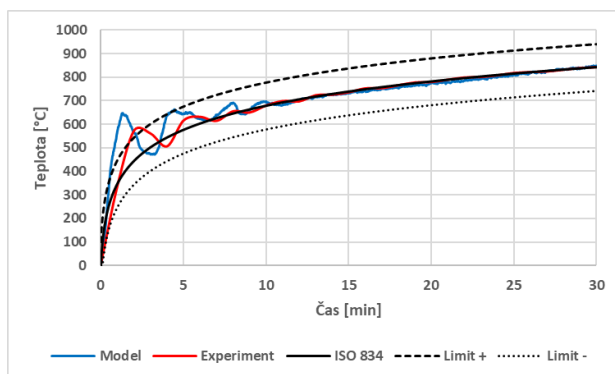
Třetím validovaným modelem je virtuální pec s třemi dřevěnými nosníky. U tohoto modelu (obr. 35) je měřena teplota plynu na stejných pozicích jako tomu je u předchozích modelů. Dále jsou zde i měřeny teploty uvnitř dřevěných nosníků.



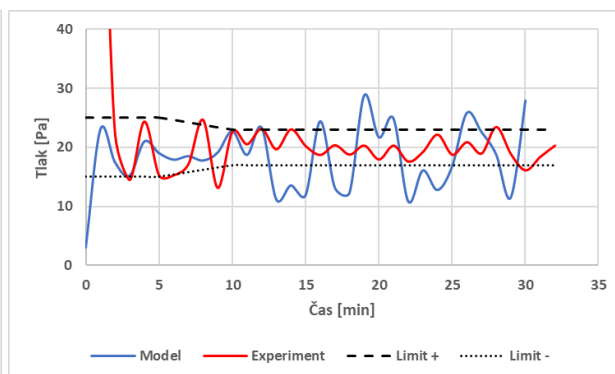
Obr. 35 Model pece s dřevěnými nosníky

Validace je opět provedena na průměrné teplotě z deskových snímačů umístěných pod stropem. Jejich porovnání je na grafu 33. Z grafu je vidět, že v případě tohoto modelu nedochází k tak výraznému nárůstu teploty v počáteční fázi, jako tomu bylo u předchozích modelů. Opět se ukazuje, že nastavení hořáků podle průměrných hodnot z experimentů je správný krok a je možné si jej ověřit na podobnosti průběhů teplot modelu s experimentem. Jednotlivé teplotní výkyvy (vlny) patrné v grafu 33 jsou jak u modelu, tak u experimentu. Dochází zde opět k rychlejšímu nárůstu teploty v modelované peci.

Porovnání průběhů tlaku modelované pece a experimentu je na grafu 34. Model v počáteční době simulace je mezi normovými limity, ale po uplynutí 12 minut dochází k opětovnému překročení limitů jako tomu bylo u předchozích modelů. Vliv odhořívání dřevěných nosníků nemá patrný vliv na fungování ventilace v modelované peci, protože průběhy tlaku jsou srovnatelné s předchozími modely.



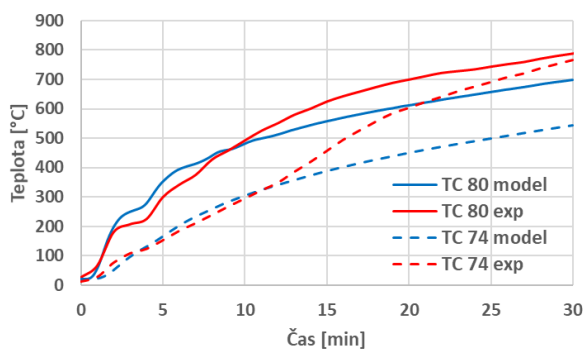
Graf 33 Teplota plynu



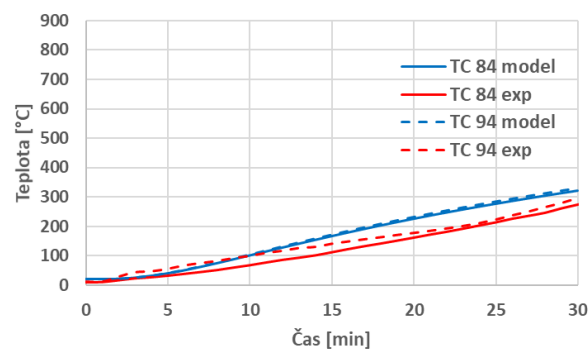
Graf 34 Průběh tlaku

Naměřené teploty uvnitř dřevěných nosníků ze simulace jsou porovnány s experimentem. Porovnání hodnot je provedeno na grafech 35 a 36. Na grafu 35 jsou porovnány hodnoty z termočlánků TC 74 a TC 80. První termočlánek TC 74 je na nosníku č. 1 a měří teplotu dřeva v hloubce 10 mm za ocelovým plechem. Termočlánek TC 80 je také na nosníku č. 1 a měří teplotu ocelového plechu.

