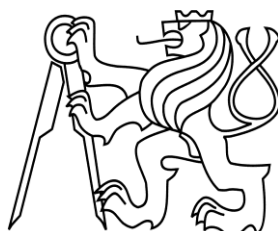


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb

ANALÝZA CHOVÁNÍ ÚČINKU POŽÁRU VE VĚTRANÉ DUTINĚ U FASÁDNÍCH SYSTÉMŮ

ANALYSIS OF FIRE BEHAVIOR IN VENTILATED CAVITIES IN FAÇADE
SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Michal Burian

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

2021

Obsah

Zadání diplomové práce	IV
Specifikace zadání.....	V
Prohlášení	VI
Poděkování	VII
Abstrakt	VIII
Abstract	IX
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	X
1 Úvod	1
1.1 Motivace.....	1
1.2 Cíle práce	1
1.3 Struktura.....	1
2 Současný stav poznání.....	3
2.1 Skladba větraného fasádního systému	4
2.2 Analýza požárních rizik větrané fasádní dutiny.....	5
2.2.1 Vliv šířky dutiny	6
2.2.2 Vliv požárních bariér	8
2.2.3 Vliv hořlavých materiálů	13
2.2.4 Destrukce fasád	15
2.2.5 Přidružená rizika větraných fasádních systémů	18
2.3 Rešerše současného stavu vývoje jednotné evropské velkorozměrové zkušební metodiky šíření požáru po fasádě.....	20
2.4 Normativní požární požadavky v ČR a požadavky v zahraničí.....	23
2.4.1 Česká republika.....	23
2.4.2 Slovenská republika	25
2.4.3 Velká Británie	25
2.4.4 Belgie	29
3 Matematický CFD model chování požáru v dutině s různou šířkou	32
3.1 Navržené scénáře	32
3.1.1 Výpočetní síť.....	33
3.1.2 Použité materiály.....	33
3.1.3 Měřicí zařízení	34
3.2 Diskuse výsledků	35
3.2.1 Dutina šířky 30 mm.....	35
3.2.2 Dutina šířky 50 mm.....	39
3.2.3 Dutina šířky 70 mm.....	42
3.2.4 Porovnání modelovaných případů	45
4 Experimentální analýza chování požáru v dutině s různou šířkou	50
4.1 Konstrukce testovaného vzorku	50
4.2 Měřené veličiny.....	51
4.3 Diskuse získaných výsledků a porovnání s CFD modelem	52

4.3.1	Experiment s dutinou šířky 30 mm	52
4.3.2	Experiment s dutinou šířky 50 mm	55
4.3.3	Experiment s dutinou šířky 70 mm	57
4.3.4	Porovnání experimentálních analýz	59
5	Experimentální zkouška větraného fasádního systému s dřevěným obkladem..	63
5.1	Navržené zkoušky	63
5.2	Měření a sledované veličiny	64
5.3	Diskuse získaných výsledků	64
5.3.1	Porovnání naměřených veličin.....	65
5.3.2	Vizuální hodnocení experimentálních analýz jednotlivých vzorků.....	67
5.3.3	Vyhodnocení	69
6	Závěr	70
6.1	Závěr k současnému poznání řešené problematiky.....	70
6.2	Závěr k CFD modelům chování požáru v dutině s různou šířkou	70
6.3	Závěr k experimentálním zkouškám	71
6.4	Doporučení pro navazující práce	71
Příloha 1 – Zdrojový kód PyroSim.....		73
Příloha 2 – Doplňující data k CFD modelům		79
Příloha 3 – Fotodokumentace z experimentální analýza chování požáru v dutině.....		82
Příloha 4 – Fotodokumentace z experimentální zkoušky větraného fasádního systému s dřevěným obkladem.....		86
Seznam obrázků.....		90
Seznam tabulek.....		95
Literatura		96

Zadání diplomové práce

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Burian</u>	Jméno: <u>Michal</u>	Osobní číslo: <u>468259</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra konstrukcí pozemních staveb</u>		
Studijní program: <u>Integrální bezpečnost staveb</u>		
Studijní obor: <u>-</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Analýza chování účinku požáru ve větrané dutině u fasádních systémů</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Analysis of Fire Behavior in Ventilated Cavities in Façade Systems</u>	
Pokyny pro vypracování:	
1/ Stav poznání	
2/ Analýza požárních rizik větrané dutiny – vliv šířky geometrie větrané dutiny (šířky, výška, hloubka), vliv hořlavých materiálů ve fasádním systému, vliv požárních bariér, destrukce fasád	
3/ Rešerše současného stavu vývoje jednotné evropské metodiky zkoušení fasád	
4/ Srovnání normativních požárních požadavků v ČR s dostupnými požadavky v zahraničí	
5/ Případová studie – matematický CFD model v programu FDS	
6/ Doporučení pro navazující výzkum	
Seznam doporučené literatury:	
[1] LIVKISS, Karlis, Stefan SVENSSON, Bjarne HUSTED a Patrick VAN HEES. Flame Heights and Heat Transfer in Façade System Ventilation Cavities. Fire Technology [online]. 2018, 54(3), 689–713. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-018-0706-2.	
[2] ČOLIČ, Antonela a Ivana Banjad PEČUR. Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades. Fire Technology [online]. 2020, 56(4), 1725–1754. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-020-00950-w.	
[3] RISE Project "Finalisation of the European approach to assess the fire performance of facades"	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Marek Pokorný, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>22.9.2021</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>2.1.2022</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
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“.

22. 9. 2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Specifikace zadání

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Michal Burian

Název diplomové práce: Analýza chování účinku požáru ve větrané dutině u fasádních systémů

Základní část: Analýza chování účinku požáru ve větrané dutině u fasádních systémů podíl: 100 %

Formulace úkolů: 1/ Stav poznání

2/ Analýza požárních rizik větrané dutiny – vliv šířky geometrie větrané dutiny (šířky, výška, hloubka), vliv hořlavých materiálů ve fasádním systému, vliv požárních bariér, destrukce fasád

3/ Rešerše současného stavu vývoje jednotné evropské metodiky zkoušení fasád

4/ Srovnání normativních požárních požadavků v ČR s dostupnými požadavky v zahraničí

5/ Případová studie – matematický CFD model v programu FDS

6/ Doporučení pro navazující výzkum

Podpis vedoucího DP: Datum:

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

2. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

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

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Analýza chování účinku požáru ve větrané dutině u fasádních systémů“ jsem vypracoval samostatně pod odborným vedením Marka Pokorného. Všechny použité materiály a podklady jsou uvedeny v seznamu citované literatury. Dále tímto souhlasím s použitím tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/200 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Benešově dne 2. 1. 2022

.....
Michal Burian

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za podporu při studiu a vyhotovení této práce. Dále bych také rád poděkoval Ing. Markovi Pokornému, Ph.D. za jeho odborné rady, konzultace, trpělivost při vedení této diplomové práce a také za jeho pomoc při realizaci experimentálních požárních zkoušek. V poslední řadě patří velké poděkování Univerzitnímu centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze za finanční podporu a poskytnutí prostorů pro realizaci požárních zkoušek.

V Benešově dne 2. 1. 2022

.....

Michal Burian

Abstrakt

Fasádní systém tvoří dominantní prvek každé budovy, proto je nutné jeho návrhu věnovat značnou pozornost. Ačkoliv jsou dnes převážně upřednostňovány kontaktní zateplovací systémy, nelze ovšem opomenout důležitou pozici větraných fasádních systémů na poli výstavby. Vzhledem k velkému množství soudobých materiálových možností, konstrukčních řešení a technologických postupů je současný stav z hlediska chování za požáru těchto fasádních systémů nedostatečný a normy, resp. normativní požadavky nejsou schopny na tento stav poznání adekvátně reagovat. S tím také úzce souvisí nejednotná zkušební metodika, která je roztržena po jednotlivých zemích Evropské unie, a představuje překážku pro výrobce a dodavatele komponent fasádního systému. Teoretická část této práce se zabývá současným stavem poznání, ve kterém je řešena skladba větraného fasádního systému a analýza požárních rizik větrané fasádní dutiny, dále řeší stavu vývoje jednotné zkušební metodiky šíření požáru po fasádě a v poslední řadě soudobým normativním požadavkům jak v České republice, tak i pro porovnání ve vybraných zahraničních zemích. V rámci praktické části je věnován prostor matematickým CFD modelům chování požáru ve větrané dutině, které zkoumají vliv šířky dutiny na chování požáru v dutině větraného fasádního systému s nehořlavými výrobky. Dále také byly provedeny dvě série experimentů v požární laboratoři. První z nich navazuje na CFD model a zabývá se vlivem šířky dutiny na chování požáru, přičemž získané výsledky jsou porovnány s předpoklady a daty získanými z CFD modelů. Druhá série experimentů se zabývá zkoumáním vlivu orientace dřevěného obkladu na chování požáru šířícího se větraným fasádním systémem. Získané výsledky jsou poté podrobeny diskusi nezávisle na předchozím měření a CFD modelech vlivem odlišné konfigurace a okrajových podmínek této série experimentů.

Klíčová slova

Fasáda; větraná dutina; požár; plamen; obklad; dřevo; teplota; tepelný tok; CFD; FDS

Abstract

The façade system is the dominant element of every building, so it is necessary to pay considerable attention to its design. Although contact thermal insulation systems are mostly preferred today, the important position of ventilated façade systems in the field of construction cannot be overlooked. Due to the large number of contemporary material options, design solutions and technological processes, the current state in terms of fire behavior of these façade systems is insufficient and standards, respectively. normative requirements are not able to adequately respond to this state of knowledge. Closely related to this is the inconsistent test methodology, which is fragmented across the European Union and is an obstacle for manufacturers and suppliers of façade system components. The theoretical part of this work deals with the current state of knowledge, which addresses the composition of the ventilated façade system and fire risk analysis of the ventilated façade cavity, as well as a review of the development of a uniform test methodology for the spread of fire on the façade and, last but not least, contemporary normative requirements both in the Czech Republic and for comparison in selected foreign countries.. In the practical part, space is devoted to mathematical CFD models of fire behavior in the ventilated cavity, which examine the effect of cavity width on the fire behavior in the cavity of a ventilated façade system with non-combustible products. Furthermore, two series of experiments were performed in a fire laboratory. The first of them follows the CFD model and deals with the influence of cavity width on fire behavior, while the obtained results are compared with the assumptions and data obtained from CFD models. The second series of experiments deals with the study of the influence of the orientation of wood cladding on the behavior of a fire spreading through the ventilated façade system. The obtained results are then discussed independently of the previous measurements and CFD models due to the different configuration and boundary conditions of this series of experiments.

Keywords

Façade; ventilated cavity; fire; flame; cladding; wood; temperature; heat flow; CFD; FDS

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A	Plocha	m ²
c	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
FIT	Teplota vzplanutí (z angl. Flame Ignition Temperature)	°C
SIT	Teplota vznícení (z angl. Spontaneous Ignition Temperature)	°C
GT	Teplota žhnutí (z angl. Glow Temperature)	°C
H	Výhřevnost	MJ/kg

Řecké symboly

ε	Emisivita	-
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
μ	Faktor difuzního odporu	-
ρ	Objemová hmotnost	kg/m ³

Zkratky

ETICS	Kontaktní zateplovací systém (z angl. exterior thermal insulation composite system)
EU	Evropská Unie
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
TSC	Tenkostěnný radiometr (z angl. thin skin calorimetr)
ČVUT	České vysoké učení technické
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
OSB	Dřevoštěpková deska s různou orientací více vrstev spojených pojivem (z angl. oriented strand board)
PTCH	Požárně technické charakteristiky

PUR	Polyuretan
PIR	Polyisokyanurát
PE	Polyetylen
EPS	Expandovaný polystyren
XPS	Extrudovaný polystyren
TRO	Třída reakce na oheň

1 Úvod

1.1 Motivace

Fasádní systém tvoří v současné době nedílnou součást každé budovy. Je dominantním architektonickým prvkem a podílí se na celkovém rázu a vzhledu stavebního objektu. Dále se také podílí na tvorbě vnitřního prostředí tím, že chrání budovy před vnějšími klimatickými vlivy a zajišťuje tepelnou stálost a tepelnou pohodu v interiéru.

Současná legislativa není schopna adekvátně reagovat na soudobé množství konstrukčních a materiálových řešení větraných fasádních systémů, což ústí v minimální oporu v podobě normativních požadavků v souboru norem ČSN 73 08xx, například oproti podrobným požadavkům pro ETICS. S tím rovněž úzce souvisí roztržité zkušební metodiky v evropských zemích, což vede i k rozdílným klasifikačním postupům a ztížení pohybu stavebních výrobků nebo celých fasádních systému v rámci evropského trhu.

Motivací této práce je poskytnout poznání vedoucí k prohloubení znalostí o chování požáru v dutině fasádního systému a analýza rizik takového požáru, rovněž ale také komparace normativních požadavků jednotlivých zemí a rešerše současného stavu vývoje jednotné zkušební metodiky šíření požáru po fasádě.

1.2 Cíle práce

Hlavní cíle této diplomové práce lze shrnout do několika následujících bodů:

- 1) Představení současného stavu poznání chování požáru ve větrané dutině fasádního systému, analýza požárních rizik a rekapitulace dosud získaných poznatků.
- 2) Shrnutí vývoje jednotné evropské zkušební metodiky fasádních systémů.
- 3) Revize technických požadavků na provádění vnějších povrchových úprav a fasádních systémů stanovených českými technickými normami a právními předpisy, porovnání s dostupnými požadavky zahraničních zemí.
- 4) Aplikace CFD modelu pro sledování účinků požáru ve větrané dutině fasádního systému.
- 5) Sestavení experimentálních vzorků větraných fasádních systémů a porovnání s CFD modelem. Shrnutí jevů, které jsou pozorovány při požární situaci v dutině větraného fasádního systému.

1.3 Struktura

Diplomová práce je celkem rozdělena do šesti kapitol, které jsou děleny do dvou úrovní podkapitol, a je doplněna přílohami obsahující doplňující data, fotodokumentaci, seznam obrázků, tabulek a přehled použité literatury.

„Kapitola 1: Úvod“ tvoří první část a představuje řešené téma diplomové práce. Je zde popsán důvod a motivace pro zvolení řešeného tématu. Tato kapitola také stanovuje cíle této diplomové práce a objasňuje její strukturalizaci do jednotlivých logických celků.

„Kapitola 2: Současný stav poznání“ zahrnuje celkem šest podkapitol souvisejících s danou problematikou. Podkapitola 2.1 řeší skladbu větraného fasádního systému obecně. Analýza požárních rizik větrané fasádní dutiny je řešena v podkapitole 2.2, ve které je přezkoumán vliv jednotlivých komponentů ve fasádním systému na chování požáru ve větrané dutině a jsou rozebrány další potíže větraných fasádních systémů. Podkapitola 2.3 obrací pozornost na současný stav vývoje jednotné evropské metodiky šíření požáru po fasádě. Rešerši a porovnání normativních požadavků z hlediska fasádních systémů je věnovaná podkapitola 2.4. V rámci podkapitoly 2.5 je stanovena výzkumná otázka v návaznosti na praktickou část diplomové práce a podkapitola 2.6 vymezuje cíle práce.

„Kapitola 3: Matematický CFD model chování požáru v dutině s různou šířkou“ pojednává o matematickém modelu dutiny větraného fasádního systému. Řešený model je uzpůsoben tak, aby byl snadno realizovatelný i v podobě experimentu. Celkem jsou zhotoveny tři modely, každý z nich představuje dutinu fasádního systému o šířce 30, 50 a 70 mm, přičemž materiály, které ji ohraničují, jsou navrženy výhradně nehořlavé, a to z toho důvodu, aby bylo možné sledovat pouze vliv šířky dutiny na měřené veličiny. Těmi jsou teplota plynů, rychlost proudění a hustota tepelného toku. Průběhy těchto veličin jsou pak porovnány v podobě slovního zhodnocení, grafů a vizualizací.

„Kapitola 4: Experimentální analýza chování požáru v dutině s různou šířkou“ se věnuje experimentální analýze, která proběhla v požární laboratoři UCEEB ČVUT v Praze. Experimentální analýza totožně kopírovala matematický model, aby bylo možné porovnat hodnoty měřených veličin shodných s matematickým CFD modelem. Celkem byly provedeny 4 zkoušky, tři s větranou dutinou a jedna referenční, tedy bez obkladu a účinků větrané dutiny.

„Kapitola 5: Experimentální zkouška větraného fasádního systému s dřevěným obkladem“ popisuje celkem čtyři zkoušky, ve kterých byl pomocí přířezů OSB desky imitován dřevěný fasádní obklad, a to svislý, vodorovný, vodorovný s lamelou přerušující dutinu a plnou OSB deskou. Výsledkem je vizuální hodnocení chování požáru u rozdílných fasádních obkladů, a porovnání získaných dat v podobě teplot v dutině.

„Kapitola 6: Závěr“ shrnuje získané poznatky z jednotlivých kapitol této práce, jak teoretických, tak i experimentálních. Zároveň jsou zde napsány náměty, doporučení pro další práce a zkoumání jevů v řešené oblasti vedoucí k rozšíření stavu poznání.

„Příloha 1“ obsahuje zdrojové kódy použité pro simulaci matematických CFD modelů. **„Příloha 2“** doplňuje pro zajímavost další vybraná data z CFD modelu. **„Příloha 3“** a **„Příloha 4“** obsahují fotodokumentaci z průběhu experimentální analýzy chování požáru v dutině a experimentální zkoušky větraného fasádního systému s dřevěným obkladem.

2 Současný stav poznání

V současné době je na trhu velké množství výrobců, kteří produkují široké spektrum fasádních systémů. Tyto fasádní systémy se dají v principu rozdělit na kontaktní zateplovací systémy (tzv. ETICS), pro něž je specifické celoplošné spojení tepelněizolačního materiálu s podkladem a s finální úpravou pohledovou omítkou, a nekontaktní, kdy je izolace buďto kotvena k podkladní konstrukci nebo je vkládána do roštu, přičemž tento rošt tvoří nosnou konstrukci pro finální pohledový prvek a zároveň vzniká prostor mezi obkladem a roštem, který je větrán.

Větrané fasády přinášejí řadu výhod, mezi které patří např. zvýšený teplotní komfort a odvod zkondenzované vodní páry větranou dutinou, tudíž jsou vhodné pro rekonstrukce, zajímavé architektonické řešení fasády a v neposlední řadě i relativně snadnou údržbu. Na druhé straně samozřejmě stojí nevýhody, a to poměrně vysoké náklady oproti běžnému kontaktnímu zateplovacímu systému, ale zejména nedostatečný stav poznání chování požáru u fasádních systémů s větranou dutinou a s tím související minimální soudobé požadavky požárních předpisů v souvislosti s variabilitou trhu poskytujícího velké spektrum soudobých materiálů a komponentů fasádních systémů.

V důsledku nevhodně navržených větraných fasádních systémům došlo v posledních letech k poměrně vysokému počtu požárů, které se velmi rychle rozšířily po obálce budovy, pro příklad lze jmenovat požár Grenfell Tower v Londýně, požár Televizního kulturního centra v Pekingu a požár bytového domu v Miláně, viz obr. 1. Tyto požáry měly katastrofické následky nejen materiální, ale rovněž v případě Grenfell Tower i na lidských životech.



a)

b)

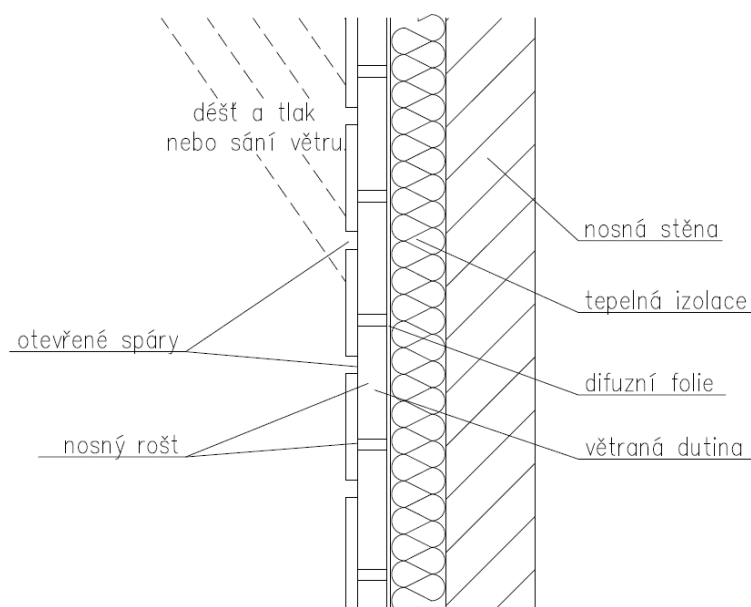
c)

obr. 1: Závažné požáry výškových budov: a) Grenfell Tower (2017), zdroj: Design Building Wiki, b) Televizního kulturního centra v Pekingu (2009), zdroj: Arch Daily, c) bytového domu v Miláně (2021), zdroj: Architect's journal

V návaznosti na tyto incidenty se obrátila pozornost na zkoumání chování požáru větraných fasádních systémů. Za poslední dobu bylo zhotoveno množství studií věnujících se řešené problematice, které převážně sledují vliv jednotlivých komponentů zvláště (geometrie dutiny, hořlavé izolanty, požární bariéry atd.) na šíření požáru u těchto fasád, neboť se jedná o velmi komplexní problematiku. Tato práce využívá a shrnuje poznatky získané nejen z těchto studií, ale také navazuje na předchozí diplomové práce [1] a [2].