Při porovnání průběhů teploty termočlánku TC 74 je vidět, že do 12 minut je shoda modelu s experimentem dobrá. Následně se ale u experimentu teplota zvyšuje oproti modelu. U TC 74 z experimentu se teplota zvětšuje, protože po 12 min. došlo k odhoření části dřevěného nosníku a termočlánek začal měřit teplotu plynu. To se v modelu nestalo, protože není nastavena natolik jemná síť pro dřevěný nosník, aby docházelo k postupnému odhořívání a termočlánek v modelu tak mohl po odhoření měřit teplotu plynu. Změna typu snímače v průběhu výpočtu není v FDS možná.



Graf 35 Teplota uvnitř dřev. nosníku a plechu



Graf 36 Teplota uvnitř dřev. nosníku

U porovnání teplot naměřených termočlánkem TC 80, kdy se měří teplota plechu ukotveného na nosníku, je vidět, že průběhy z modelu a experimentu do 10. min. mají podobný průběh. Následně po 10. min. opět dochází ke zvyšování teploty u termočlánku z experimentu a v modelu tomu tak není. Tato nesrovnalost může být také dána odhoříváním nosníku v místě ocelového plechu. V experimentu je po odhoření části nosníku plech vystaven z větší části horkým plynům a v modelu, kde nedochází k tak jemnému odhořívání, tomu tak není. Díky tomu v modelu nedochází k tak rychlému nárůstu teploty u ocelových plechů.

Další porovnání naměřených hodnot je provedeno na grafu 36, kde jsou porovnány průběhy teploty z termočlánků TC 84 a TC 94. Termočlánek TC 84 je umístěn na nosníku č. 2 a měří teplotu dřeva v hloubce 30 mm za ocelovým plechem. Naproti tomu termočlánek TC 94 je v nosníku č. 3 a měří teplotu dřeva v hloubce 30 mm bez ocelového plechu.

Z grafu 36 je možné pozorovat, že jak v modelu, tak při experimentu u termočlánku TC 84, který je umístěn za ocelovým plechem je nepatrně menší teplota než u termočlánku TC 94, který je ve dřevu bez opláštění. Ocelový plech nepatrně snižuje teplotu dřeva pod ním.

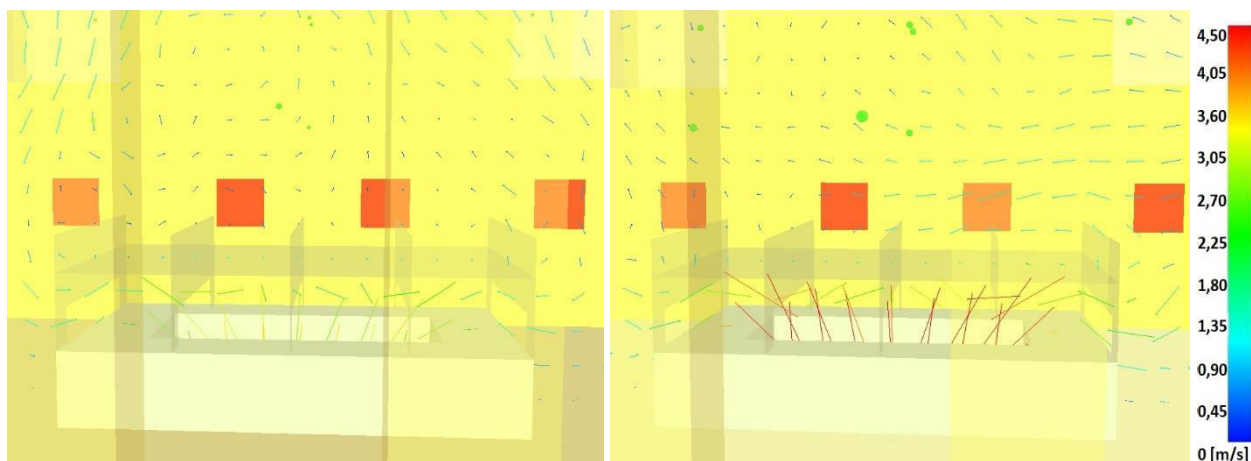
U obou termočlánků je patrná odlišnost modelu od experimentu. Rozdíl je místy až 80 °C. Tento rozdíl může být například způsoben tím, že program FDS není úplně vhodný řešitel úlohy pro přestup a šíření tepla do konstrukce, protože uvažuje pouze 1D přestup. Dalším důvodem je použití tepelně technických vlastností z normy, které se mohou lišit od skutečných vlastností materiálu dřevěných nosníků. Nemalý vliv na výsledky v modelu má také nedostatečné zahrnutí odhořívání dřeva.