2.1 Skladba větraného fasádního systému

Větraný fasádní systém se skládá z několika vrstev, ve které je vnější plášť oddělen od vnitřní vrstvy větraným meziprostorem (souvislou vzduchovou dutinou). Dutina včetně vnějšího pláště je vytvořena tak, aby umožnila odvětrání vlhkosti a zároveň zabránila vtoku náporových dešťových vod do dutiny a dalších vnitřních vrstev.



obr. 2: Řez skladbou větraného fasádního systému

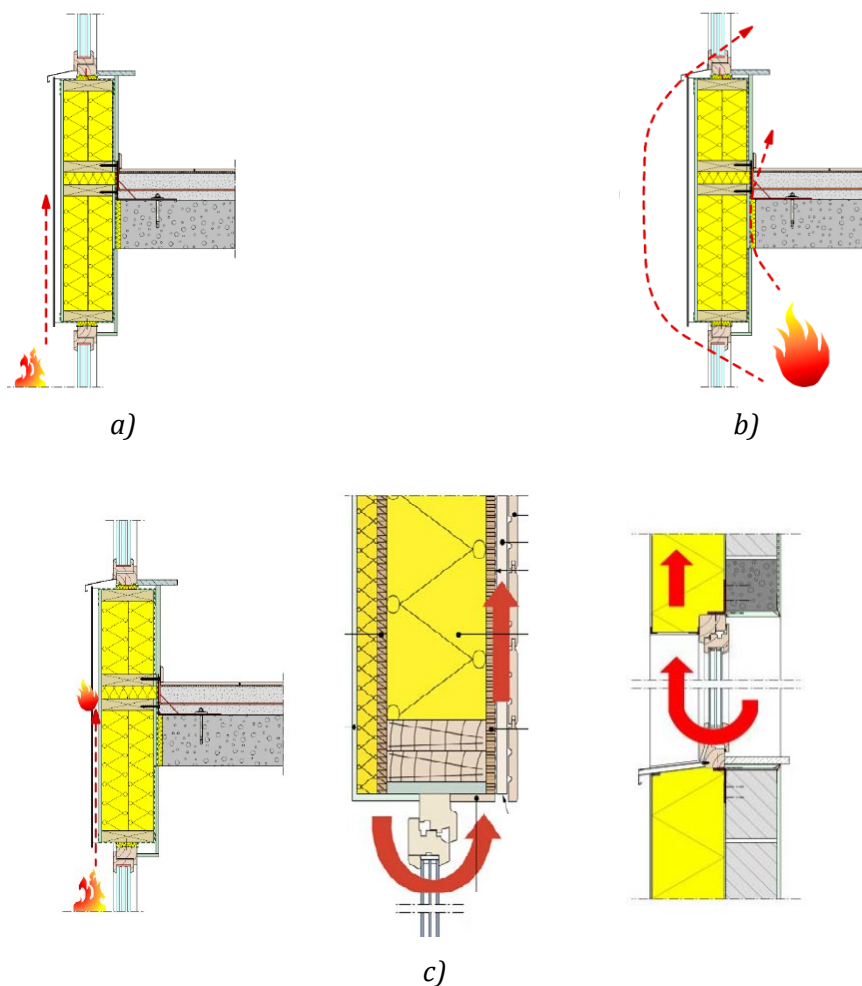
Skladbu od interiéru tvoří nejprve nosný plášť budovy, následně je do něj přichycen buďto přímo nebo přes konzole rošt, ve kterém je uložena izolace a většinou je dodatečně kotvena hmoždinkami. Na roštu je následně kotven fasádní obklad, přičemž rošt vytváří větranou dutinu mezi izolantem a fasádním obkladem. Difúzní fólie se navrhuje jakožto ochrana tepelné izolace před větším množstvím stékající vody, ekvivalentem je plně hydrofobizovaný izolant.

Klíčovým elementem, který zajistí funkčnost takového fasádního systému, je větraná dutina, jejíž šířky se běžně pohybují kolem 30–60 mm a slouží k odvětrání vlhkosti a zkondenzované vodní páry. Větraná dutina rovněž umožňuje snížení tepelných zisků v letním období a zvýšení tepelného komfortu v budově. U těchto systémů se zabraňuje

nežádoucímú vnikání hmyzu, hlodavců a ptáků do dutiny perforovanou lištou, která zároveň zajistí dostatečný přívod vzduchu, a tudíž i větrací funkci.

2.2 Analýza požárních rizik větrané fasádní dutiny

Základní a největší rizika v oblasti fasádních systémů jsou řazeny do 2 skupin. První skupinou je vnitřní požár, kde problematika šíření požáru spočívá u otvorů ve fasádě, a druhou skupinou je vnější požár, který může vzniknout od okolních předmětů [1].



obr. 3: Možnosti šíření požáru: a) obkladem fasádního systému, b) exteriérem a spárou ve styku podlahy a obvodové konstrukce, c) konstrukcí fasádního systému [3]

Vnější požár je riziko zejména v oblasti založení fasádního souvrství. Toto místo může být namáháno plameny od vnějšího požáru, který mohl vzniknout od hořících předmětů na ulici, např. kontejner na odpad, keř, auto apod. Následné přeskočení plamene na fasádu může poškodit vnější plášť či dokonce celé souvrství fasádního systému, případně může dojít k pronikání plamene do větrané dutiny. Vnitřní požár, který vznikne v objektu (např. v bytě), je velice nebezpečný, zejména pokud dojde k celkovému vzplanutí. Požár bude dosahovat vysokých teplot a popraskají okenní skleněné výplně, přes které mohou plameny snadno

vstupovat do větrané dutiny pod obkladem, případně může dojít k zahoření vnějšího pláště [1].

Zpráva [3] pojednávající o účincích požáru u fasádních systémů přináší rozbor rizik problematiky řešeného tématu. Zdůrazňuje, že požár šířící se fasádním systémem je enormně rizikový jev, který má za následek velké škody nejen na majetku, ale i lidských životech. Tato zpráva představuje tři způsoby šíření požáru (patrně též na obr. 3):

- 1) Šíření požáru vnějškem přes hořlavý obklad.
- 2) Rozšíření požáru do vyšších podlaží přes styčnou spáru stropu a podlahy s obvodovým pláštěm, kdy se požár šíří nejen prasklou okenní výplní po fasádě, ale rovněž i zmíněnou spárou.
- 3) Pomocí hořlavých prvků uvnitř fasádního systému a větrané dutiny pod obkladem. Požár se může jednat skrytě, ale i vlivem komínového efektu v kombinaci s použitím hořlavých výrobků extrémně rychle šířit po celé fasádě.

S posledním zmíněným bodem se pojí mimořádně závažná rizika, která jsou rozhodujícím faktorem pro správný návrh fasádního systému z hlediska požární bezpečnosti. Vliv jednotlivých prvků ovlivňujících chování požáru ve větrané dutině fasádního systému je rozebrán v navazujících kapitolách.

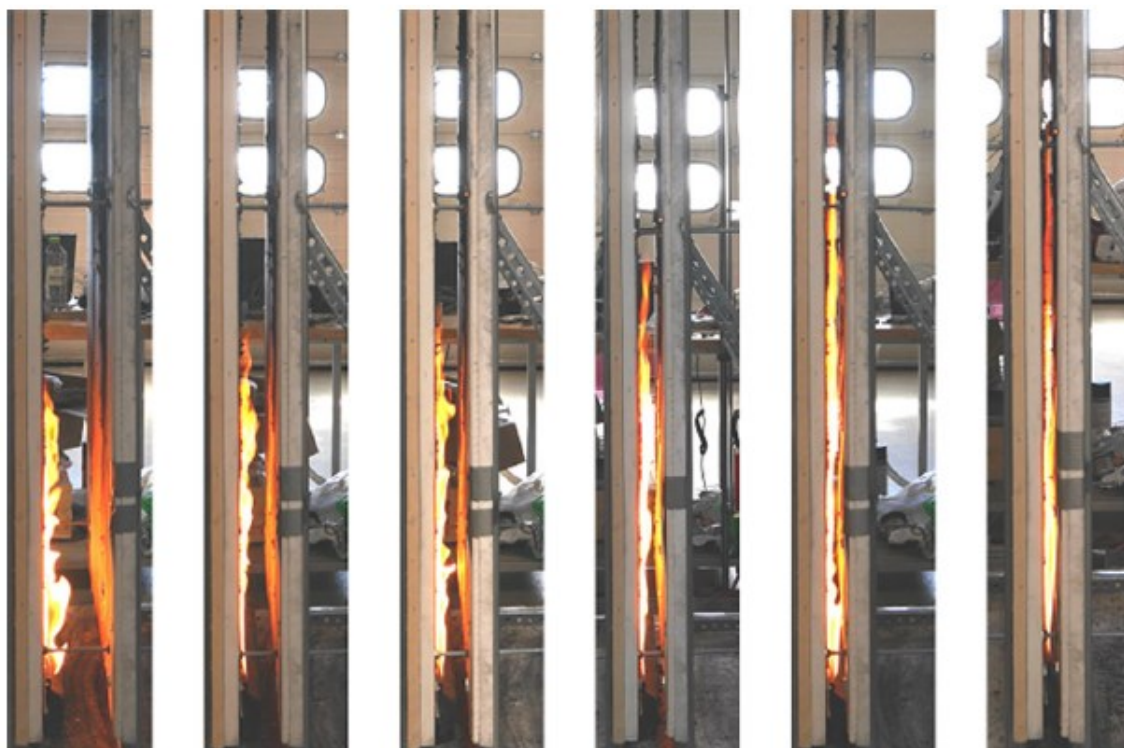
2.2.1 Vliv šířky dutiny

Za účelem zkoumání vlivu šířky větrané dutiny na chování požáru byla provedena studie v roce 2017. Účelem této studie bylo pozorování chování požáru a byla vizuálně hodnocena výška plamenů v dutině. Dále byl měřen dopadající tepelný tok na vnitřní povrch dutiny a rychlost proudění horkých plynů v dutině.

Bylo provedeno celkem 77 měření trvajících 3 minuty, ve kterých se měnily okrajové podmínky. Sestava se skládala ze dvou vápenosilikátových desek tloušťky 20 mm, které byly opatřeny vrstvou keramické izolace tloušťky 2 mm, aby deskám byla prodloužena životnost při provádění experimentů. Vápenosilikátové desky byly upevněny na ocelové nosné konstrukci. Sestava měla délku 0,8 m, výšku 1,8 m, a šířka dutiny, respektive vzdálenost vápenosilikátových desek od sebe byla proměnlivá, a to 20, 30, 40, 50, 60 a 100 mm. Ve vzniklé dutině mezi deskami byl umístěn propanový hořák délky 391 mm a šířky 8 mm, který byl umístěn v patě sestavy přiléhá k jedné z desek. V sérii experimentů byl hořáku měněn tepelný výkon, a to 16,5, 24,8, 32,3 a 40,4 kW/m, což vzhledem k délce hořáku je přibližně 6,4, 9,7, 12,6, 15,8 kW. Sledován byl vliv změny šířky dutiny a tepelného výkonu hořáku. V rámci studií byla zhotovena ještě varianta s jednou deskou bez vznikající mezilehlé dutiny. Pro sledování dopadajících tepelných toků na povrch desky bylo použito tenkostěnných radiometrů (TSC, z angl. thin skin calorimetr), které byly zhotoveny z termočlánků typu K připevněných k měděnému disku o průměru 40 mm a tloušťce 2 mm, následně s vrstvami izolace vláknité desky a keramické izolace s upevněním do překližkové

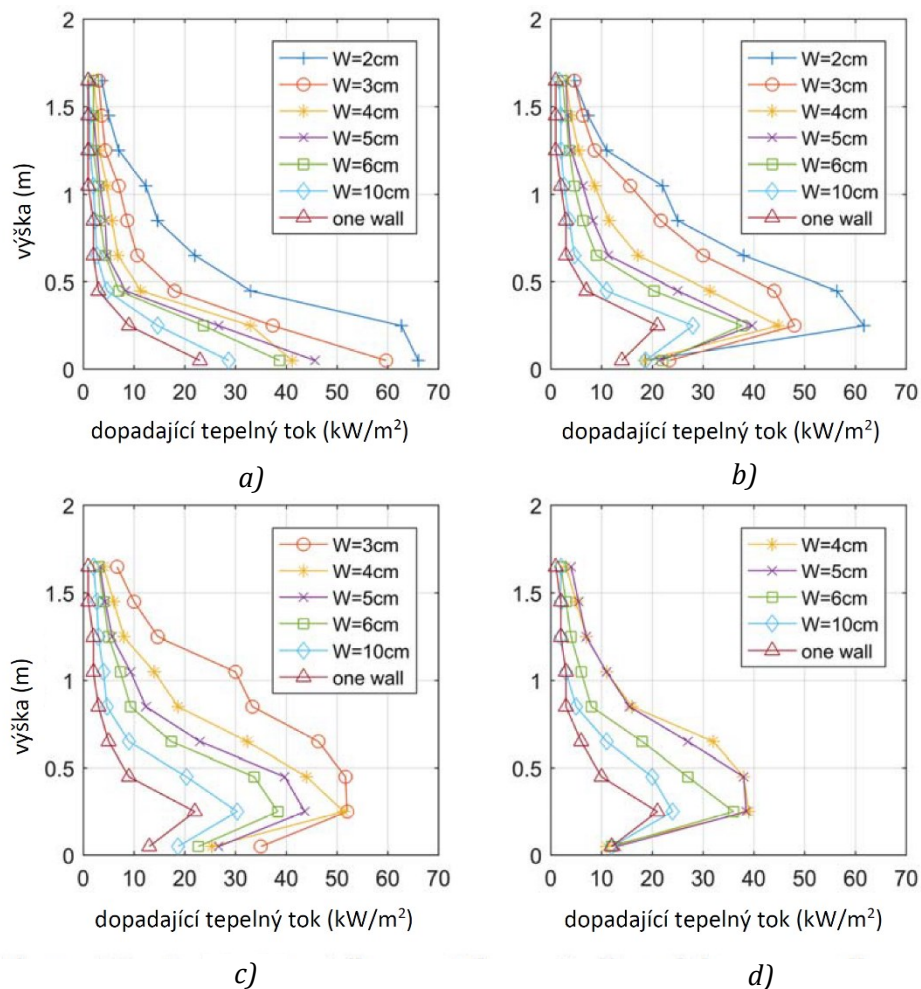
desky. Celkem bylo umístěno ve vzorku 45 výše zmíněných radiometrů, celkem v pěti sloupcích o devíti kalorimetrech v každém z nich. Vzhledem k jejich velkému počtu byla vyhodnocena data pouze ze sloupce umístěného uprostřed vzorku, tj. 9 radiometrů. Rychlost proudících plynů byla měřena Pitotovými sondami s průměrem 16 mm ve výšce 1,8 m, tzn. při vyústění proudících plynů z dutiny do volného prostředí. Měření bylo provedeno jen u několika experimentů s určitými šířkami z důvodu nedostatku těchto sond, za to celkem na 21 pozicích u každého z nich. Vizuální hodnocení výšky plamene během experimentu probíhalo pozorováním a rovněž pomocí snímků získaných kamerou vzdálenou přibližně dva metry z boku vzorku.

Uspořádání experimentu umožnilo obsáhnout plamen mezi deskami, nebyly zpozorovány žádné plameny dostávající se ven ze stran nebo z vrchu sestavy. Vizuálním pozorováním bylo zjištěno, že se zužující se dutinou se výrazně zvětšovala výška plamene, což je patrné na obr. 4. Obecně ale platilo, že největších výšek plamenů bylo dosahováno uprostřed dutiny vzhledem k umístění hořáku.



obr. 4: Fotodokumentace výšky plamene ve větrané dutině šířky: 100 mm, 60 mm, 50 mm, 40 mm, 30 mm, 20 mm [4]

Celkový tepelný tok byl dopočítáván z dat získaných konstrukcí tenkostěnných radiometrů. Z obr. 5 s vyobrazením grafů s výsledky experimentů je patrné, že nejvyšších dopadajících tepelných toků bylo dosahováno v užších stavebních dutinách při nižším výkonu hořáku. Autoři však upozorňují, že tyto hodnoty jsou aplikovatelné pouze při srovnání s experimentálním měřením.



obr. 5: Grafy dopadajících tepelných toků, legenda – w = šířka dutiny, one wall = bez účinku větrané dutiny, výkon hořáku: a) 16,5 kW/m, b) 24,8 kW/m, c) 32,3 kW/m, d) 40,4 kW/m

Závěrem této práce je konstatování faktu, že výsledky studie poskytují podklady pro validaci matematickofyzikálních modelů a zdůrazňují neopomenutelný vliv šířky dutiny na chování požáru, ať již v reálné situaci, nebo i při provádění dalších zkoušek a experimentů. V poslední řadě je řečeno, že pro důkladné prozkoumání chování požáru v dutině u fasádních systémů je důležité provádět další velké množství experimentů s důrazem na jednotlivé prvky a detaily fasádních systémů, které mohou mít neopomenutelný vliv na chování požáru v dutině.

2.2.2 Vliv požárních bariér

Požární bariérou je myšlen prvek, který má v dutině fasádního systému buďto úplně zabránit šíření účinků požáru, nebo alespoň jej omezit ve smyslu snížení rychlosti proudění horkých plynů, omezení tepelného toku a výšky plamene v dutině.

V roce 2021 byla provedena studie za účelem zkoumání vlivu rozmístění požárních bariér v kombinaci s hořlavým izolantem ve větrané fasádě. Tato studie úvodem značně

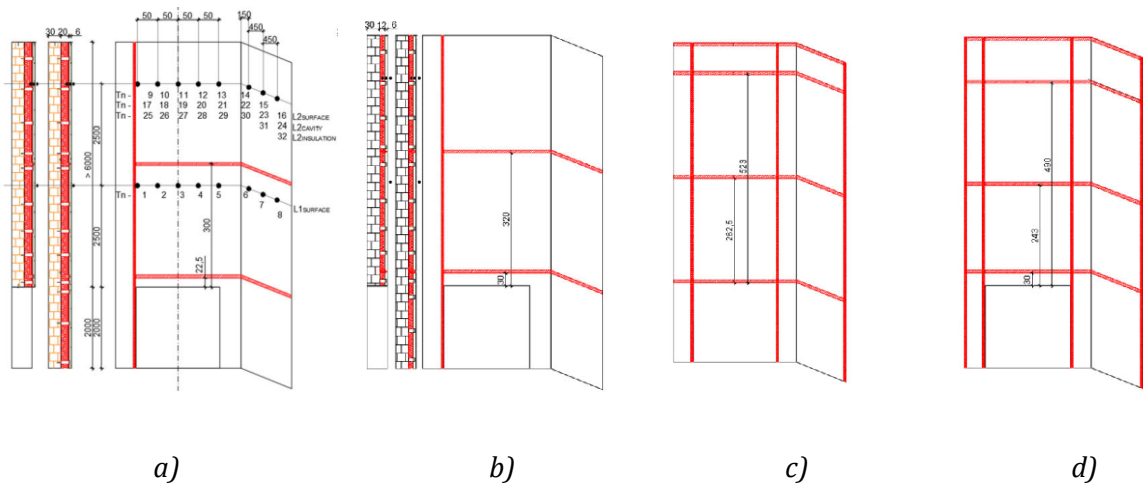
akcentuje, že absence požárních bariér ve větraných fasádních systémech společně v kombinaci s hořlavými izolanty a obkladem může mít fatální důsledky, jako například požár Grenfell Tower v Londýně. Pro zkoumání chování účinků požáru v dutině větraného fasádního systému byla zvolena zkouška dle britské technické normy BS 8414-1 [5], přičemž bylo provedeno celkem sedm experimentů. V každém experimentu byl vždy zvolen nehořlavý hliníkový kompozitní obklad třídy reakce na oheň A2 na kovovém roštu, ale experimenty se lišily použitým izolačním materiálem a počtem požárních bariér, a to jak svislých, tak vodorovných. Jako izolantu bylo použito minerální vlny, desek z polyisokyanurátu (PIR) a desek z fenolické pěny. Jako vodorovné požární bariéry byly vždy použity pásy minerální vlny v tloušťce izolantu s nalepenou intumescentní páskou s požární odolností EI 30, která v případě překročení dané teploty napěníla a vyplnila tloušťku větrané dutiny fasádního systému. Jako svislé požární bariéry byly použity pásy z minerální vlny vyplňující celou šíři dutiny včetně izolantu. Tab. 1 uvádí použití těchto materiálů v jednotlivých vzorcích.

tab. 1: Zkoumané vzorky v rámci experimentální studie [6]

Vzorek	Izolace	Obklad	Požární bariéry	
			Vodorovné	Svislé
1	Minerální vlna	nehořlavý hliníkový kompozitní obklad	Žádné	Žádné
2	Minerální vlna		2	1
3	PIR		Žádné	Žádné
4	PIR		2	1
5	PIR		4	3
6	Fenolická pěna		2	1
7	Fenolická pěna		4	4

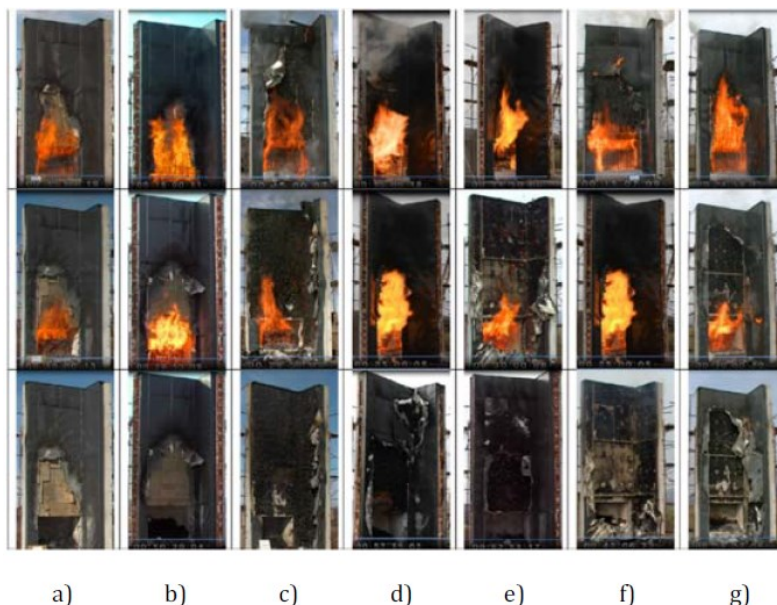
Rozmístění požárních bariér a termočlánků v jednotlivých vzorcích je patrné na obr. 6. Vyhodnocení vzorků bylo provedeno dle předpisu BR135 [7], který navazuje na zkušební metodiku BS 8414-1. K selhání fasádního systému došlo, pokud v jakémkoliv termočlánku umístěném ve výškové úrovni L2 (výškové úrovně viz obr. 6) došlo k překročení teploty 600 °C po dobu alespoň 30 sekund. Celkem každý experiment trval 60 minut nebo by rovněž měla být zkouška v tomto čase zastavena, pokud se plameny rozšíří mimo zkoušený vzorek. Ačkoliv pro mechanické vlastnosti a chování fasády v tomto smyslu při požáru nejsou stanovena žádná kritéria, tak jsou v rámci detailního zkoumání dodatečně řešena.

Výsledky zkoušek byly rozděleny do dvou časových etap, a to na výsledky po 15 minutách trvání zkoušek a po 60 minutách trvání zkoušek. Během prvních 15 minut byly pozorovány teploty, aby bylo možné konstatovat, zda zkoušený vzorek splnil kritéria nastavená dle BR 135. Druhá sekce (do 60 minut) zaznamenávala nejvyšší naměřené teploty během celého trvání zkoušek všech vzorků a případnou nutnost předčasného ukončení zkoušek dle kritérií definovaných BS 8414-1.



obr. 6: Rozmístění požárních bariér a termočlánků ve vzorku číslo: a) 2, b) 4 a 6, c) 5, d) 7 [6]

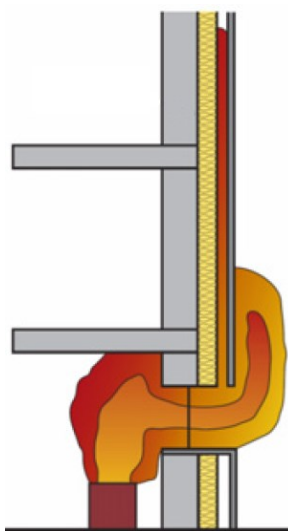
V případě první časové etapy byly v souladu s výše zmíněnými předpisy brány v potaz pouze výsledky z druhé výškové úrovně termočlánků (L2). Zkouškami bylo prokázáno, že nevhodně sestavené větrané fasádní systémy, konkrétně vzorky 3, 4, 6 nebyly schopné splnit požadavky a kritéria BR135, neboť termočlánky během 15 minut naměřily vysoké teploty, nebo došlo k vyšlehnutí plamenů mimo zkušební vzorek, konkrétně ve vrcholu vzorku. Se zpětným pohledem na přehledovou tab. 1 je patrné, že se jedná o vzorky s hořlavým izolantem a malým počtem požárních bariér. Dále ačkoliv vzorky 5 a 7 všem požadavkům vyhověly, je nutné zmínit, že se jedná o velmi nevhodné řešení, při kterém a rozmístění velkého počtu požárních bariér je jednak technicky složité, ale rovněž velmi problematické a neekonomické. Pro příklad je z praxe uveden problém při výstavbě, kdy by mezi dvě okna v rozdílných podlažích bylo nutné umístit 4 vodorovné požární bariéry.



obr. 7: Pohled na vzorky fasádních systémů v průběhu zkoušky v době 15, 30 a 60 min: a) vzorek 1, b) vzorek 2, c) vzorek 3, d) vzorek 4, e) vzorek 5, f) vzorek 6, g) vzorek 7 [6]

V případě etapy lze rovněž konstatovat, že vzorky s hořlavým izolantem jsou pro větrané fasádní systémy nevhodné, a to z důvodů, že nejsou schopny buď plnit požadovaná kritéria, nebo jsou případně technicky složité a problematické. Jako nejvhodnější se při dlouhodobém pozorování jeví fasádní systémy s izolantem z minerálního vlákna, neboť v těchto vzorcích byly obecně naměřeny nejnižší teploty vzhledem k počtu použitých požárních bariér. Na obr. 7 je patrný průběh zkoušek až do 60. minuty, tedy jak demonstrace rychlosti šíření požáru větranou fasádou, tak i její chování v průběhu zkoušky a její výsledná podoba. V závěru zmíněné studie je opět akcentováno, že požární bariéry mají podstatný vliv na chování požáru v dutině větraných fasádních systémů, přičemž je vždy extrémně důležité vzít v potaz vztah použitého izolantu a následně počtu požárních bariér a jejich rozmístění. A to zejména v oblasti okenních nadpraží tak, aby zmíněné bariéry bránily rychlému šíření plamenů a účinků požáru ve fasádním systému s větranou dutinou.

V rámci prvního mezinárodního semináře pro požární bezpečnost fasád pořádaného v Paříži roku 2013 byly představeny způsoby šíření požáru v dutině větraného fasádního systému, ale rovněž možnosti, jak zabránit šíření požáru ve větrané dutině pomocí požárních bariér. Článek [8] shrnuje scénáře šíření požáru výtahem z národních předpisů, příruček a požárních zkoušek, přičemž následně připomíná skutečnost, že výška plamenů v dutině je mnohonásobně vyšší než výška plamenů u stěny v exteriéru (obr. 8).



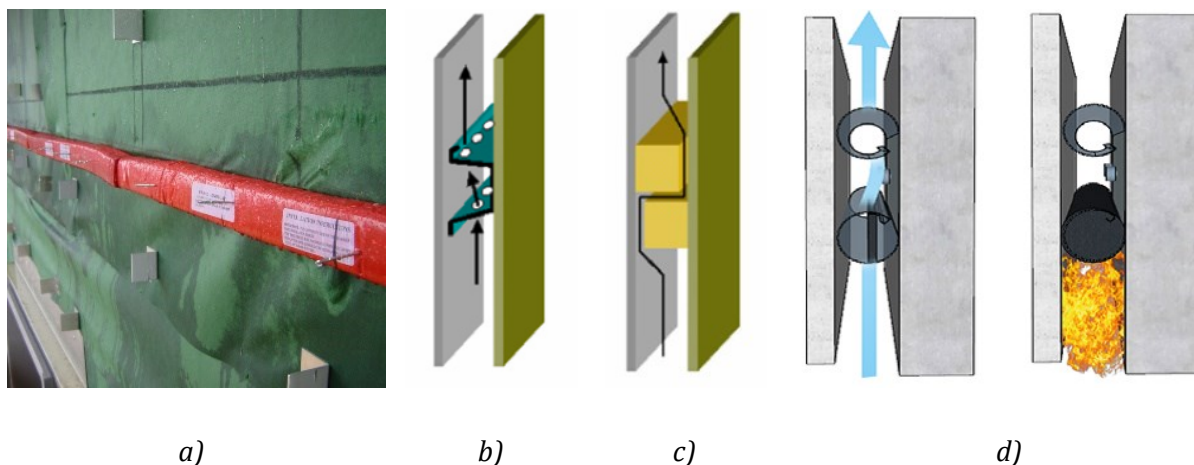
obr. 8: Vizualizace plamene vystupujícího z hořícího prostoru oknem s rozdílnou výškou plamene v dutině a před fasádou [8]

V článku [8] je věnován prostor možnému zamezení šíření požáru dutinou a rozdělení prostředků pro zabránění šíření požáru a plamenů na dvě kategorie, resp. prvky:

- pro přímé blokování plamene a odolné proti požáru:
 - labyrintové prvky s dostatečnou hloubkou a s reaktivním materiálem,
 - řada prvků tlumících účinky požáru a s reaktivním materiálem,
 - prvky v podobě drátěných rolí, zhášecí mezerou a s reaktivním materiálem,

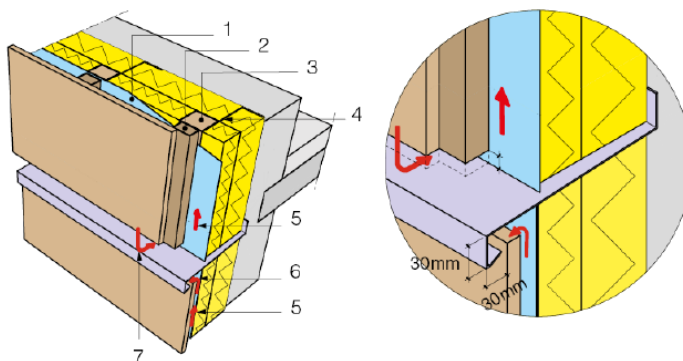
- zpomalující postup požáru:
 - o děrované/perforované plechy,
 - o řada prvků tlumících účinky požáru bez reaktivních materiálů.

U všech požárních bariér je nutné si uvědomit, že svou funkčností, tvarem a umístěním nesmí narušit fyzikální princip a funkčnost větraného fasádního systému za normální teploty mimo situaci požáru, tzn. nesmí omezit proudění vzduchu a odvětrávání vlhkosti. Na obr. 9 jsou předvedeny některé z těchto bariér.



obr. 9: Rozdílné požární bariéry pro fasádní systémy: a) intumescentní pás ve vzduchové dutině (během montáže), b) děrovaný plech, c) dřevěný labyrint, d) kovová síťovina s výplní intumescentní hmotou včetně ukázky její funkce [8]

V rámci zprávy [3] byl představen prvek, který přerušuje průběžnou větranou dutinu. Jedná se o nerezový plech umístěný ve spádu a zakončený okapničkou tak, aby byl zajištěn spolehlivý odvod srážkových vod, které zatečou do dutiny při náporu deště. Tento prvek prochází vnější spárou fasádního obkladu a je ukončena v dostatečné vzdálenosti za obkladem, což zajistí odvod vzduchu ven z dutiny mimo fasádní systém. Princip tohoto prvku, též zvaného jako dešťová chlopeč, je patrný na následujícím obrázku.



obr. 10: Rozdělení větrané dutiny pomocí bariéry v podobě nerezového plechu, legenda: 1 – difúzní fólie, 2, 3 a 4 nosné prvky fasádního obkladu, 5 – proudění vzduchu v dutině, 6 – vyústění mimo dutinu, 7 – přisávání vzduchu do dutiny [3]

2.2.3 Vliv hořlavých materiálů

Izolant

Tepelná izolace je prakticky nejdůležitějším prvkem fasádního systému obecně, neboť zajišťuje tepelnou stabilitu v interiéru objektu. Vzhledem ke stupňujícím se požadavkům energetické náročnosti budov rostou i požadavky tepelné techniky, které je nutné ovšem skloubit s mnohými dalšími, zejména ale s požadavky požární bezpečnosti staveb. Velmi jednoduše lze vhodný izolant posoudit pomocí pěti následujících parametrů:

- objemová hmotnost ρ ,
- součinitel tepelné vodivosti λ ,
- měrná tepelná kapacita c ,
- třída reakce na oheň,
- faktor difúzního odporu μ .

V současné době na českém trhu jsou dle publikace [9] nejčastěji používanými izolanty expandovaný polystyren (EPS) a minerální vlákno. Nelze však opomenout další běžně používané materiály jako extrudovaný polystyrén (XPS), polyuretanová pěna (PUR), polyisokyanurát (PIR), fenolická pěna, pěnové sklo, případně i izolanty na bázi přírodních materiálů (dřevovláknité desky, rozvlákněná celulóza, sláma, ovčí vlna). Pro porovnání jsou uvedeny vlastnosti vybraných izolantů v tab. 1.

tab. 2: Přehled tepelně technických vlastností nejpoužívanějších izolačních materiálů [10]

Izolace	ρ (kg/m ³)	λ (W/m·K)	c (J/kg·K)	TRO	μ (-)
Minerální vlna	40–200	0,033–0,040	800–1000	A1–A2	1–1,3
Skelná vlna	15–75	0,031–0,037	900–1000	A1–A2	1–1,1
EPS	15–25	0,031–0,038	1250	E	20–70
XPS	32–40	0,032–0,037	1450–1700	E	80–150
Fenolická pěna	40–160	0,018–0,024	1300–1400	B–C	35
PUR	15–45	0,022–0,040	1300–1450	E	30–170
PIR	30–45	10,18–0,028	1400–1500	B	55–150
Celulóza	30–80	0,037–0,042	1300–1600	B–C–E	1,7–30
Dřevovláknitá izolace	50–270	0,038–0,050	1,9–2,1	E	1–5
Sláma	50–150	0,038–0,067	600	/	/

Z hlediska požární bezpečnosti jsou ale velmi důležitými parametry výhřevnost, teplota vzplanutí, teplota vznícení a teplota žhnutí, které se nazývají požárně technické charakteristiky (dále jen PTCH). Tyto PTCH se běžně neobjevují v přímých požadavcích na fasádní systémy, nicméně je nutné vzít je v potaz při umístování hořlavých izolantů do fasádních systémů ve smyslu certifikace zateplovacích systémů požární zkouškou. Tyto parametry totiž mohou velmi výrazně ovlivnit chování při požáru jak u systémů ETICS, tak

zejména v dutině větraných fasádních systémů, kdy všechna uvolněná energie z hoření izolantu směřuje do dutiny, nikoliv do exteriéru. Pro ukázkou je v následující tabulce uvedeno pár hořlavých materiálů a jejich PTCH dle [11] a [12].

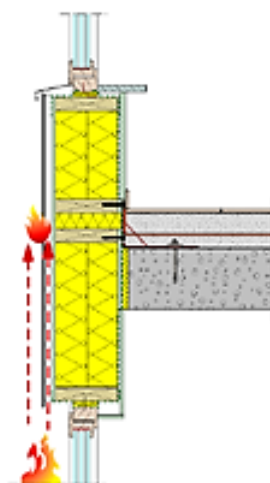
tab. 3: Výčet PTCH některých hořlavých izolačních materiálů [11] a [12]

Izolace	H (MJ/kg)	FIT (°C)	SIT (°C)	GT (°C)
EPS	39	350	450–500	-
PUR	25–27	380	480	-
Celulóza	15	350	-	320
Dřevovláknitá izolace	16–18	370	435	n

Obklad

Vnější plášť plní více funkcí najednou, proto musí splňovat četná kritéria, jako např. estetické, konstrukčně statické a tepelně technické, ale také kritérium požární bezpečnosti. V současné době je na trhu nepřeborné množství stavebních výrobků, které se běžně používají jakožto fasádní obklad. Jedná se o dílce velikosti v řádu desítek centimetrů až jednotek metrů s různým způsobem kotvení do nosné konstrukce, buďto dřevěného nebo kovového roštu. Mezi nejčastěji používané obkladové materiály patří stavební výrobky na bázi dřeva, keramiky, silikátu, kovu a plastu [1].

Otázkou v případě požáru jsou opět parametry stejné jako u izolace, jedná-li se o hořlavý obklad. Jde tedy o výhřevnost, objemovou hmotnost, a teplotu vzplanutí daného výrobku a rychlost šíření požáru po povrchu [13]. Většinou z projekčního hlediska normy či předpisy stanoví požadovanou třídu na oheň včetně doplňující klasifikace tvorby kouře a odkapávání a nepožadují výše zmíněné vlastnosti. Opět je ale důležité je všechny zvážit s rozmyšlením, jaká rizika daný výrobek představuje, neboť energie v podobě tepla může být uvolněná do dutiny, nebo také hořlavý obklad může dál šířit požár po svém povrchu exteriérem, i když bude dutina ucpaná požární bariérou (obr. 11).



obr. 11: Schematické znázornění šíření požáru pod obkladem dutinou a po povrchu obkladu [3]

Queenslandská univerzita v Austrálii sestavila komplexní databázi obkladových materiálů [14] na základě jejich složení a hořlavosti jednotlivých složek, které lze použít k provádění analýz rizik. Tato databáze je určena k tomu, aby poskytla relevantní data k provedení analýzy rizik, a aby požárně bezpečnostní inženýr či technik mohl následně posoudit bezpečnost návrhu daného fasádního systému ve smyslu použití celého souboru, resp. skladby celého fasádního systému, nikoliv obkladu samotného [14]. V rámci obkladových materiálů se tato knihovna výrazně specializuje na hliníkové kompozitní panely s jádrem z PE a případně i s retardéry hoření, přičemž pro zajímavost v tab. 4 jsou porovnána získaná technická data dvou těchto rozdílných obkladů z webu knihovny¹, jeden bez retardérů hoření (ACP03), druhý s nimi (ACP34).

tab. 4: Porovnání vybraných PTCH kompozitních obkladů s retardéry a bez nich [14]

Identifikační označení obkladu	ACP03	ACP34
Množství PE ve výplni (%)	99	32
Množství jiných složek, tedy retardéry hoření aj. (%)	1	68
Hrubé spalné teplo (kJ/g)	46,62	18,09
Kritický tepelný tok pro zapálení vzorku (kW/m ²)	17,2	16,4
FIT (°C)	398	388

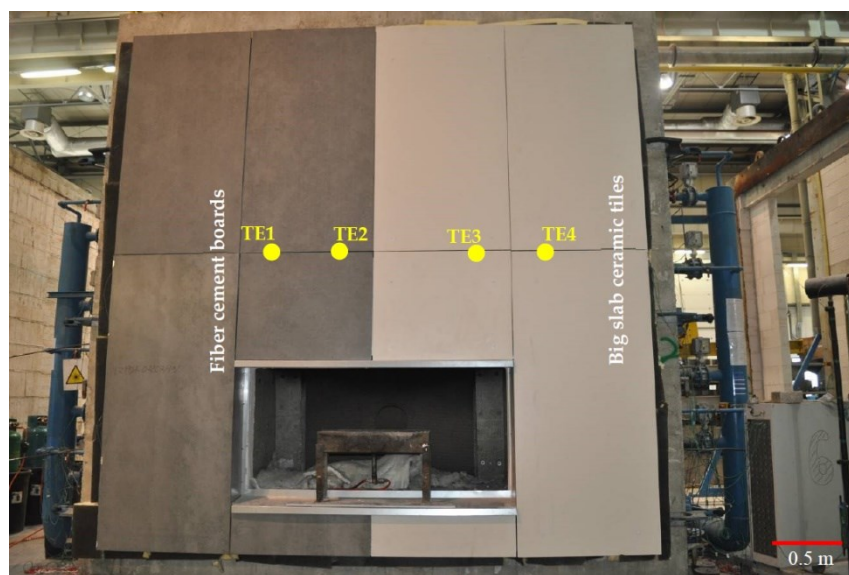
V případě požáru obklady obecně, včetně nosných roštů, představují riziko z hlediska destrukce, tedy odpadávání částí fasádního systému, další šíření požáru těmito troskami, případně i zranění unikajících či zasahujících osob.