6 Porovnání numerických modelů

6.1 Řízení ventilace

S ohledem na výsledky numerických modelů se ukázalo, že řízení tlaku v peci pomocí přirozeného a nuceného odtahu pece je správné. Vyžaduje ale podrobnější zkoumání v oblasti přesnějšího nastavení hodnot, jako například kdy má být nucená ventilace aktivní a jaká má být její účinnost. Při současném nastavení $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ dochází k častým překročení limitních hodnot daných normou.

Na obrázku 36 je detail ventilačního otvoru s vektorově zobrazenou rychlostí proudění vzduchu při přirozeném odtahu. Podle výsledků zobrazených ve Smokeview je rychlost proudění vzduchu v místě ventilačního otvoru při přirozeném odtahu $2,0 \text{ m/s}$ až $3,5 \text{ m/s}$. V případě nuceného odtahu je rychlost proudění vzduchu už vyšší, a to až $4,5 \text{ m/s}$ (obr. 37). Z obou obrázků je vidět, že ocelová konstrukce zabraňuje přímého odtahu vzduchu z prostoru pece a odtah je zejména z malé výšky nad podlahou. Takto provedený odtah s ocelovou konstrukcí přibližuje proudění horkých plynů v modelu tak jako je tomu během reálných zkoušek požární odolnosti.



Obr. 36 Přirozená ventilace otvorem

Obr. 37 Nucená ventilace otvorem

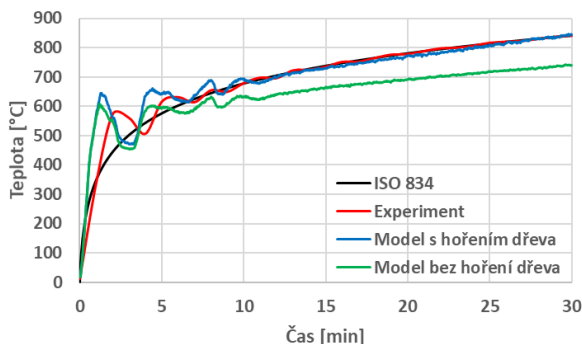
6.2 Vliv hoření dřevěných nosníků

V případě modelu s dřevěnými nosníky, kdy dochází k hoření zkušebních vzorků, je možné zjistit tepelný příspěvek od jejich hoření. Na grafu 37 jsou porovnány dva modely s experimentem. První model je nastaven s hořením dřevěných nosníků (v grafu 37 modře) a simulace v druhém modelu je bez jejich hoření (v grafu 37 zeleně). Oba dva modely mají nastavené stejné výkony pro hořáky.

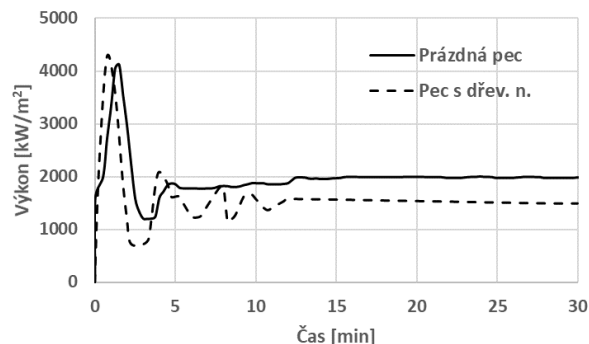
Jak je z grafu 37 patrné, v počáteční fázi zhruba do 4 minut nejsou rozdíly teplot tolik odlišné. To je způsobeno výkonem hořáků, který je v této době vysoký a tím, že dřevěné nosníky nehoří hned od počátku simulace. Nicméně v následujících minutách dochází k zvětšování rozdílů. Hořákům klesá počáteční vysoký výkon, dřevěné nosníky začínají hořet a tím pádem je více patrný příspěvek od jejich hoření. V 10. minutě je rozdíl teplot $56 \text{ }^\circ\text{C}$ a postupně se zvětšuje až dosáhne $105 \text{ }^\circ\text{C}$

v 30. minutě simulace. Z pohledu možných odchylek dle normy ČSN EN 1363-1 není model bez hoření dřeva pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí dostatečný.