2.2.4 Destrukce fasád

Se současně používaným obkladovým materiálem a jeho kotvením v rámci fasádních systémů se naskytá otázka, jak se tyto prvky chovají při situaci za požáru. Pokud je bráno v potaz, že se mohou ve fasádním systému vyskytovat hořlavé prvky, a to v souladu s platnými normami, je pravděpodobné, že tyto prvky budou za průběhu požáru buďto odkapávat nebo odpadávat v důsledku selhání jak celistvosti prvku, tak ale i jeho kotvení. Za případu, že se ve větraném fasádním systému budou vyskytovat výhradně prvky nehořlavé, je i tak nutné vzít v potaz možný kolaps buďto nosných prvků obkladu nebo obkladu samotného vlivem účinku požáru. Nevhodně zvolený obklad či jeho kotvení může představovat nejen riziko rychlejšího šíření požáru, ale i potenciální ohrožení unikajících lidí a zasahujících jednotek.

¹ Knihovna obkladových materiálů viz web: <https://claddingmaterialslibrary.com>.

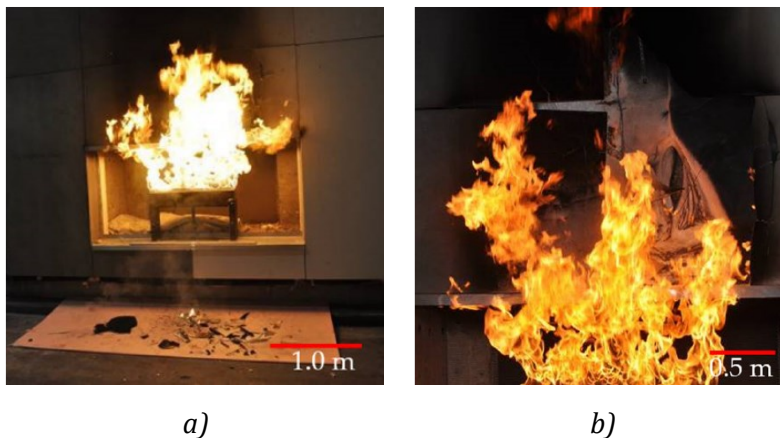
Této problematice se věnovala studie [15] se zaměřením na zkoumání modelů destrukce větraných fasád. Pro zkoumání byl zhotoven experimentální vzorek větraného fasádního systému, jehož velikost se řídila podle velkorozměrových zkoušek. Experimentální vzorek sestával z dřevěného nosného rámu s výplní minerální izolací a opláštění deskami sádrokartonu. Experiment se věnoval zkoumání dvou vzorků fasádního obkladu, prvním z nich byly cementovláknité desky, druhým velkoformátové keramické desky. Nosná substruktura obkladu byla provedena z hliníkového roštu L průřezu s rozměry 60 x 40 x 2 mm a byla přišroubována k ocelovým konzolám. Obkladové cementové vláknité desky byly tloušťky 8 mm a objemové hmotnosti 1700 kg/m³, zatímco velkoformátové keramické desky byly tloušťky 5,6 mm a objemové hmotnosti 2855 kg/m³. Vzdálenosti mezi jednotlivými deskami byla 8 mm. Celkové rozměry zkušební sestavy byly 3950 x 3950 mm, větraná dutina 38 mm, velikost otvoru, resp. spalovací komory, 2000 x 1000 mm. Na každé polovině vzorku byly zvlášť použity zmíněné typy obkladů. Ve spalovací komoře, která má představovat okenní otvor požárního úseku, byl umístěn pískový propanový hořák, který měl dle autory vybrané [16] publikace napodobovat výkon požáru předepsaného zkušební metodikou LEPİR 2. Pro měření teplot v blízkosti obkladu byly použity čtyři termočlánky umístěné přímo do dilatační spáry mezi obkladem. Nejen polohu, ale rovněž i opláštění zkušební vzorku dvěma rozdílnými materiály ukazuje obr. 12.



obr. 12: Zkušební sestava pro velkorozměrovou požární zkoušku a s vyznačením polohy termočlánků a označením rozmístění fasádního obkladu, na levé straně cementovláknité desky, na pravé straně velkorozměrové keramické desky [15]

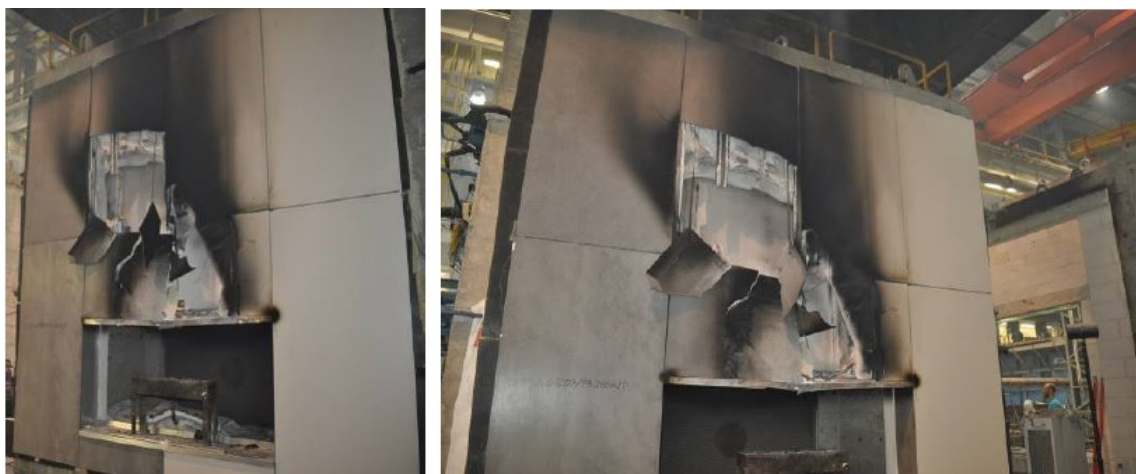
V prvních pěti minutách experimentu nebylo pozorováno žádné odpadávání či jakákoliv jiná výraznější deformace fasádního obkladu. V následující, tedy 6. minutě, začaly odpadávat části velkorozměrové keramické desky těsně nad spalovací komorou, přesněji v místě, kde byla nejvíce tepelně namáhána (obr. 13). V 11. minutě se začaly značně deformovat cementovláknité desky, což je patrné na obr. 13. Ve 20. minutě ustala jakákoliv

výraznější deformace velkorozměrových keramických desek s tím faktem, že byly poničeny pouze v místech, kde bylo teplotní namáhání nejvyšší, a to pouze v počáteční fázi zkoušky.



obr. 13: Pohled na větraný fasádní systém v průběhu experimentu: a) v 6. minutě s patrnými odpadnušími částmi obkladu, b) v 7. minutě na deformaci fasádního obkladu nad spalovací komorou [15]

Charakter porušení jednotlivých materiálů je daný především jejich vlastnostmi a strukturou, tedy že keramické desky s uniformní strukturou v průběhu zkoušky praskaly a odpadávaly z nich kusy různých velikostí. Oproti keramickým deskám cementovláknité desky vlivem vysokých teplot deplanovaly, ale držely celistvé v počáteční fázi experimentu díky vláknům a jejich dobrým tahovým vlastnostem. Pouze při absolutním porušení vláken v pozdějších minutách experimentu došlo k odpadávání poměrně velkých kusů těchto desek. Nejvyšší hmotnost odpadnušího kusu byla 1,15 kg a jednalo se o část keramické desky z počáteční fáze zkoušky. Dále vlivem vysokých teplot došlo k poškození hliníkového roštu přímo nad spalovací komorou do výšky 1660 mm a roztavení minerální (skelné) izolace do výšky 1440 mm nad spalovací komorou (obr. 14).



obr. 14: Pohled na zkušební vzorek větrané fasády po požáru [15]

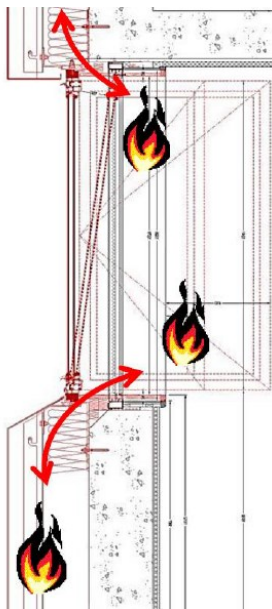
Co se týče teplot u obkladů, tak v případě termočlánků TE1 a TE2 byly naměřeny v průběhu zkoušky nižší teploty než u termočlánků TE3 a TE4. Toto bylo dáno zejména tím,

že cementovláknité desky se v průběhu zkoušek výrazně poškodily a umožnily přisávání vzduchu zvenčí dutiny, a to poměrně velkými plochami. V případě keramických desek i přes odštěpení několika kusů byla poměrně zachována celistvost a v dutině byly termočlánky TE3, TE4 naměřeny teploty vyšší. U cementovláknitých desek byla naměřena nejvyšší teplota 735° termočlánkem TE2, u keramických desek bylo termočlánkem TE3 naměřeno 863 °C. Závěrem je konstatováno, že problému destrukce vnějšího pláště budovy by měla být věnována značná pozornost, neboť se stále jedná o poměrně neprobádanou oblast. Dále je poukázáno na značnou deformaci cementovláknitých desek v průběhu zkoušek představující značné riziko při požáru kvůli odpadávání rozměrných částí.

2.2.5 Přidružená rizika větraných fasádních systémů

Předsazená montáž oken

Předsazená montáž oken představuje takový způsob montáže, kdy se celé okno osadí do zateplovací vrstvy a nestýká se s nosnou konstrukcí obvodové stěny. Tento způsob montáže přináší řadu výhod týkajících se zejména tepelné techniky, neboť se minimalizuje vznik tepelných mostů a omezí se riziko kondenzace, tedy rosení oken. Také okno propouští více světla, neboť není zasazené do takové hloubky jako při běžné montáži. Nevýhodou je fakt, že taková montáž je finančně náročnější a lze ji použít pouze v případě, že se provádí zateplovací systém.



obr. 15: Schéma možného rizika šíření požáru spárou mezi předsazeným oknem a stěnou [1]

Naskýtá se rovněž otázka, zda u vyšších objektů, který je tvořen více požárními úseky, je taková montáž vhodná, a to především u větraných fasádních systémů. Příspěvek v rámci konference o požární bezpečnosti fasád [17] rekonstruoval požár londýnské Grenfell Tower experimenty a numerickými modely, přičemž pozornost věnoval i šíření požáru mezi

požárními úseky vlivem kolapsu okenních otvorů v důsledku namáhání vysokými teplotami. Okenní výplně kolabovaly přibližně v 750. sekundě od počátku tepelného namáhání, a to nejen proto, že byly namáhány požárem zvenčí, ale rovněž i spárou mezi okenním rámem a konstrukcí obvodové stěny, kde se rychle vytavila hořlavá izolace a došlo k plnému otevření spáry a proudění horkých plynů (obr. 15). Tomuto detailu v obdobných případech je nutné věnovat značnou pozornost, řádně jej utěsnit takovým způsobem, aby předsazená montáž oken neztrácela své výhody a zároveň spára mezi oknem a obvodovou stěnou nemohla šířit požár či působit dodatečné tepelné namáhání okenních rámu či výplně. O vhodnosti předsazené montáže by mělo být rozhodnuto požární zkouškou celého fasádního systému umožňující umístění otvoru nad spalovací komorou, a tedy i zkoumání chování účinků požáru v jeho oblasti.

Žhnutí

Žhnutí materiálu je definováno jako hoření materiálu v pevném skupenství bez plamene, avšak s vyzařováním ze zóny hoření. Ke žhnutí dochází při závěrečné fázi hoření, kdy plamenné hoření ztrácí na intenzitě a postupně přechází do stádia žhnutí [18]. Teplotu žhnutí lze definovat jako nejnižší teplotu vzduchu, při které se iniciuje bezplamenné hoření daného materiálu. Je nutné si uvědomit, že dochází-li u materiálu ke žhnutí při teplotách pod hodnotou teploty vzplanutí nebo teploty vznícení, existuje jisté riziko, že materiál ve stádiu žhnutí se může rozhořet plamenem při zlepšených podmínkách přístupu kyslíku, a nebo jako žhnoucí může působit jako iniciátor hoření snadněji zapalitelného materiálu. Žhnutí, jinak také zvané souvislé doutnání, je dle platné metodiky zkoušení ČSN EN 16733 nejčastěji pozorováno na dřevitých a celulózových materiálech, avšak i některých plastech [19].

V praktickém hledisku to znamená, že žhnutí představuje riziko skrytého ohniska požáru v tom případě, že může dojít k jeho zahoření, pokud je u daného materiálu dosaženo teploty žhnutí. Jedná se například o nedokonale uhašený materiál nebo nehořící přímým plamenem, který je však schopen zachovat velké množství energie a teploty tak, že u něho může dojít ke žhnutí a za zlepšených podmínek přístupu kyslíku se může opětovně rozhořet. Toto riziko představují především dřevěné prvky ve fasádním systému, kterými může být obklad a rošt, případně i dřevovláknité izolace, dále ale také některé ze zmíněných plastů, pro příklad PIR a PUR izolant.

Obtížné hašení

Závěrem je nutné zmínit, že pokud dojde k šíření požáru dutinou fasádního systému, je enormně obtížné jej potlačit, neboť obklad větraného fasádního systému, pokud nedojde k jeho kompletnímu porušení a kolapsu, představuje bariéru pro běžné prostředky hasební techniky. Proud požární vody se o obklad tříští, ta po něm stéká a nemůže efektivně ochlazovat prostor dutiny za obkladem. Pro příklad je opětovně využito požáru Grenfell Tower, neboť hasební práce, ačkoliv jejich složitost byla umocněna výškou stavby

a komplikacemi s dodáváním potřebného množství požární vody, probíhaly celkem 60 hodin.

2.3 Rešerše současného stavu vývoje jednotné evropské velkorozměrové zkušební metodiky šíření požáru po fasádě

V současné době se řídí zkušební metodika šíření požáru po fasádě velkým množstvím odlišných předpisů, které mají rozdílná kritéria pro ověřování vlastností a klasifikaci fasádních systémů, a to od zkoušek v malém měřítku až po velkorozměrové zkoušky. To má v důsledku negativní vliv v rámci mezinárodního obchodu nejen se stavebními výrobky, ale i celými fasádními systémy. Zpráva [20] konstatující tyto skutečnosti představuje velké množství zkušební metodiky v jednotlivých státech EU, které je pro názornost uvedeno v tab. 1. Zkoušky včetně možností jejich aplikace jsou popsány v [1], proto jim zde není věnován další prostor.

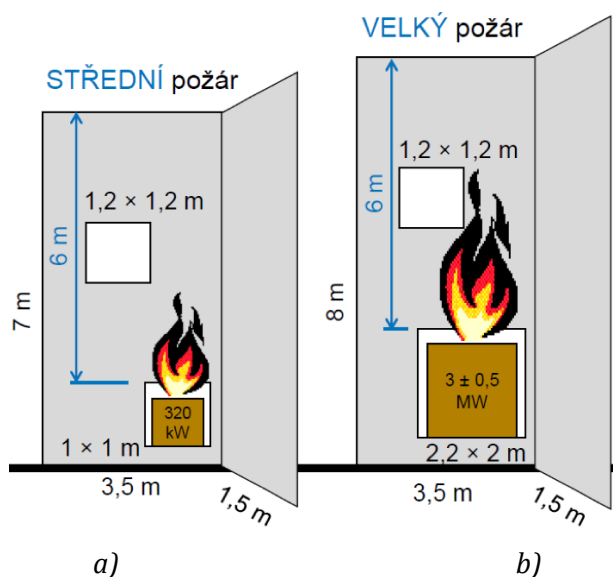
tab. 5: Zkušební metodiky v zemích Evropy [20]

Země	Zkouška
Polsko	PN-B02867:2013
Británie a Irsko	BS 8414-1:2015, BS 8414-2:2015
Švýcarsko	Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungs- systeme
Švýcarsko, Německo	DIN 4102-20
Německo	Technical regulation A 2.2.1.5
Francie	LEPIR 2
Maďarsko	MSZ 14800- 6:2009 Fire resistance tests. Part 6: Fire propagation test for building façades
Rakousko, Švýcarsko	ÖNORM B 3800-5
Švédsko, Norsko Dánsko	SP Fire 105
Finsko	Tekniikka opastaa 16 (Engineering guidance 16)
Česko a Slovensko	ISO 13785-2

Nyní probíhá vývoj jednotné zkušební metodiky požárních zkoušek fasádních systémů pod záštitou Evropské komise, přičemž projekt byl zahájen 12. 3. 2020 a má trvat celkem 24 měsíců. Tato metodika má za cíl poskytnout jednotný a klasifikační předpis, kterým bude možné stanovit vlastnosti fasádního systému z hlediska požární bezpečnosti. Metodika má nabídnout dvě varianty zkoušení fasádních systémů. První variantou je zkouška velkého rozměru vycházející se středním účinkem požáru z německé DIN 4102-20, druhou variantou

je velkorozměrová zkouška se silným účinkem požáru vycházejí z britské BS 8414–1. Tyto zkoušky jsou schematicky vyobrazeny na obr. 16, dalšímu popisu těchto zkoušek není věnován prostor, neboť jsou dostatečně popsány v [1], [2].

Dle časového plánu s drobným zpožděním (s ohledem na trvající pandemii onemocnění COVID-19) již byly provedeny zkoušky dřevěných hranic představující střední účinek požáru, tak i silný účinek požáru a provedení obou velkorozměrových zkoušek včetně publikování naměřených výsledků. Tyto zkoušky byly provedeny s intertními fasádami (tj. bez fasádního systému a jakýchkoliv povrchových úprav), ve vnitřním laboratorním prostředí a každá celkem 6 krát, a to proto, aby bylo možné řádně zkoumat opakovatelnost, reprodukovatelnost, vliv vlhkosti dřeva, velikosti dřevěných hranolů ve smyslu rozměrových tolerancí, vliv rychlosti proudění okolního vzduchu a hloubky spalovací komory. Tyto zkoušky jsou prováděny v této podobě z důvodu, aby bylo možné v budoucnu řádně zadefinovat okrajové podmínky pro uskutečňování zkoušek. Výsledky včetně hodnocení v podobě zprávy a excelových dat jsou dostupné z webu projektu². Průběžně je v rámci tohoto projektu také věnován prostor pro kladení dotazů od zainteresovaných stran, případně i dalších jiných připomínek jakoukoliv členskou laboratoří.