Na grafu 38 je porovnání výkonu jednoho hořáku modelu prázdné pece a modelu s dřevěnými nosníky. Na tomto grafu je vidět, že křivka výkonu u modelu s dřevěnými nosníky je nižší. Rozdíl mezi těmito průběhy je v pokročilé fázi simulace necelých 500 kW/m². Tento rozdíl ve výkonu je dán příspěvkem hořením dřevěných nosníků, hořáky nemusí mít nastavený tak vysoký výkon jako je tomu v případě prázdné pece.



Graf 37 Teplota plynu

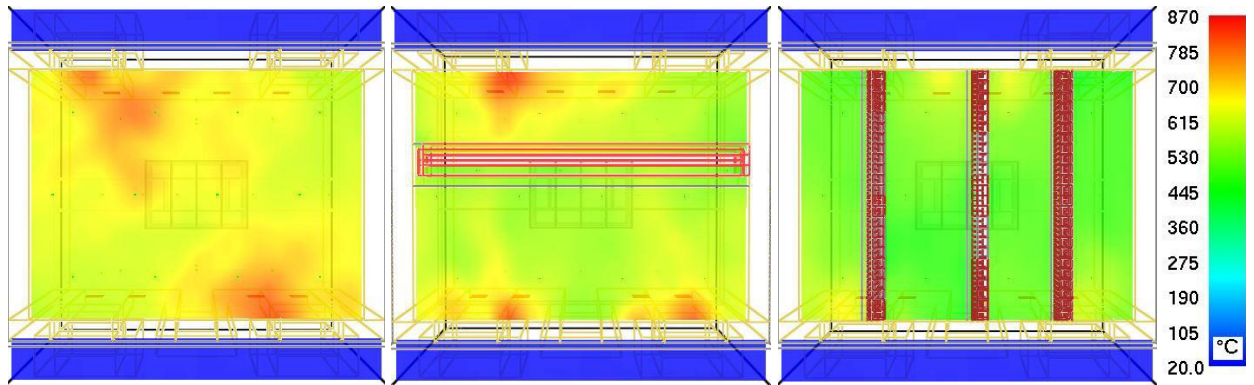


Graf 38 Výkon hořáku v modelu

6.3 Teploty plynu

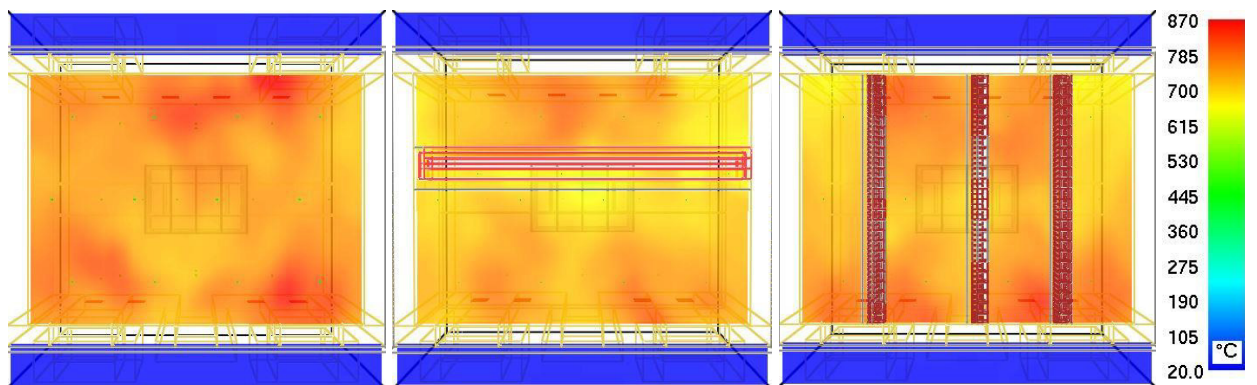
Následující část se zabývá náhledem na rozložení teploty v prostoru pece. Díky programu Smokeview je možné vykreslit barevné ISO plochy v různých půdorysných a řezových rovinách. Obrázky 38, 39 a 40 znázorňují půdorysné barevné ISO plochy 125 mm pod stropem (stejná výška pro deskové snímače teploty) všech třech modelů.

U všech třech modelů (obr. 38) je patrné, že teplota v této výšce není rovnoměrná. Zejména dochází k lokálním účinkům hořáků, které způsobují lokálně vyšší teploty. U modelu prázdné pece jsou teploty plynu rozdílné až o 150 °C (rozdíl teplot mezi nejchladnějším místem a nejteplejším). Na obrázku jsou zobrazeny ISO plochy z 200 s simulace, ve které mají hořáky stále nastavený vysoký výkon, což může přispívat ke zvyšování teploty v místě hořáků a k takovým rozdílům teploty. Nejrovnoměrnější rozložení teploty je u modelu s dřevěnými nosníky, kde je i nejmenší lokální účinek hořáků. To může být způsobeno nižším výkonem hořáků u tohoto modelu pece.



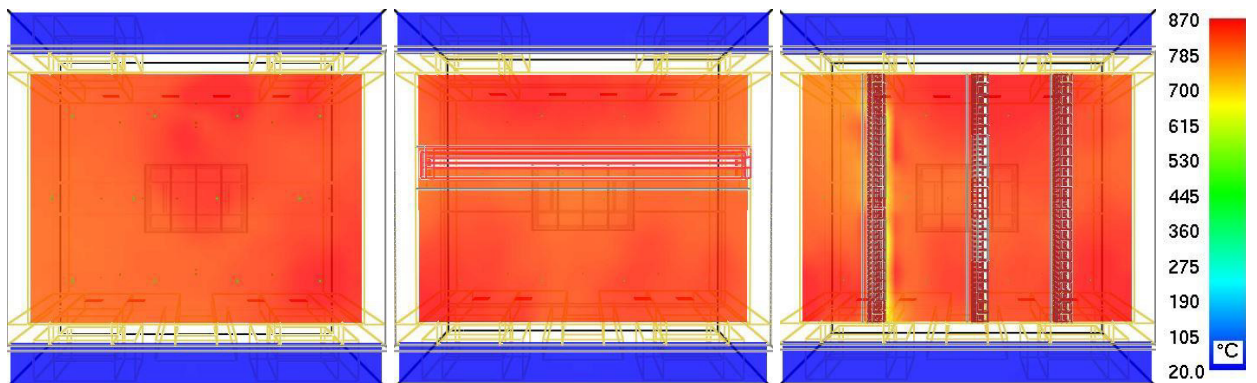
Obr. 38 Prázdná pec, pec s ocel. nosníkem, pec s dřev. nosníky 200 s

Obrázek 39 zobrazuje teploty plynu ve stejné výškové úrovni jako předchozí, ale v době simulace 600 s. U všech modelů jsou vidět místa s vyšší teplotou nad hořáky. Opět dochází k největším rozdílům teplot v modelu prázdné pece. U modelu s dřevěnými nosníky je patrné, že dochází k hromadění horkých plynů mezi nosníky a na stranách pece je plyn chladnější. V tomto případě je zřejmé, že vzdálenost mezi nosníky je důležitá pro zachování rovnoměrné teploty v peci.



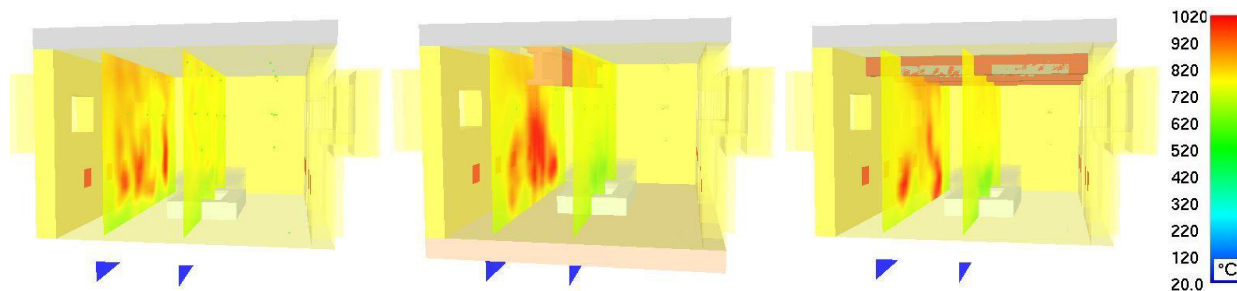
Obr. 39 Prázdná pec, pec s ocel. nosníkem, pec s dřev. nosníky 600 s

Poslední srovnání teplot plynu je na konci simulace v 1800 s. Zde modely dosahují nejvyšších teplot. V této pokročilé době simulace dochází k vyrovnání teplot a rozdíly jsou zanedbatelné u všech modelů.