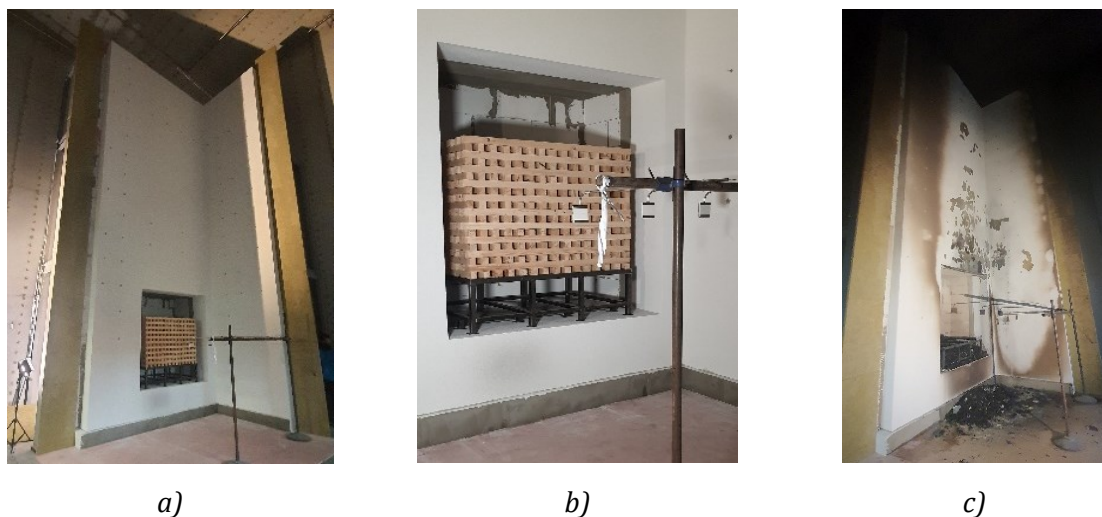


obr. 16: Schéma zkušebních sestav pro velkorozměrové zkoušky šíření požáru po fasádě:
a) se středním účinkem požáru, b) s velkým účinkem požáru [21]

Dne 9. 12. 2021 proběhl webinář pod záštitou evropského týmu komunity požární bezpečnosti, kde byl prezentován současný stav projektu a budoucí práce, případný další legislativní proces. Na současný stav bude navázáno dalšími zkouškami fasády, kdy bude aplikován hořlavý fasádní systém a druhý okenní otvor (obr. 16), dodatečně bude prováděn

² Webová stránka řečeného projektu: <https://www.ri.se/en/what-we-do/projects/finalisation-of-the-european-approach-to-assess-the-fire-performance-of-facades>.

i test s inertní fasádou ve venkovním prostředí pro zjištění, zda je možné fasádní testy provádět v exteriéru bez výrazného ovlivnění výsledků povětrnostními podmínkami. Projekt by měl být dokončen celkově se zpožděním půl roku, tedy v září roku 2022 (oproti původnímu plánu – březen 2022). Byl zde popsán i pravděpodobný následný legislativní vývoj, kdy po dokončení zmíněného projektu je nutné podat žádost a evropská komise musí iniciovat standardizační požadavek na testování fasád, což zabere přibližně 2–3 roky. Následně, pokud bude standardizační požadavek přijat evropským výborem pro normalizaci, by měla být vyvinuta jednotná metodika na základě získaných poznatků ze zmíněného projektu. Odhaduje se, že tato fáze rovněž zabere 2–3 roky. Poté, kolem let 2027–2028 by měly začít práce zabývající se zpracováním EN norem vyplívajících z vyvinuté metodiky. Teoretická odhadovaná doba celého zpracování a vydání jednotné zkušební metodiky pro země EU je tedy přibližně 10–15 let od počátku projektu (roku 2020).



obr. 17: První velkorozměrová zkouška ETICS dle nově připravované metodiky šíření požáru po fasádě
 a) před realizací zkoušky, b) detailní pohled na spalovací komoru s dřevěnou hranicí,
 c) po realizaci zkoušky a dohašení

Česká republika, ani žádná tuzemská výzkumná střediska, nejsou do tohoto projektu nejsou zahrnuta. Je však počítáno s tím, že navrhovaná metodika po jejím schválení a vydání bude přijata i v České republice s národní přílohou. Dne 7. 10. 2021 se v požární zkušebně PAVUS ve Veselí nad Lužnicí uskutečnila první požární zkouška fasádního systému dle vyvíjené velkorozměrové zkušební metodiky s účinkem silného požáru, a to pro ETICS s izolantem z EPS tl. 200 mm a s vloženým pruhem minerální vaty s přesahem 500 mm za líc ostění a u vnitřního koutu. Celá zkušební sestava před požárem a po požáru je patrná na obr. 17. Tato zkouška byla realizována Cechem pro zateplování budov za účelem nahrazení tzv. požárního pruhu z minerální vlny výšky 900 mm vyžadovaným ČSN 73 0810 pruhem mnohem užším, výšky 200 mm.

2.4 Normativní požární požadavky v ČR a požadavky v zahraničí

2.4.1 Česká republika

V souboru norem ČSN 73 08xx je oblasti větraných fasádních systému věnováno ne příliš mnoho prostoru, přičemž jej řeší dvě kmenové normy, a to pro nevýrobní objekty ČSN 73 0802 [22] a pro výrobní objekty ČSN 73 0804 [23], dále ale zejména norma o společných ustanoveních ČSN 73 0810 [24]. Poslední ze zmíněných norem věnuje pozornost především ETICSům.

Nejprve je nutné nahlédnout do ČSN 73 0810, a následně do dvou kmenových norem, které dodatečně upřesňují a upravují specifické požadavky. ČSN 73 0810 pracuje s požární výškou objektů, podle které uplatňuje požárně technické požadavky co se týče plochy fasády. Jedná se o objekty:

- jednopodlažní s požární výškou $h = 0,0$ m,
- s požární výškou $h \leq 12,0$ m,
- s požární výškou $12,0 \leq h \leq 22,5$ m,
- s požární výškou $> 22,5$ m.

V článku 3.1.3.4 ČSN 73 0810 je použito termínu nekontaktní spojení tepelněizolačního materiálu s povrchem konstrukce, kterým ovšem není myšlena větraná fasáda jako taková, ale vztahuje se na problematiku ETICS. Tento článek vyžaduje materiály TRO A1/A2, pokud nelze docílit kontaktního spojení s podkladní konstrukcí, což ovšem může vést k chybné interpretaci při aplikaci těchto požadavků na větrané fasádní systémy.

Článek 3.2.3.1 ve vztahu k větraným fasádním systémům umožňuje umístit hořlavý fasádní obklad z výrobků nejhůře TRO B na obvodovou konstrukci DP1 s odpovídající požární odolností, pokud jsou splněny následující podmínky:

- stěna není v požárně nebezpečném prostoru jiného objektu;
- stěna je s touto vnější povrchovou úpravou v objektu s požární výškou $12 < h \leq 22,5$ m;
- index šíření plamene je $i_s = 0$ mm/min;
- nad terénem v úrovni založení a v místech okenních a jiných otvorů, musí být zkouškou podle ČSN ISO 13785-1 [11] prokázáno, že v době do 30 minut nedoje k šíření plamene po vnějším povrchu, nebo po tepelné izolaci obvodové stěny přes úroveň 0,5 m od spodní hrany zkušební vzorku, a to při tepelném namáhání 100 kW po dobu 30 minut;

- případné provětrávací mezery v povrchových vrstvách, popř. jiné úpravy, nesmí umožnit šíření požáru (horkých plynů apod.) mimo hranici požárního úseku na obvodové stěně.

Tento článek je dále doplněn třemi poznámkami. První poznámka dodává, že obvodové stěny prováděné dle výše zmíněných podmínek mohou tvořit požární pásy, mohou být použity v požárně nebezpečném prostoru téhož objektu, nemění konstrukční systém a není nutné posuzovat odpadávání hořících částí. Poznámka 2 doplňuje, že obvodové stěny v objektech do požární výšky $h \leq 12,0$ m mohou mít na povrchu i jiné výrobky při dodržení ustanovení ostatních norem požární bezpečnosti staveb. Poznámka 3 přidává informaci, že možnost šíření požáru podle poslední odrážky čl. 3.2.3.1 (viz výše) může být eliminována přepážkami třídy reakce na oheň A1 nebo A2.

Článek 8.4.1 v ČSN 73 0802, resp. 9.4.4 ČSN 73 0804 se věnuje obvodovým stěnám a uvádí, že na rozhraní požárních úseků musí být styk požárních stropů a obvodových (popř. požárních) stěn utěsněn a vykazovat stejnou požární odolnost jako vlastní požárně dělicí konstrukce, včetně třídy reakce na oheň použitých stavebních výrobků. Dále je v článku řečeno, že pokud jsou navrženy zdvojené obvodové stěny (tedy i větrané fasádní systémy), jejichž utěsnění je provedeno jen k vnitřní obvodové stěně, musí být samostatně posouzeno riziko šíření požáru a zplodin hoření prostorem mezi vnitřní a vnější obvodovou stěnou, nicméně již není dále uvedeno jakým způsobem.

V článku 8.4.12 ČSN 73 0802, resp. 9.4.8 ČSN 73 0804 je uvedeno, že u objektů s požární výškou $h \leq 12,0$ m je možné provádět vnější obklady obvodových stěn z výrobků třídy reakce na oheň C až E, a to bez ohledu na požárně nebezpečné prostory požárních úseků téhož objektu. Jediným požadavkem je posouzení požární otevřenosti plochy takovéto fasády. Pokud jsou ovšem tyto stavební výrobky použity u objektů s požární výškou $> 12,0$ m, je nutné posoudit riziko rozšíření požáru na jiné požární úseky téhož objektu (např. souvislou vrstvou hořlavého výrobku nebo vzduchovou mezerou/větranou dutinou). Při posuzování je rozhodující průměrná hustota tepelného toku na povrchu ohrožených konstrukcí jiných požárních úseků, která musí být nižší než $18,5 \text{ kW/m}^2$. Obdobně jako u článku 8.4.1 vyvstává otázka, jak takovéto požadované posouzení provést, neboť norma neposkytuje žádnou příslušnou metodiku. Dodatečně u tohoto článku je ještě poznámka, která zakazuje provádět povrchy stěn z výrobků třídy reakce na oheň F.

Problémem článku 8.4.12 ČSN 73 0802, resp. článku 9.4.8 ČSN 73 0804 je, že není přesně definován termín „předsazené konstrukce“. Chybí vysvětlení, zda je myšlena pouze finální vrstva (obklad), nebo jestli se dá článek aplikovat na předsazené nosné rošty a hořlavé tepelné izolace. V praxi by tento článek mohl být chápán tak, že umožní výstavbu například dřevostavby s $h < 12,0$ m s větranou dutinou, hořlavým obkladem a hořlavou izolací. Jedinou podmínkou je splnění požadavků z hlediska požárně otevřených ploch dle článků zmíněných výše.

2.4.2 Slovenská republika

Při nahlédnutí do slovenských norem požární bezpečnosti staveb je nutné mít na paměti historii vývoje požárních norem obecně v době, kdy Česko a Slovensko tvořilo jednu republiku. Proto je možné v nich najít poměrně velikou podobnost či shodu s těmi českými, např. co se týče pojmů požární výška, konstrukční systém, druh konstrukční části DPx pro Českou republiku a Dx pro Slovenskou republiku.

Ve slovenských normách požární bezpečnosti staveb je větraným fasádním systémům věnováno ještě méně prostoru než v souboru norem ČSN 73 08xx . Konkrétně se jedná o článek 5.14 slovenské technické normy STN 920201-2 [25]. Tento článek jasně a stručně říká, že povrchové úpravy a exteriérové obklady obvodových stěn z vnější strany stavby mohou obsahovat jen materiály, komponenty a stavební výrobky s třídami reakce na oheň A1/A2, pokud:

- a) jsou v požárně nebezpečném prostoru;
- b) obvodové stěny tvoří ohraničující konstrukce chráněných únikových cest a jsou v nich neotvíratelné požární otvory;
- c) se jedná o obvodové stěny na vnějších schodištích, pavlačích, a jiných komunikacích stavby, které slouží jako částečně chráněné únikové cesty nebo jako chráněné únikové cesty;
- d) obvodové stěny tvoří požární stěny mezi stavbami;
- e) se zhotovují zespodu horizontálně vystupující, nebo ustupující konstrukce;
- f) jde o stavby s požární výškou $h > 22,5$ m;
- g) jde o stavby se smíšeným konstrukčním systémem;
- h) jde o povrchové úpravy nebo exteriérové obklady spojené s obvodovou stěnou nekontaktně (např. provětrávané fasády) na stavbách, které vyžadují požární pásy.

V závěru článku je řečeno, že uvedené požadavky pro povrchové úpravy a exteriérové obklady se uplatňují po celé výšce stavby.

2.4.3 Velká Británie

Ve Velké Británii je nutné se při projektování a realizování budov řídit právně závaznými předpisy zvanými Building Regulations 2010, v překladu stavební předpisy, s poslední aktualizací vydanou v roce 2019. Jedná se o zákonné nástroje, které mají za úkol zajistit správné provádění opatření technického charakteru dle příslušných právních předpisů či norem. Pro valnou většinu staveb je požadováno, aby byly v souladu s těmito dokumenty.

Vzhledem k řešenému tématu je nutné říci, že tyto dokumenty rozdělují relevantní budovy do dvou skupin, a to do skupiny obytné budovy [26] a skupiny tvořící jakékoliv ostatní budovy jiné než obytné [27]. V obou dokumentech je nicméně podobná struktura

a šíření požáru vnějškem budovy se věnuje požadavek B4: External fire spread, resp. sekce 10 v dokumentu pro obytné budovy [26] a sekce 12 [27] pro ostatní, které jsou však v obou dokumentech shodné. Tento fakt lze chápat obdobně jako pohled českých technických norem českých na řešenou problematiku, konkrétně ČSN 73 0802 a ČSN 73 0804, které definují stejné požadavky pro vnější povrchové úpravy obvodových stěn (viz kapitolu 2.4.1), přičemž se každá věnuje rozdílným objektům.

Úvodem je řečeno, že obvodové stěny budovy by měly být konstrukcí, která by neměla představovat riziko šíření požáru po svém povrchu, a že kapitola neřeší požární odolnost obvodových stěn. Požadavky na povrchové úpravy ve smyslu třídy reakce na oheň použitých materiálů řeší v dokumentu tabulka 10.1, která je zde přeložena a uvedena jako tab. 6.

tab. 6: Třída reakce na oheň vnějších povrchů obvodových stěn

Typ/účel budovy	Výška budovy	Méně než 1000 mm od příslušné hranice ⁽⁵⁾	1000 mm nebo více od příslušné hranice ⁽⁵⁾
„Příslušné budovy“ definované dle nařízení 7(4)		A2-s1,d0 ⁽¹⁾ nebo lepší	A2-s1,d0 ⁽¹⁾ nebo lepší
Shromažďovací a rekreace	Více jak 18 m	B-s3,d2 ⁽²⁾ nebo lepší	Od úrovně terénu do 18 m: C-s3, d2 ⁽³⁾ nebo lepší Od 18 m a výše: B-s3,d2 ⁽³⁾ nebo lepší
	18 m a méně	B-s3,d2 ⁽²⁾ nebo lepší	Do 10 m nad úrovní terénu: C-s3, d2 ⁽³⁾ nebo lepší Až 10 m nad střechou nebo jakoukoliv částí budovy, kam přístup veřejnost: C-s3, d2 ⁽³⁾ nebo lepší ⁽⁴⁾ Od 10m výšky a výše: bez požadavku
Jakékoliv jiné budovy	Více jak 18 m	B-s3,d2 ⁽²⁾ nebo lepší	Od úrovně terénu do 18 m: C-s3, d2 ⁽³⁾ nebo lepší Do 10 m nad úrovní terénu: C-s3, d2 ⁽³⁾ nebo lepší
	18 m a méně	B-s3,d2 ⁽²⁾ nebo lepší	Žádná ustanovení
<p>Poznámky:</p> <p>Kromě požadavků v této tabulce, budov s trvale obsazenými podlažími nad úrovní 18 m, by měly dále ještě splňovat požadavky uvedené v odstavci 10.6.</p> <p>Ve všech případech by měly být dodrženy rady uvedené v odstavci 10.4.</p> <p>(1) Omezení pro tyto budovy platí pro všechny materiály použité ve vnější stěně a specifikovaných přílohách (viz odstavce 10.9 a 10.12).</p> <p>(2) Profilovaný nebo plochý ocelový plech o tloušťce alespoň 0,5 mm s organickým povlakem o tloušťce ne větší jak 0,2 mm je přijatelný.</p> <p>(3) Přijatelné jsou také dřevěné obklady o tloušťce minimálně 9 mm.</p> <p>(4) 10 m se měří od horního povrchu střechy.</p>			

(5) Definice příslušné hranice viz odstavce následující za touto tabulkou.

Ke správnému pochopení tabulky uvedené výše je nutné se rovněž zaměřit na termíny a články, které v ní jsou uvedeny. Příslušnou hranicí v záhlaví tabulky je myšlena hranice podle článku 11.5, ke které daná stěna směřuje čelem. Tou může být jednou z následujících:

- a) hranice lokality;
- b) středová linie prostoru, kde další rozvoj je nepravděpodobný, jako je třeba silnice, železnice, kanál či řeka;
- c) předpokládaná pomyslná hranice mezi dvěma budovami ve stejné lokalitě, kde je splněna jedna z následujících podmínek
 - a. jedna nebo obě budovy jsou určeny pro „obytné“ nebo „shromažďovací a rekreační“ účely;
 - b. budovy budou provozovat nebo spravovat rozdílné organizace.

Příslušnými budovami uvedenými v nařízení 7(4) jsou takové budovy s patrem ve výškové úrovni 18 m a více, které:

- a) obsahují jeden nebo více bytů;
- b) obsahují instituci;
- c) obsahují místnost pro obytné účely (s výjimkou pokoje v hostelu, hotelu nebo penzionu).

Článek zmíněný v poznámce, tedy 10.6, uvádí, že v budovách s podlažím ve výškové úrovni 18 m nebo více by jakékoliv výrobky (izolace, jádra kovových kompozitních obkladů, sendvičové panely, okenní parapety) použité v konstrukci obvodové stěny měly být třídy reakce na oheň A2-s3, d2 nebo lepší. Tento požadavek se netýká zdvojených dutinových zděných či betonových stěn, pro které jsou specifikované požadavky v části B3, sekci 8.

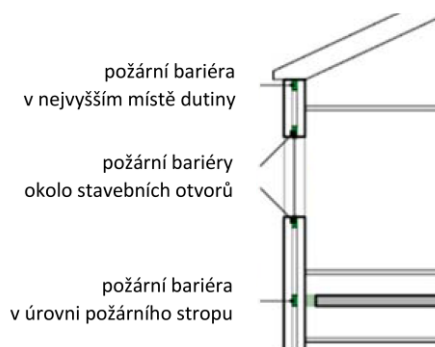
Článek 10.4 nabádá ke zvážení výběru vhodných materiálů včetně jejich množství a rozmístění bez ohledu na výšku nebo využití budovy pro použití na vnější povrch obvodových stěn, aby bylo sníženo riziko šíření požáru vnějškem přes stěnu.

Články 10.9 a 10.12 se odkazují na nařízení 7(2) a 7(3). První ze zmíněných nařízení říká, že s výhradou odstavce (3) se stavební práce provádí tak, aby materiály, které se stávají součástí obvodové stěny příslušné budovy, byly třídy reakce na oheň A1-s1, d0 nebo A1, a to dle klasifikace harmonizované normy BS EN 13501-1_2007+A1. Druhé nařízení 7(3) uděluje výjimky, kdy se neuplatňuje výše popsaný odstavec, resp. nařízení 7(2). Tyto požadavky se tedy nevztahují na:

- a) dutinové lišty při použití mezi dvěma vrstvami zdiva,
- b) jakákoli část střechy, která spadá do odstavce (iv) nařízení 2(6), pokud je tato část připojena k vnější stěně,

- c) zárubně a dveře,
- d) elektrická zařízení,
- e) použité izolační a vodotěsné materiály pod úrovní terénu,
- f) intumescentní a požární materiály,
- g) membrány,
- h) těsnění, upevňovací prvky, tmely, opěrné tyče,
- i) tepelně izolační materiály, kde je nutné tyto materiály uvažovat pro splnění tepelnětechnických požadavků tepelných mostů konstrukcí dle části L přílohy 1,
- j) okenní rámy a skla.