Obr. 40 Prázdná pec, pec s ocel. nosníkem, pec s dřev. nosníky 1800 s

Pro lepší pozorování lokálních účinků hořáků jsou zobrazeny teplotní ISO plochy v řezu. Na obrázku 41 jsou modely všech třech pecí a znázorňují dosah lokálního účinku hořáků.



Obr. 41 Prázdná pec, pec s ocel. nosníkem, pec s dřev. nosníky 1200 s

Ve všech modelech jsou patrné lokální účinky hořáků jak v místě nad, tak i v prostoru před nimi. Zobrazené teplotní ISO plochy na obrázku 41 jsou vzdáleny od zadních hořáků 750 mm a 1500 mm (uprostřed pece). Bližší teplotní ISO plocha zobrazuje i lokální účinek hořáku, který byl patrný na předchozích obrázcích. Nicméně pokud se porovnává teplota plynu mimo lokální účinek hořáků, tak po výšce pece se dosahuje rovnoměrných teplot s minimálními rozdíly. Toto je zejména patrné na středových teplotních ISO plochách, kde téměř po celé výšce je v 1200 s simulace teplota 760 °C. V místě odtahu pece u podlahy je vidět, že je teplota nižší než ve zbytku pece, ale rozdíl není větší než 60 °C. Toto chladnější místo je způsobeno odtahem horkých plynů z pece ven.

7 Závěr

Modelováním metodou CFD lze dosáhnout velmi kvalitních výsledků co se týče teploty plynu v peci pro zkoušku požární odolnosti konstrukcí. Tato metoda je tedy velmi vhodná pro modelování zkoušky PO konstrukcí. S rostoucím zlepšováním výpočetní techniky nachází metoda CFD čím dál větší uplatnění v celém oboru požárního inženýrství.

Pokračováním ve výzkumu virtuální pece lze dosáhnout pomoci při zkoušení PO a redukcí zkoušek a jejich finanční náročnosti. Nicméně žádný numerický model nemůže nahradit reálné zkoušení stavebních výrobků na požární odolnost.

Virtuální pec je potřeba podrobit dalšímu zkoumání a zlepšování, aby v budoucnu mohla být jedním z nástrojů pro efektivní návrh požární bezpečnosti staveb. Prvotní zlepšení může nastat v nastavení všech tepelně technických vlastností závislých na teplotě u všech použitých materiálů. Zlepšení může být v lepším nastavení ventilace. V této práci je ukázán postup, který se zdá být vhodným řešením efektivního řízení ventilace pro virtuální pec. Je ale potřeba zlepšit jeho parametry, aby nedocházelo k překračování limitních hodnot stanovených normou.

Jak se ukázalo po podrobném zkoumání výsledků u všech modelů, velkou roli mají hořáky na rozložení teploty plynu v peci. Pro zlepšení virtuální pece je vhodné se zaměřit na nastavení hořáků, především jejich výkonu v počáteční fázi, kde dochází k největším nepřesnostem při porovnání teploty plynu s experimenty. Krok, který může zlepšit výkon hořáků je nastavení jejich automatického řízení podle měřených teplot z deskových snímačů teploty, tak jak je tomu v případě reálné zkoušky. Svoji roli v nastavení hořáků má i hmotnostní tok paliva přiváděného do hořáku. Ten může ovlivnit dosah lokálních účinků na teplotu plynu v peci.

Svoji roli ve zlepšování virtuální pece má zmenšování kontrolních objemů v případě odhořívání hořlavých zkušebních vzorků. U hoření dřevěných nosníků se ukázalo, že zvolená velikost sítě a kontrolních objemů není schopna správně simulovat odhořívání a šíření teploty ve zkušebním vzorku. Veškeré kroky, které mohou zlepšit kvalitu virtuální pece je potřeba validovat na dalších experimentech.

Virtuální pec prokazuje především dobré výsledky v pokročilé době simulace, kde se teploty plynu téměř shodují s experimenty. Navzdory nastavené jiné reakce hoření dřeva má virtuální pec poměrně přesné výsledky v modelu s dřevěnými nosníky, kde dochází k jejich hoření. Zvolená metoda CFD a program FDS se ukázaly jako vhodné prostředky pro modelování zkoušek požární odolnosti, mimo jiné i s hořlavými zkušebními vzorky.

Literatura

1. KUČERA, P. *Požární inženýrství: dynamika požáru*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. ISBN 978-80-7385-074-6.
2. DRYSDALE, D. *An introduction to fire dynamics*. 3rd ed. Chichester. West Sussex: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-31903-1.
3. KARLSSON, B., QUINTIERE J.G. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. ISBN 0-8493-1300-7.
4. KUČERA, P. a PEZDOVÁ, Z. *Základy matematického modelování požáru*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.
5. WELCH, S. a RUBINI, P.A. *Three-dimensional Simulation of Fire-Resistance Furnance*. Melbourne, Australia: Proceedings of 5th International Symposium on Fire Science, 1997.
6. PILOTO, P.A.G., MESQUITA, L.M.R. a PEREIRA, A. A. *Thermal analysis in fire-resistance Furnace*. Santander, Spain: Proceedings of the International Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems, 2009.
7. CAYLA, F., LEBORGNE, H. a JOYEUX, D. *Application of a virtual resistance furnace: fire resistance test simulation of a plasterboard membrane*. Prague: ASFE Conference, 2011.
8. KARABAŞ, O., a další. *Numerical Investigation of Temperature Distribution in a Fire Resistance Test Furnace*. Alanya/Antalya: 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 2016.
9. ČSN EN 1363-1. *Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2013.
10. MCGRATTAN, K. et al. *Fire Dynamics Simulator (Version 6), User's Guide*. Maryland, USA: National Institute for Standards and Technology, 2014.
11. WALD, F., a další. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
12. FORNEY, G. P. *Smokeview, A Tool for Vizualizing Fire Dynamics Simulation Data (Version 6), User's Guide*. Maryland (USA): National Institute for Standards and Technology, 2014.
13. NOVOTNÁ, P. *Modelování požární zkoušky v peci*. Praha 2017. Diplomová práce (Ing.): České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí. 2017-02-07.
14. LIŠKOVÁ, N. *Adiabatická teplota povrchu ve vodorovné peci*. Praha 2017. Diplomová práce (Ing.): České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí. 2017-02-07.
15. HOROVÁ, K., *Modeling of fire spread in structural fire engineering*. Praha 2015. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.

Seznam obrázků

Obr. 1 Fáze požáru v uzavřeném prostoru [1, 2, 3].....	2
Obr. 2 Tlakové profily při požáru otvorem v obvodové stěně [1]	3
Obr. 3 Tepelné ztráty během plně rozvinutého požáru [3]	4
Obr. 4 Geometrie modelované pece [5]	7
Obr. 5 Model pece pro zkoušku požární odolnosti – Portugalsko [6]	7
Obr. 6 Numerický model pece pro zkoušku požární odolnosti – Portugalsko [6].....	8
Obr. 7 Numerické výsledky simulace testu [6].....	9
Obr. 8 Numerický model pece – Francie [7]	10
Obr. 9 Geometrie, síť a povrchy modelované pece – Turecko [8]	10
Obr. 10 Rozložení teplot v 1. (vlevo) a v 5. (vpravo) sekundě [8]	11
Obr. 11 Stropní pec v Pavus a.s.	12
Obr. 12 Půdorys zkušební pece.....	13
Obr. 13 Řez A-A' zkušební pecí.....	13
Obr. 14 Plášťový termočlánek a deskový snímač teploty 100 mm pod stropem.....	15
Obr. 15 Prázdná pec	16
Obr. 16 Pec s ocelovým nosníkem	17
Obr. 17 Dřevěné nosníky	18
Obr. 18 Termočlánek v nosníku	18
Obr. 19 Pec s dřevěnými nosníky	18
Obr. 20 Dřevěné nosníky s pozicemi snímačů teploty.....	19
Obr. 21 Zobrazení výpočetní sítě v půdorysu	21
Obr. 22 Zobrazení výpočetní sítě v řezu	21
Obr. 23 Zobrazení sítě v půdorysu	22
Obr. 24 Zobrazení sítě v řezu	22
Obr. 25 Zobrazení sítě v půdorysu	22
Obr. 26 Zobrazení sítě v řezu	22
Obr. 27 Zobrazení sítě v půdorysu	23
Obr. 28 Zobrazení sítě v řezu	23
Obr. 29 Teplotní pole jednoho hořáku s vlivem hmotnostního toku	27
Obr. 30 Ventilační otvor s ochrannou konstrukcí	31