K dané problematice je vztaženo ještě několik článků, nicméně nejsou přímo zmíněny v tabulce 10.1 (zde tedy tab. 6), které zde budou stručně rozebrány. Zelené stěny by měly být řešeny podle dokumentu [28]. Dutiny fasádních systémů by měly být vybaveny požárními bariérami podle sekce 5 a 8. Řešení vyplývající z článků této sekce je patrné na obr. 18.



obr. 18: Rozmístění požárních bariér ve vztahu k fasádnímu systému dle Building Regulations 2010 [26] a [27]

Článek 10.13 řeší případy změny budov (obnova, rekonstrukce, změna užívání atp.) a klade důraz, že pokud se řešená budova stane relevantní budovou popsanou v nařízení 7(4), tak je nutné konstrukce obvodových stěn přezkoumat a zajistit, že budou obsahovat pouze materiály třídy reakce na oheň A2-s1, d0 nebo třídy A1, krom výjimek v nařízení 7(3), viz výše. Zbývající dva články sekce 10 řeší, že ustanovení 7 platí společně s požadavky B4, které zde byly popsány. První z nich, 10.14, uvádí, že pro budovy popsané v 7(4) je nutné vzít na zřetel jakýkoliv potenciální negativní dopad výrobků začleněných do a nebo na obvodové stěny a rozmístění těchto výrobků by mělo být pečlivě zváženo s ohledem na jejich počet, rozmístění, velikost a orientaci. Druhý z nich, 10.15, klade pozornost na specifické detaily fasádních systémů jako jsou například membrány, prvky přerušující tepelné mosty (podložky pod kotvy roštů fasádních systémů), okenní parapety apod.

Výše uvedený text byl zaměřen na dokument [26], nicméně požadavky oproti [27] se nijak nemění, jak bylo řečeno úvodem. V dokumentu [27] je navíc pouze jeden krátký článek, který podrobněji popisuje požadavky na dutiny a bariéry do nich umísťované. Z popsanych

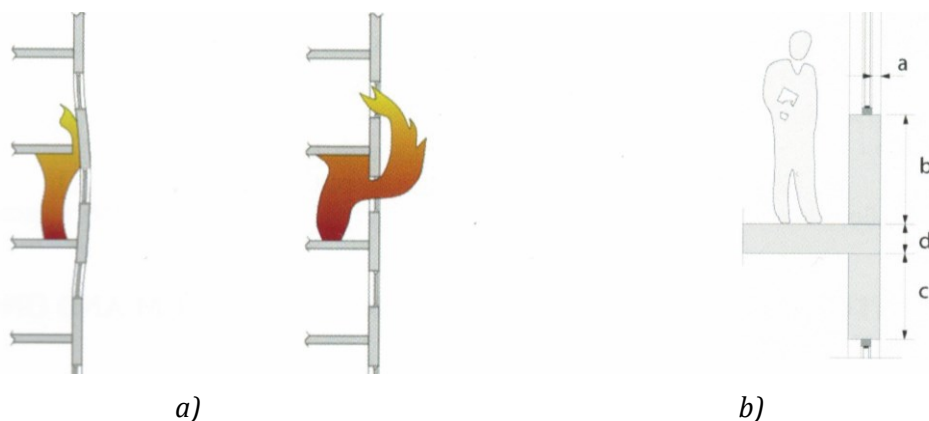
požadavků je patrné, že katastrofický požár Grenfell Tower v roce 2017 měl výrazný vliv na úpravu tehdy soudobých předpisů, neboť podle současných stavebních předpisů British Regulations 2010 by nebylo možné stavbu s takovým obvodovým pláštěm, resp. větranou fasádou realizovat, zejména co se týče hořlavých materiálů v ní umístěných.

2.4.4 Belgie

Požadavky na provádění fasádních systémů v Belgické monarchii představil příspěvek ve sborníku [29] publikovaném v rámci mezinárodní konference požární bezpečnosti fasád konané v Paříži roku 2019.

Úvodem řečený příspěvek ukazuje možnosti šíření požáru, které již byly i v rámci této práce popsány v kapitole 2.2. Dále představuje belgický královský dekret z roku 1994, který stanovuje základní požadavky týkající se prevence požáru a výbuchu, kterými se musí řídit všechny nové budovy. Tento dekret rozděluje budovy na základě jejich výšky, a to do tří skupin: nízké budovy (výška ≤ 10 m), budovy střední výšky (výška ≤ 25 m) a výškové budovy (výška ≥ 25 m). Všechny požadavky tohoto dekretu se vztahují na nově realizované budovy, nejsou platné pro již existující stavby, renovace, ani na stavby rodinných domů.

Dekret v době prezentování příspěvku definoval požadavky pro limitování nebo zpomalení šíření požáru přes vnější fasádní obklad. Tyto požadavky se vztahují k třídě reakce na oheň fasádního obkladu, a to D-s3, d1 pro nízké budovy, B-s3, d1 pro budovy střední výšky a výškové budovy. Tyto požadavky se vztahují na fasádní obklady v podmínkách jejich konečného použití s uvažováním možného vlivu vrstev a materiálů nacházející se pod obkladem a způsobu upevnění.



obr. 19: a) vnitřní a vnější šíření požáru z jednoho požárního úseku do druhého, b) prvky obvodových stěn s požární odolností E 60 s minimální délkou $a + b + c + d \geq 1$ m

Belgický královský dekret dále stanovoval opatření pro omezení nebo snížení rychlosti šíření požáru z jednoho požárního úseku do druhého buďto vertikálně nebo horizontálně. Tyto opatření mají za účel snížit riziko šíření požáru jak vnitřními spárami, tak i po vnějším povrchu fasády, které definuje paragraf §1 následovně:

- Za účelem snížit riziko vnitřního šíření požáru, spoj mezi požárně dělícími konstrukcemi požárního úseku (například styk stropu a obvodové stěny) musí mít požární odolnost EI 60, a to i včetně nízkých budov (obr. 19).
- Za účelem předcházet riziku vnějšího šíření požáru z jednoho požárního úseku do druhého, prvky obvodových stěn u budov střední výšky a výškových budov musí vykazovat požární odolnost alespoň E 60 a rozvinutá délka těchto prvků musí být rovna nebo větší jak 1 m (obr. 19).

Jak je z tab. 7 patrné, tak požadavky na obklady se vztahují na jejich konečné použití, zatímco oproti předchozímu znění není nutné při hodnocení fasádního systému vzít v úvahu prvky pod obkladem při dodržení požadavků tabulky, neboť pak jsou tyto vrstvy chráněny plošnými prvky s dostatečnou odolností K2³ 30 pro výškové budovy a K2 10 pro středně vysoké budovy včetně rozmístění požárních bariér. Nutné je ještě dodat, že produkty s plošnou hmotností < 1 kg/m² a tloušťkou < 1 mm jsou považovány za nepodstatné a nejsou na ně kladeny požadavky.

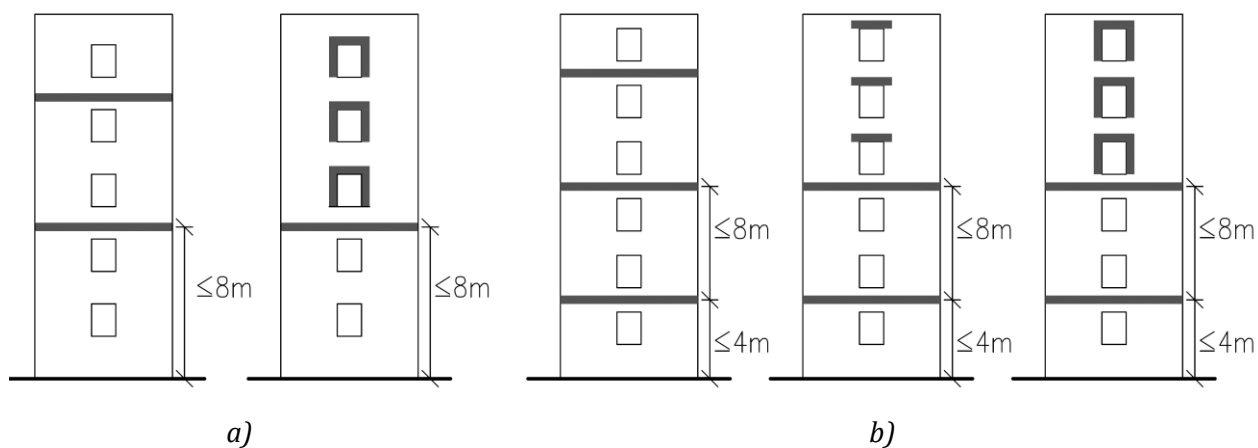
tab. 7: Nové požadavky týkající se prvků fasádních systémů dle aktualizace dekretu v Belgii [29]

Fasádní komponent	Podmínky	Typ budovy		
		Výškové budovy (h > 25 m)	Středně vysoké budovy (10 ≤ h ≤ 25 m)	Nízké budovy (h < 10 m)
Vnější obklad	Konečné použití	A2-s3, d0	B-s3, d1	C-s3, d1 / D-s3, d1 ⁽¹⁾
Ostatní podstatné komponenty (např. tepelná izolace)	Jak je uvedeno na trh	A2-s3, d0	A2-s3, d0 nebo E, s požárními bariérami	E
		E s požárními bariérami a zcela chráněn prvky K2 30	E pokud zcela chráněn prvky K2 10	/
Poznámky: (1) Uvedená TRO D-s3,d1 umožňuje na nízkých budovách použít dřevo jako obkladový materiál, při použití jiného obkladového materiálu je požadována nejhůře TRO C-s3,d1				

Pro ostatní podstatné komponenty (např. izolace), které jsou součástí fasádních systémů, se požadavky vztahují na produkty takové, jaké byly umístěny na trh. To dle tab. 7 přináší následující řešení:

³ Účinnost požárních ochranných K dle čl. 5.2.9 EN 13501-2 (pro ČR harmonizovaná ČSN EN 13501-2 [30]) je schopnost stěnových nebo stropních obkladů chránit po stanovenou dobu obložené materiály proti vznícení, uhořnutí a ostatnímu poškození. Účinnost požární ochrany K₂ lze klasifikovat jako 10, 30 a 60 minut.

- Pro výškové budovy musí být izolace nehořlavá, třídy reakce na oheň nejhůře A2-s3, d1. Druhou možností je využití izolantu hořlavého třídy reakce na oheň E nebo lepší, pokud je kompletně chráněn prvky s účinností požární ochrany K2 30 a každé dvě podlaží je tento izolant nahrazen požární bariérou v podobě pruhu z minerální vlny.
- Pro středně vysoké budovy se nabízí tři možnosti:
 - 1) Izolace je nehořlavá, třídy reakce na oheň nejhůře A2-s3, d1.
 - 2) Izolace třídy reakce na oheň E nebo lepší, pokud je kompletně chráněna prvky s účinností požární ochrany K2 30.
 - 3) Izolace třídy reakce na oheň E nebo lepší, pokud jsou použity požární bariéry. Tyto požární bariéry přerušují hořlavý izolant a případně i větranou dutinu, pokud je přítomna. Pro větrané fasády není ale možné použít izolanty v podobě extrudovaného (XPS) a expandovaného (EPS) polystyrénu.
- 4) Jakékoliv odlišné řešení od výše zmíněného by mělo být podrobeno velkorozměrové zkoušce, která by dodavatelům fasádních systémů umožňovala prokázat, že jejich řešení nepředstavuje riziko šíření požáru. Nicméně je zdůrazněno, že v současné době neexistuje v EU sjednocená metodika a po celé EU je velké množství zkušebních metod, které se velmi liší, což značně znesnadňuje pohyb výrobků v rámci zejména zahraničního trhu.



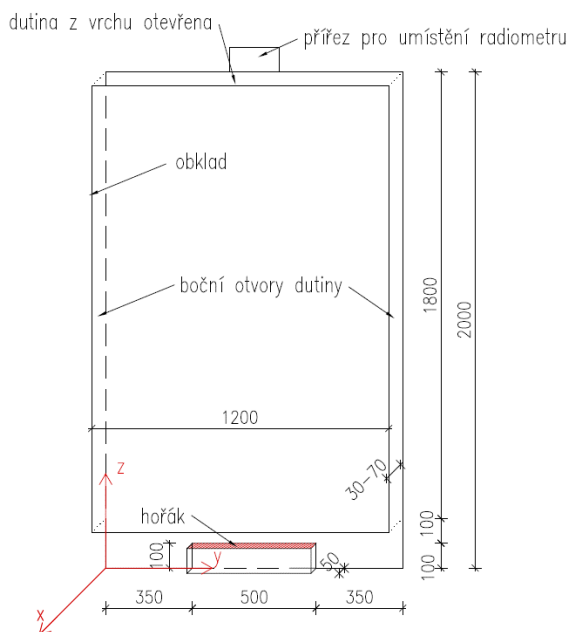
obr. 20: Rozmístění požárních bariér dle belgického královského dekretu pro: a) fasády s kontinuální větranou dutinou (větrané fasády), b) fasády bez kontinuální vzduchové dutiny (ETICS)

3 Matematický CFD model chování požáru v dutině s různou šířkou

V rámci praktické části byly sestaveny tři modely zaměřené na sledování chování účinků požáru ve větrané dutině fasádního systému. Tato případová studie nepodléhá ani nenapodobuje žádnou platnou zkušební metodiku, byla provedena čistě za akademickými účely a s myšlenkou, aby modelovaná sestava šla i poměrně snadno sestavit v laboratorních podmínkách v krátkém časovém úseku. Modely jsou řešeny pomocí matematického modelu požáru za použití programu, resp. pre-procesoru PyroSim (verze 2021.3.0901) a následně softwaru Fire Dynamics Simulator (FDS verze 6.7.7), který spadá do tzv. modelů typu pole (CFD) postavených na algoritmech výpočtového proudění tekutin. Pro zobrazení grafických výstupů posloužil vlastní grafický program PyroSim.

3.1 Navržené scénáře

Celkem byly navrženy tři scénáře, ve kterých byl pozorován vliv změny výkonu hořáku v průběhu zkoušky a šířky dutiny. Sestava je modelována velmi jednoduše pouze jako dutina ohraničená dvěma cementovláknitými deskami, nikoliv jakožto celý fasádní systém, tzn. je vynechána izolace, jakékoliv požární bariéry, či nosný rošt fasádního systému. Sestava byla celkem 2 m vysoká, 1,2 m široká s proměnnou šíří modelu, ve vrchu modelu byla přidána dodatečně deska pro umístění radiometru, schematický náčrt (obr. 21).



obr. 21: Schematický náčrt sestavy zkušební vzorku větrané dutiny v axonometrii

V celkem třech modelech byla měněna šířka dutiny v hodnotách 30, 50 a 70 mm. V každé z modelovaných zkoušek byl zdrojem požáru propanový hořák rozměrů 500 x 50

x 100 mm, kterému se během zkoušky měnil výkon, a to 10 kW v čase 0–180 s, následně výkon skokově vzrostl na 20 kW v čase 180–360 s. Do modelu byla zahrnuta i fáze chladnutí obdobně jako v experimentech v časovém rozmezí 360–540 s.

3.1.1 Výpočetní síť

Výpočetní síť byla navržena tak, aby byly dodrženy postupy doporučené pro software FDS [31], [32]. Jedná se o výpočetní síť tvořené buňkami tvaru krychle, přičemž bylo užito nástroje pro posouzení vhodné velikosti hrany krychle, resp. výpočetní buňky [33]. Vzhledem k jemnosti výpočetní sítě se jevílo jako vhodné upravit počet buněk ve směru Y a Z tak, aby byla umožněno využití algoritmu rychlé Fourierovy transformace, tzn. hodnot rozložitelných na součin prvočísel odpovídají zápisu $2^k 3^m 5^n$.

Velikost výpočetních buněk byla zvolena stejná pro všechny modely dle výše zmíněných pravidel. Jedná se o krychle s velikostí hrany 10 mm, přičemž ve směru Y (v délce modelu) jich bylo umístěno 120 a ve směru Z (po výšce modelu) 210. Ve směru X, tedy ve směru šířky dutiny, se počet buněk měnil. V prvním modelu, ačkoliv širší dutiny byla modelována pouze 30 mm, bylo umístěno v tomto směru 6 buněk, aby bylo možné sledovat případné účinky požáru před dutinou. V prvním modelu se tedy nachází celkem 151 200 buněk. Další dva modely byly zaměřeny pouze na dutinu, tzn. ve směru X bylo umístěno pro druhý model 5 buněk a pro třetí model 7 buněk, což celkem tvoří 126 000 a 176 400 výpočetních objemů. Výpočetní síť byla rozdělena na 6 oblastí po výšce z důvodu umožnění paralelního výpočtu, přičemž ztráty dat mezi jednotlivými sítěmi jsou minimalizovány díky podobnému počtu buněk v jednotlivých sítích.

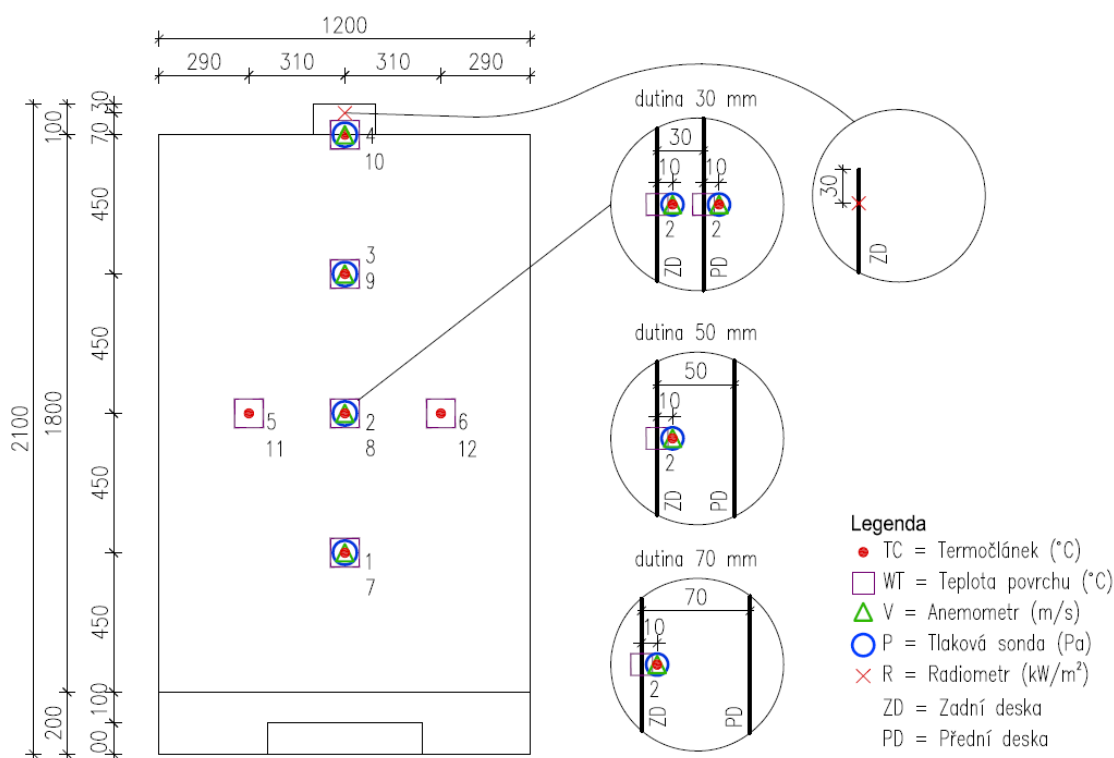
Spodní plocha, zadní stěna a přední stěna, resp. fasádní obklad jsou ohraničeny cementovláknitými deskami, zbylé boční strany a vršek modelu jsou uvažovány jako otevřené oblasti. V modelovaném prostoru je umístěn výše zmíněných rozměrů, přičemž jeho horní povrch je zadefinován jako sálavá plocha. Jako palivo byl zvolen propan, a výkon v průběhu času se měnil vzhledem k ploše hořáku na hodnoty 400 kW/m² a 800 kW/m², resp. 10 kW a 20 kW.

3.1.2 Použité materiály

Použité materiály ve všech scénářích jsou výhradně nehořlavé, jedná se de facto pouze o cementovláknité desky ohraničující dutinu. Pro tento účel byly zvoleny desky Fermacell Powerpanel H₂O, jejichž tepelně technické vlastnosti bylo možné získat z technických listů výrobce, těmi jsou $c = 1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\lambda = 0,173 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Tyto vlastnosti byly zjednodušeně uvažované jako nezávislé na teplotě, jednak z důvodu, že výrobce tato specifikata neuvádí, ale pro sledování chování požáru v dutině rovněž nemají proměnné vlastnosti zásadní vliv.

3.1.3 Měřicí zařízení

Primární sledovanou veličinou je teplota horkých plynů v dutině mezi dvěma cementovláknitými deskami a v modelu dutiny šířky 30 mm i před vnější deskou, pro jejíž zaznamenávání bylo použito termočlánků typu K. Tyto zařízení neměří pouze teploty horkých plynů v dutině, ale při měření, resp. výpočtu, zohledňují vlastnosti použitého termočlánku, tudíž více připodobňují skutečné možnosti měření během experimentů. Vlastnosti jsou ponechány jako výchozí, které si program Pyrosim definuje sám, jde o emisivitu ($\varepsilon = 0,85$), hustotu ($\rho = 8908 \text{ kg/m}^3$) a měrnou tepelnou kapacitu ($c = 0,44 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$). V modelu je umístěno celkem šest termočlánků, čtyři jsou umístěny ve svislé přímce ve vzdálenostech 450 mm od sebe tak, aby bylo možné sledovat teploty vždy po $\frac{1}{4}$ výšky dutiny, další dva jsou umístěny v $\frac{1}{2}$ výšky dutiny a $\frac{1}{4}$, resp. $\frac{3}{4}$ délky vzorku. Všechny tyto termočlánky směřují do dutiny a jsou umístěny ve vzdálenosti 10 mm od zadní desky. Rozmístění těchto termočlánků je patrné z obrázku obr. 22.



obr. 22: Schematický náčrt rozmístění měřicích zařízení

V dutině jsou dále umístěny zařízení k měření povrchových teplot ve směru do dutiny, v případě prvního modelu s dutinou 30 mm a modelovaným prostorem před dutinou jsou sledovány i teploty vnějšího povrchu. Tato zařízení byla umístěna ve stejných pozicích jako výše zmíněné termočlánky. Dalšími sledovanými veličinami jsou změny tlaku v dutině a společně s nimi rychlost proudění horkých plynů v dutině. Tyto měřicí body jsou umístěny ve svislé přímce ve výškách 450, 900, 1350 a 1800 mm v dutině, a to ve vzdálenosti 10 mm od vnitřního povrchu dutiny.

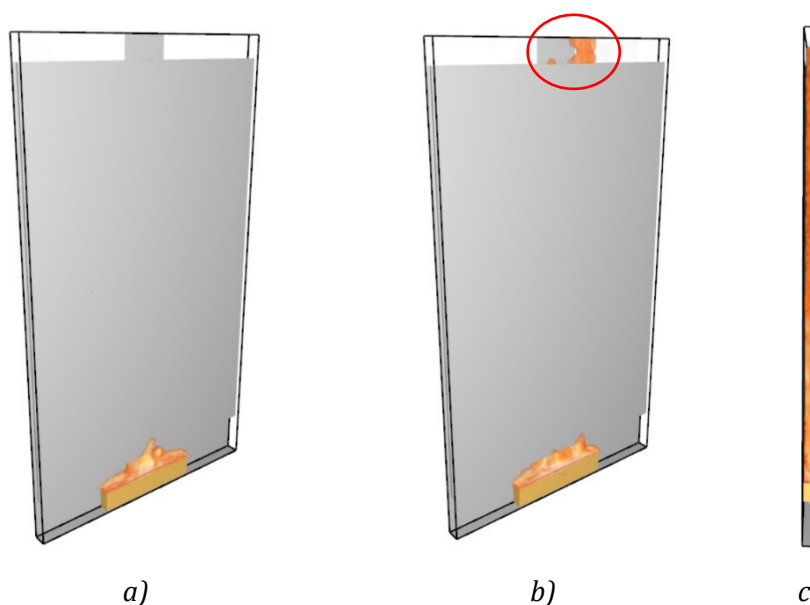
V poslední řadě byly zdefinovány isoplochy, které poskytují vizuální rozložení sledovaných veličin. Isoplochami ve smyslu 2D řezu dutinou byly sledovány teploty, změny tlaků a rychlost proudících plynů, 3D isoplochou byly sledovány pouze teploty horkých plynů. Tyto mechanismy slouží pouze k vizuálnímu hodnocení a utvoření představy obecně o hodnotách sledovaných veličin.

3.2 Diskuse výsledků

Sledovanými výstupy z programu PyroSim jsou vizualizace, na kterých je patrné chování požáru v průběhu simulace. Dále jsou pomocí řezů a isoploch vizuálně pozorovány teploty, rychlost proudění a změny tlaků v dutině. Data získaná z měřících zařízení jsou prezentována pomocí grafů.

3.2.1 Dutina šířky 30 mm

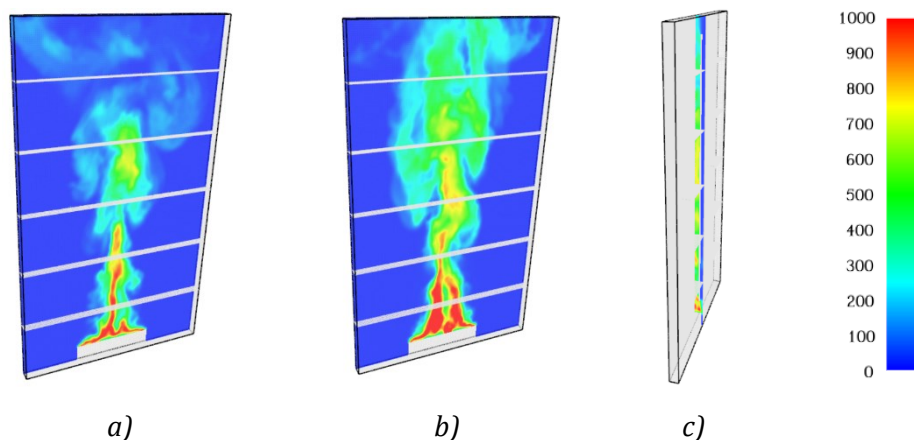
V prvním modelu s dutinou šířky 30 mm, kde byl vytvořen prostor i před dutinou a obkladem, bylo umožněno sledování chování plamene u hořáku, tedy ve spodní části sestavy. Z vizualizace na obr. 23 je patrné, že ačkoliv hořák je širší než dutina sama o sobě, tak plameny z hořáku směřují přímo do ní a nikoliv před obklad. Při vyšším výkonu hořáku je možné sledovat občasné prošlehnutí plamene po celé výšce dutiny a následně ven v jejím vrcholu.



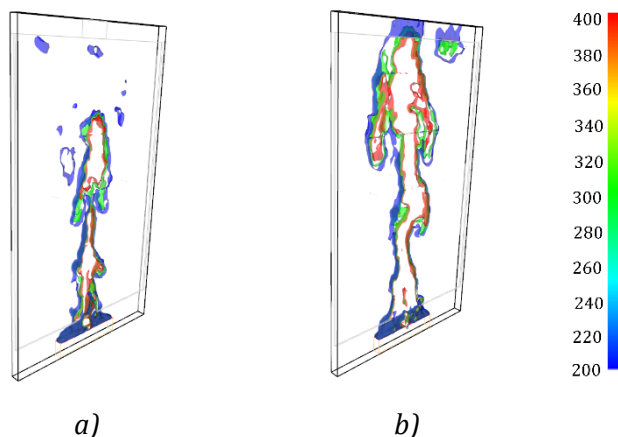
obr. 23: Dutina 30 mm – vizualizace plamene z programu PyroSim: a) plamen v dutině v čase 120 s, b) plamen v čase 240 s prošlehává po celé výšce dutiny, c) pohled do dutiny v čase 240 s

Z isoploch (obr. 24) zobrazujících průběhy teplot v dutině je patrný vliv komínového efektu, přičemž nejvyšších teplot je dosaženo v oblasti plamenného hoření, což při porovnání se skutečným požárem představuje oblast okenního nadpraží nebo oblast

založení fasádního systému, která je teplotami nejvíce namáhána. Z vizualizací je patrné, že ačkoliv výkon hořáku je oproti skutečnému požáru výrazně menší, tak i přesto je v dutině dosahováno vysokých teplot.



obr. 24: Dutina 30 mm – 2D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) 120 s (10 mm od líce zadní desky), b) 240 s (10 mm od líce zadní desky), c) 240 s (kolmo na střed dutiny); teplotní škála (°C)

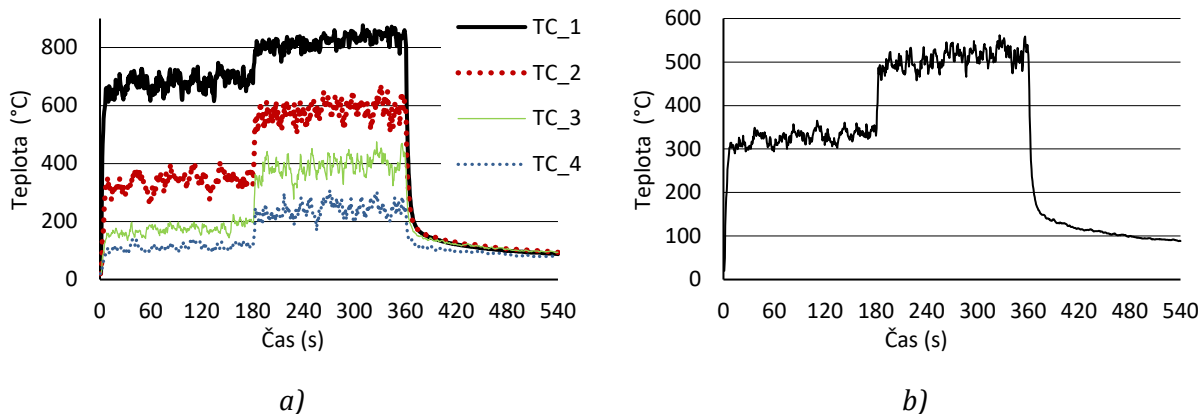


obr. 25: Dutina 30 mm – 3D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) v čase 120 s, b) v čase 240 s, včetně teplotní škály (°C)

3D isoplochami byl rovněž sledován průběh teplot v dutině. V rámci zdrojového kódu byly zdefinovány tři hodnoty teplot pro vykreslení isoploch, a to 200, 300 a 400 °C, ty jsou na obr. 25 zobrazeny modrou, zelenou a červenou barvou dle stupnice. Objem nacházející se uvnitř hranice červené plochy představuje oblast, ve které je dosaženo vyšších teplot než zaznamenávaných 400 °C. Totéž v obrácené analogii platí u hraniční oblasti modré isoplochy, přičemž v oblasti vně jsou teploty nižší než 200 °.

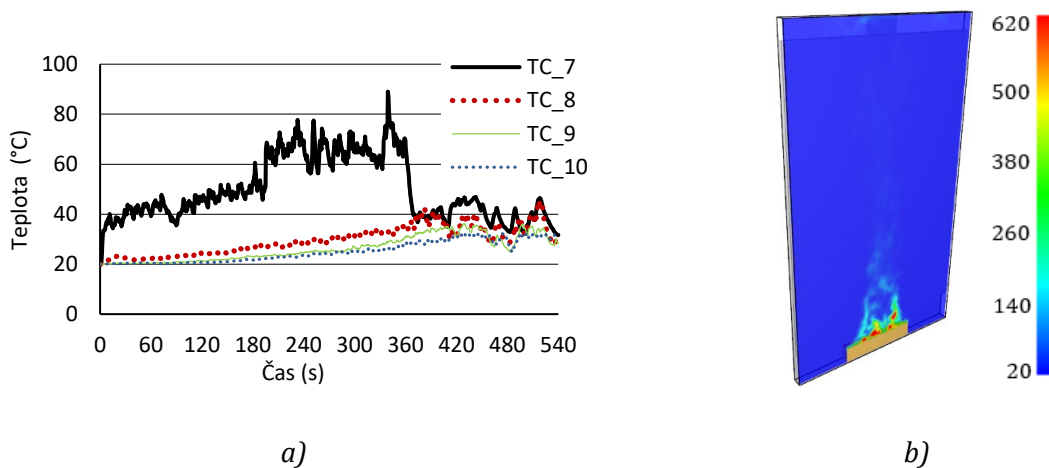
Na následujícím grafu jsou zobrazeny průběhy teplot simulovaných, termočlánky označenými pracovně TC_1–TC_4, tedy umístěné přímo uprostřed dutiny, termočlánky TC_5 a TC_6 nejsou v grafu zaneseny, neboť neposkytují nijak relevantní či zajímavá data. Nejvyšších teplot bylo dosaženo v oblasti plamenného hoření, tedy termočlánkem TC_1

v úrovni 650 mm nad $\pm 0,000$ celého vzorku, jedná se o hodnotu $877\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále jsou také zobrazeny průměry teplot jednak v ose vzorku (termočlánky TC_1–TC_4), rovněž ale také průměr spočtený všemi termočlánky, nejvyšší průměrná hodnota je 561 ° .



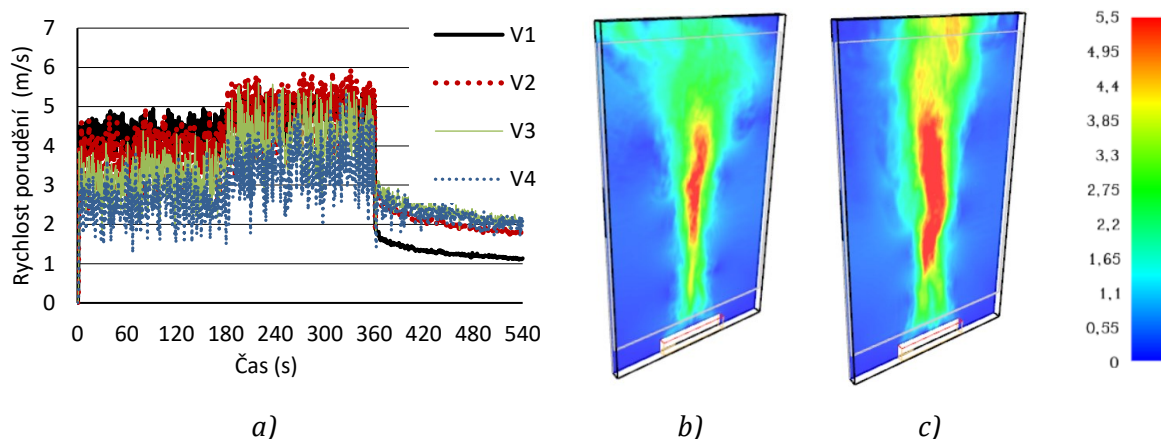
obr. 26: Dutina 30 mm – průběh teplot plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky: a) měřené termočlánky TC_1–TC_4, b) aritmetický průměr z TC_1–TC_4

Pouze v případě dutiny šířky 30 mm byl modelován i prostor před dutinou, teploty byly sledovány 10 mm před cementovláknitou deskou představující obklad. Nejvyšší teploty byly vypočteny opět v termočlánku umístěným nejnižže, tedy pracovníě označeným TC_7. Ve vyšší úrovni, jak je z obr. 27 patrné, jsou teploty nižší, neboť zde docházelo k promísení s okolním vzduchem. V případě řečeného termočlánku docházelo k mírnému kolísání hodnot, nejvyšší spočtená teplota dosáhla hodnotu $89\text{ }^{\circ}\text{C}$.



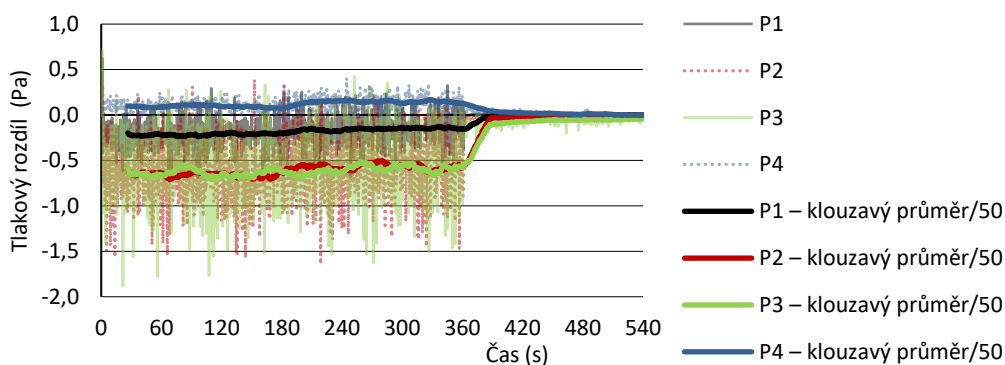
obr. 27: Dutina 30 mm – průběh teplot plynů mimo dutinu 10 mm před obkladovou deskou: a) měřené termočlánky TC_7–TC_10, b) vizualizace rozložení teploty ($^{\circ}\text{C}$)

Další sledovanou veličinou byla rychlost proudění plynů, která byla měřena v ose dutiny. Nejvyšší rychlosti bylo dosaženo u měřicího zařízení V1, po navýšení výkonu hořáku u V2. Nejvyšší spočtenou rychlostí byla hodnota cca 6 m/s v případě měřicího zařízení V2. Je patrné, že navýšení výkonu hořáku obecně mělo vliv na rychlost proudění plynů, přičemž v grafu lze zpozorovat poměrně konstantní průběh s jistou fluktuací. Díky vizualizaci na obr. 28 je patrné, že nejrychleji proudily plyny v oblasti nad hořákem přibližně uprostřed výšky dutiny, přičemž k okraji dutiny se rychlost proudění výrazně snižovala.



obr. 28: Dutina 30 mm – rychlost proudících plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky: a) měřené rychlostními sondami V1–V4, b) vizualizace rozložení rychlosti v čase 120 s (m/s), c) vizualizace rozložení rychlosti v čase 240 s (m/s)

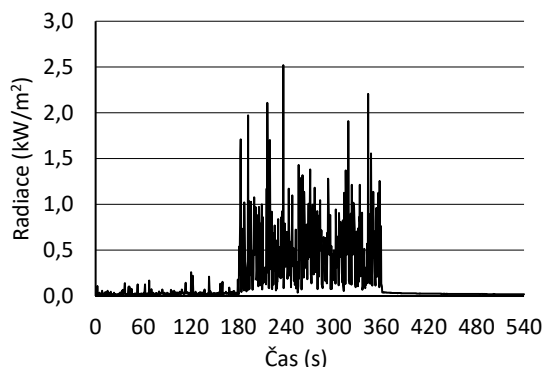
Předposlední sledovanou veličinou byly tlakové změny po výšce dutiny. Spočtené hodnoty patrné z grafu (obr. 29) značně fluktuují, a proto bylo nutné je nahradit funkcí klouzavého průměru. V případě prvních třech zařízení byl zaznamenán negativní tlak pohybující v rozmezí 0–0,7 Pa (dle klouzavého průměru), u posledního umístěného ve vrchu vzorku byl zaznamenán tlak kladný, přibližně 0,2 Pa (dle klouzavého průměru).



obr. 29: Dutina 30 mm – průběh tlakových rozdílů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky

Závěrem je prezentována poslední fyzikální veličina, a to radiální složka tepelného toku zaznamenávaná radiometrem umístěným v přířezu desky nad horní hranou vzorku. Z grafu (obr. 30) je nicméně patrné, že k zaznamenání relevantnějších hodnot radiace došlo až při vyšším výkonu hořáku. Z grafu je patrná značná fluktuace, nicméně při proložení

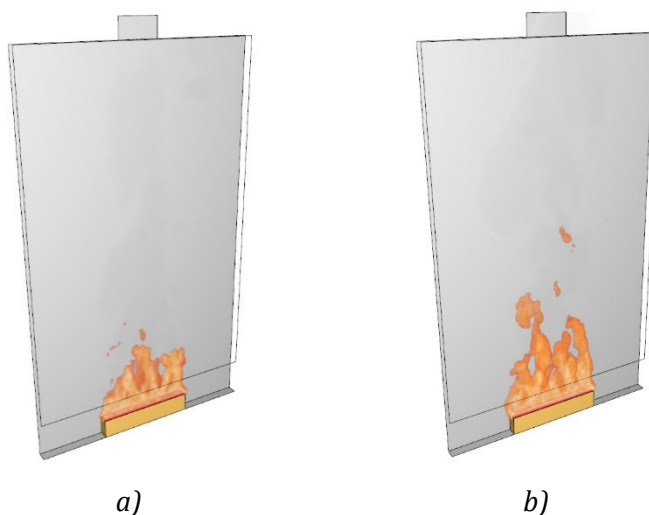
spojnicí trendu je patrný ustálenější průběh. Maximální hodnota spočítané radiace dosáhla hodnoty cca 2,5 kW/m².



obr. 30: Dutina 30 mm – průběh spočtené radiace

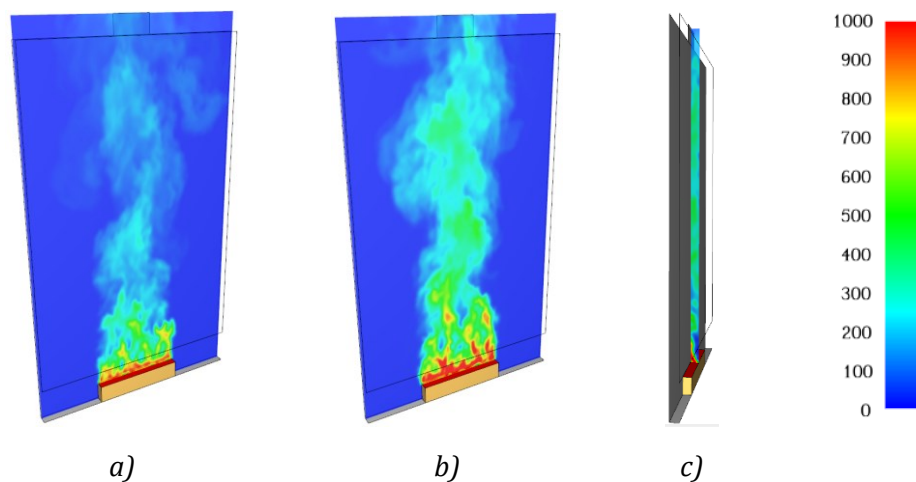
3.2.2 Dutina šířky 50 mm

Sledované veličiny jsou opět stejné jako v předchozím modelu dutiny 30 mm, ovšem s tím rozdílem, že nebyl modelován prostor před dutinou. Rovněž díky vizualizaci plamenného hoření na obr. 23 je předpokládáno, že dutina je schopna pojmout všechny plameny. Definované body měření, příp. výpočetní síť je popsána v kapitolách výše. V průběhu matematické simulace byla zpozorována maximální výška plamene přibližně do poloviny výšky dutiny, prošlenutí plamene do vyšších úrovní či nad dutinu nebylo zpozorováno.