Obr. 31	Ventilační otvor v numerickém modelu	31
Obr. 32	Dřevěné nosníky s pozicemi snímačů teploty v modelu.....	32
Obr. 33	Model prázdné pece	34
Obr. 34	Model pece s ocelovým nosníkem.....	36
Obr. 35	Model pece s dřevěnými nosníky	37
Obr. 36	Přirozená ventilace otvorem	40
Obr. 37	Nucená ventilace otvorem	40
Obr. 38	Prázdná pec, pec s ocel. nosníkem, pec s dřev. nosníky 200 s	42
Obr. 39	Prázdná pec, pec s ocel. nosníkem, pec s dřev. nosníky 600 s	42
Obr. 40	Prázdná pec, pec s ocel. nosníkem, pec s dřev. nosníky 1800 s	42
Obr. 41	Prázdná pec, pec s ocel. nosníkem, pec s dřev. nosníky 1200 s	43
Obr. 42	Půdorys pece	50
Obr. 43	Řez A-A'	50
Obr. 44	Řez B-B'	51
Obr. 45	Řez C-C'	51
Obr. 46	Půdorys modelu	52
Obr. 47	Řez modelem A-A'	52
Obr. 48	Řez modelem B-B'	53
Obr. 49	Řez modelem C-C'	53

Seznam grafů

Graf 1	Normová teplotní křivka [1]	4
Graf 2	Teploty a průtok plynu v peci [5]	7
Graf 3	Teploty v experimentu test 1 [6]	8
Graf 4	Rozdíly teplot v experimentu test 1 [6]	8
Graf 5	Teploty deskových termočlánků [7]	10
Graf 6	Průměrné teploty v peci vs ISO 834 [8]	11
Graf 7	Teploty odtahovaných plynů vs ISO 834 [8].....	11
Graf 8	Normová teplotní křivka s limity	14
Graf 9	Limity přetlaku	14
Graf 10	Rozdíl tlaku během zkoušek	16
Graf 11	Průměrné výkony hořáků	16

Graf 12 Teploty během zkoušky	16
Graf 13 Rozdíl tlaků během zkoušky.....	17
Graf 14 Průměrný výkon hořáků	17
Graf 15 Teploty během zkoušky	17
Graf 16 Rozdíl tlaku během zkoušky.....	18
Graf 17 Průměrný výkon hořáků	19
Graf 18 Teploty během zkoušky	19
Graf 19 Průměrný výkon hořáků	28
Graf 20 Hmotnostní tok	28
Graf 21 Průměrný výkon hořáků	28
Graf 22 Hmotnostní tok	28
Graf 23 Průměrný výkon hořáků	29
Graf 24 Hmotnostní tok	29
Graf 25 Rychlost uvolňování energie	29
Graf 26 Analýza jemnosti výpočetní sítě.....	33
Graf 27 Teplota plynu – zkouška podle ISO 834	35
Graf 28 Teplota plynu – zkouška podle konstant.	35
Graf 29 Tlak v peci – zkouška podle ISO 834	35
Graf 30 Tlak v peci – zkouška podle konstant.	35
Graf 31 Teplota plynu	36
Graf 32 Průběh tlaku	36
Graf 33 Teplota plynu	38
Graf 34 Průběh tlaku	38
Graf 35 Teplota uvnitř dřev. nosníku a plechu	38
Graf 36 Teplota uvnitř dřev. nosníku	38
Graf 37 Teplota plynu	41
Graf 38 Výkon hořáku v modelu	41
Graf 39 Měrné teplo – AT60A	54
Graf 40 Teplená vodivost – AT60A.....	54
Graf 41 Měrné teplo – HB11	54
Graf 42 Teplená vodivost – HB11	54
Graf 43 Teplená vodivost – Kerasil 1000	54
Graf 44 Teplená vodivost – Kerablok	54

Graf 45 Měrné teplo – Fibratex	55
Graf 46 Teplená vodivost – Fibratex.....	55
Graf 47 Teplená vodivost – Žárobeton	55
Graf 48 Měrné teplo – Ocel	55
Graf 49 Teplená vodivost – Ocel	55
Graf 50 Teplená vodivost – Dřevo	55
Graf 51 Měrné teplo – Dřevo	55

Seznam tabulek

Tab. 1 Seznam deskových snímačů teploty	15
Tab. 2 Seznam plášťových termočlánků	15
Tab. 3 Seznam plášťových termočlánků v dřevěných nosnících.....	19
Tab. 4 Tepelně technické vlastnosti použitých materiálů	25