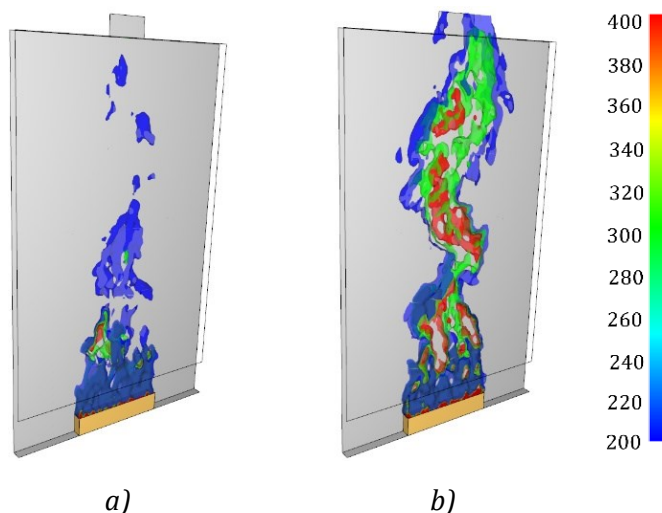


obr. 31: Dutina 50 mm – vizualizace plamenu z programu PyroSim: a) plamen v dutině v čase 120 s, b) plamen v čase 240 s

Rozložení teploty v dutině ve vzdálenosti 10 mm od zadní desky je opět pro představu vykresleno pomocí isoploch v podobě řezu kolmého na osu x, osu y a 3D isoploch. Opět platí, že nejvyšší teploty byly naměřeny v oblasti plamenného hoření, rovněž je z vizualizací patrné, že navzdory malému výkonu hořáku je v dutině dosahováno vysokých teplot.



obr. 32: Dutina 50 mm – 2D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) 120 s (10 mm od líce zadní desky), b) 240 s (10 mm od líce zadní desky), c) 240 s (kolmo na střed dutiny), teplotní škála (°C)

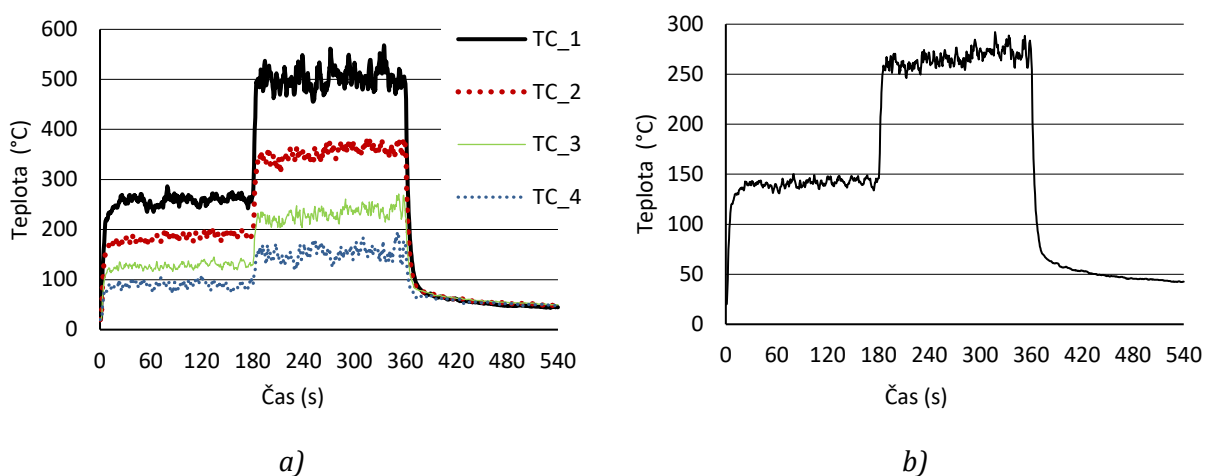


obr. 33: Dutina 50 mm – 3D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) v čase 120 s, b) v čase 240 s, včetně teplotní škály (°C)

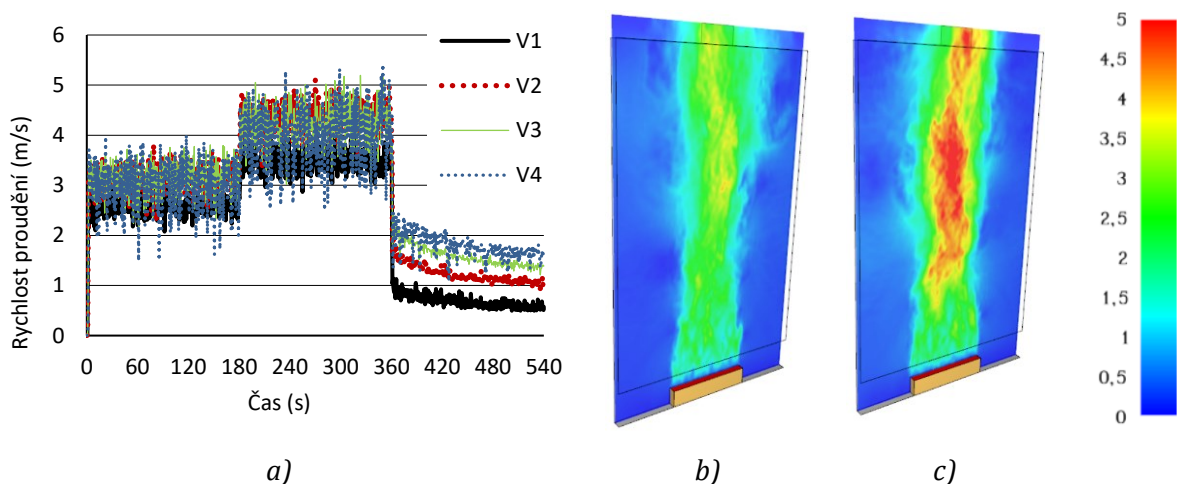
Při vynášení simulovaných hodnot teplot jsou zobrazeny jen hodnoty ze zařízení TC_1–TC_4, termočlánky TC_5 a TC_6 neposkytují nijak relevantní či zajímavá data. Nejvyšší dosažená teplota byla vypočtena v případě termočlánku TC_1, a to 568 °C. Průběh spočítaných teplot je patrný z grafů na obr. 34, kde jsou vyneseny jak průběhy teplot, tak i rovněž zaznamenávaný aritmetický průměr v sloupci z výše zmíněných měřících zařízení.

Další sledovanou veličinou byla opět rychlost proudění plynů měřená v sloupci uprostřed dutiny 10 mm od líce zadní desky. Nejvyšší rychlosti bylo dosaženo u měřícího zařízení V4, a to v případě vyššího výkonu hořáku (20 kW). Nejvyšší naměřenou rychlostí byla hodnota 5,41 m/s v případě měřícího zařízení V4. Rovněž jako v předchozím případě je patrné, že navýšení výkonu hořáku obecně mělo vliv na rychlost proudění plynů, přičemž v grafu lze zpozorovat relativně ustálený průběh s mírnou fluktuací. Díky vizualizaci na obr.

35 je patrné, že nejrychleji proudily plyny v oblasti nad hořákem přibližně uprostřed výšky vzorku, přičemž k okraji dutiny se rychlost proudění výrazně snižovala.



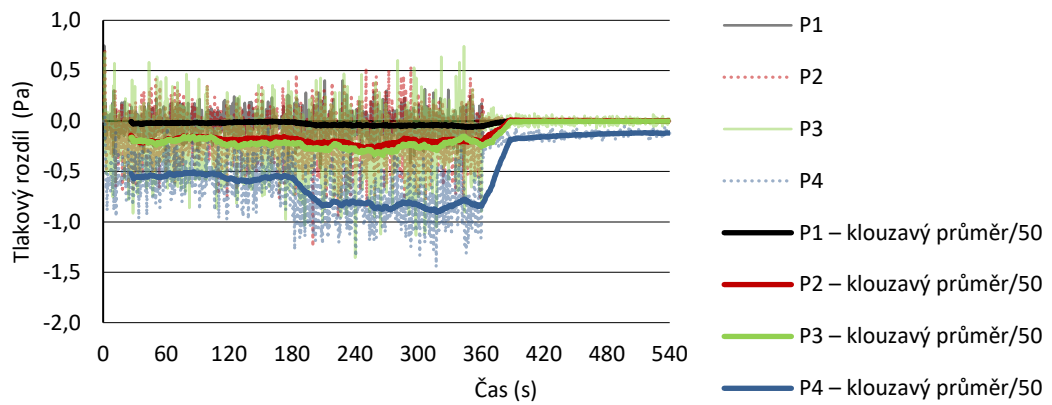
obr. 34: Dutina 50 mm – průběh teplot horkých plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky: a) měřené termočlánky TC_1–TC_4, b) aritmetický průměr z TC_1–TC_4



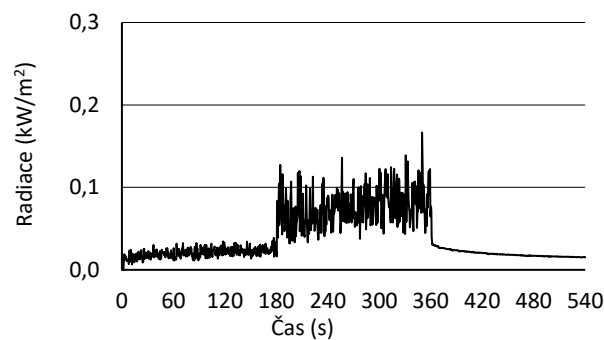
obr. 35: Dutina 50 mm – rychlost proudících plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky: a) měřené rychlostními sondami V1–V4, b) vizualizace rozložení rychlosti v čase 120 s (m/s), c) vizualizace rozložení rychlosti v čase 240 s (m/s)

Vzhledem ke značně fluktuujícímu průběhu tlakových rozdílů byly spočtené hodnoty nahrazeny klouzavým průměrem. Z grafu je patrné, že všechna měřící zařízení zaznamenala převážně negativní tlak, který se pohybuje přibližně mezi hodnotami 0–0,9 Pa zohledňujícíce pouze klouzavé průměry, nikoliv extrémy způsobené kolísáním hodnot.

Závěrem je prezentována sálavá složka tepelného toku zaznamenávaná radiometrem umístěným v přířezu desky nad horní hranou vzorku. Z grafu (obr. 37) je ovšem patrné, že je téměř zanedbatelná, neboť se jedná o hodnoty maximálně patnáct setin kW/m^2 , a to i při vyšším výkonu hořáku.



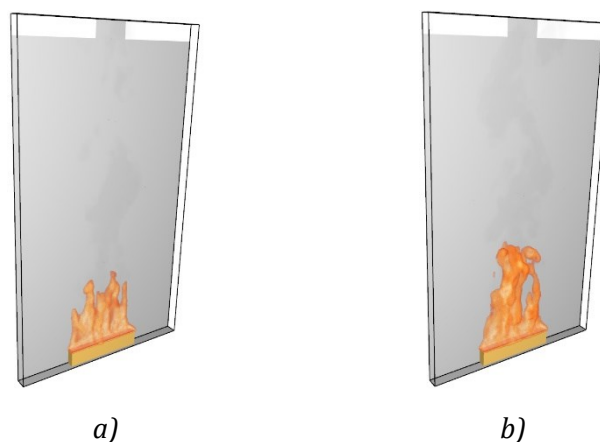
obr. 36: Dutina 50 mm – průběh tlakových rozdílů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky



obr. 37: Dutina 50 mm – průběh naměřené hustoty tepelného toku

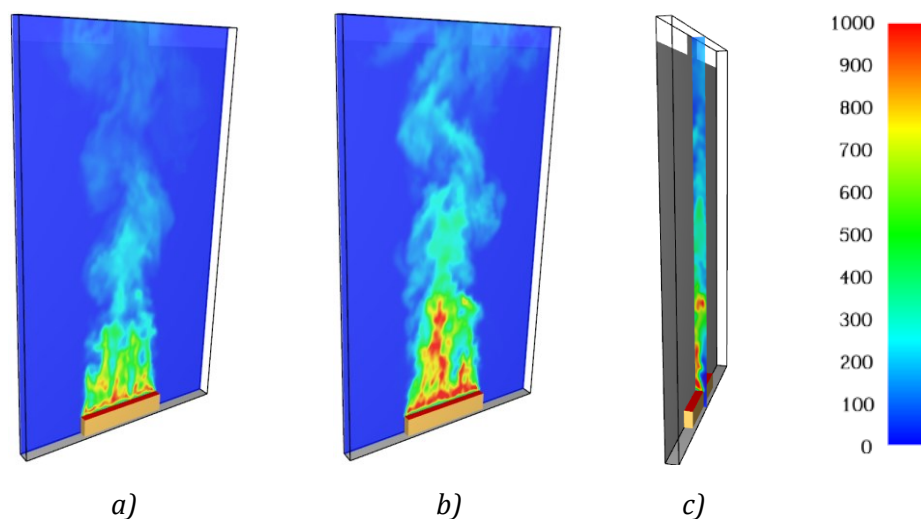
3.2.3 Dutina šířky 70 mm

Sledované veličiny jsou totožné jako v předchozích matematických modelech dutin, avšak stejně jako u dutiny šířky 50 mm zde nebyl modelován prostor před dutinou. Vzhledem k šířce hořáku (50 mm) je předpokládáno, že dutina 70 mm je schopna pojmout všechno plamenné hoření. Body měření a výpočetní síť jsou popsány výše. Maximální výška plamene byla zpozorována cca do třetiny výšky celé dutiny bez prošlehávání plamene po celé výšce.

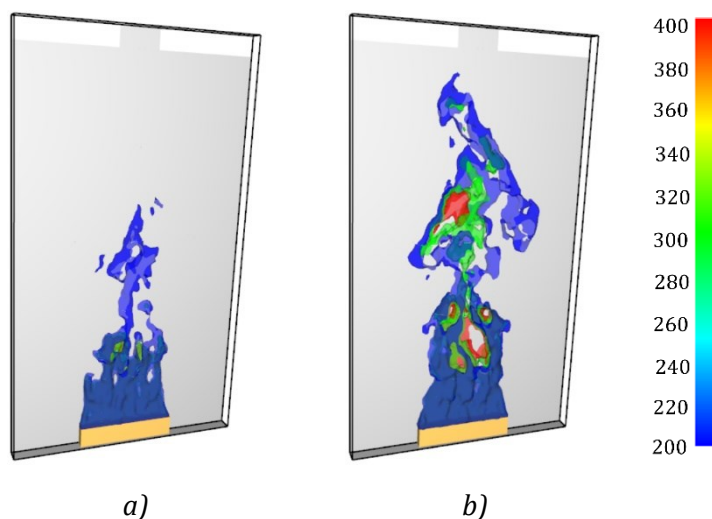


obr. 38: Dutina 70 mm – vizualizace plamene z programu PyroSim: a) plamen v dutině v čase 120 s, b) plamen v čase 240 s

Pro rozložení teploty je opět využito 2D isoploch, jedná se o řezy kolmé na osu x v hloubce 10 mm, ve středu osy y, a též 3D isoploch. Potvrzeno je pravidlo, že nejvyšších teplot bylo dosaženo v oblasti těsně nad hořákem, teploty ve vyšších úrovních jsou však výrazně nižší, neboť vlivem poměrně velké šířky dutiny došlo k rozptýlení horkých plynů po dutině a smísení s chladnějším vzduchem.

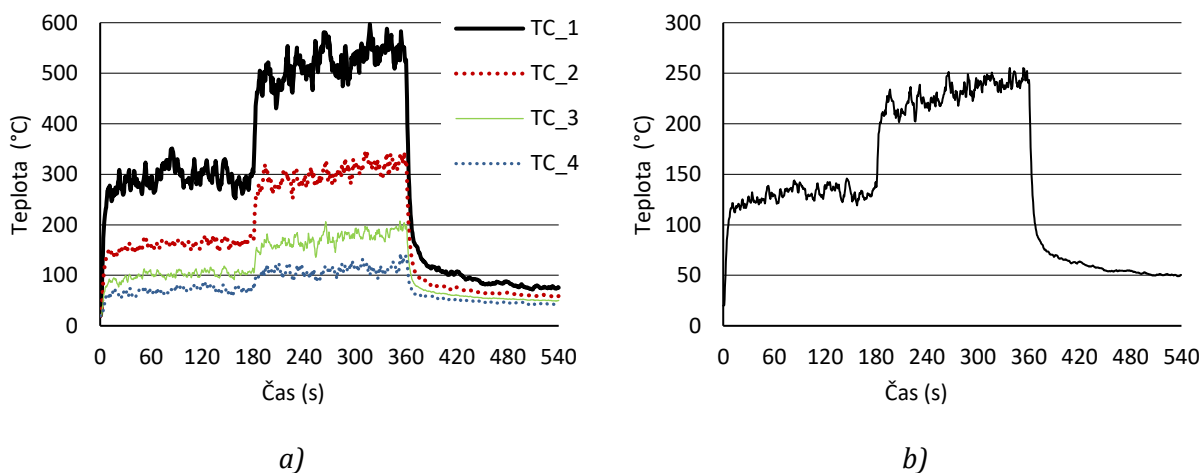


obr. 39: Dutina 70 mm – 2D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) 120 s (10 mm od líce zadní desky), b) 240 s (10 mm od líce zadní desky), c) 240 s (kolmo na střed dutiny), teplotní škála (°C)



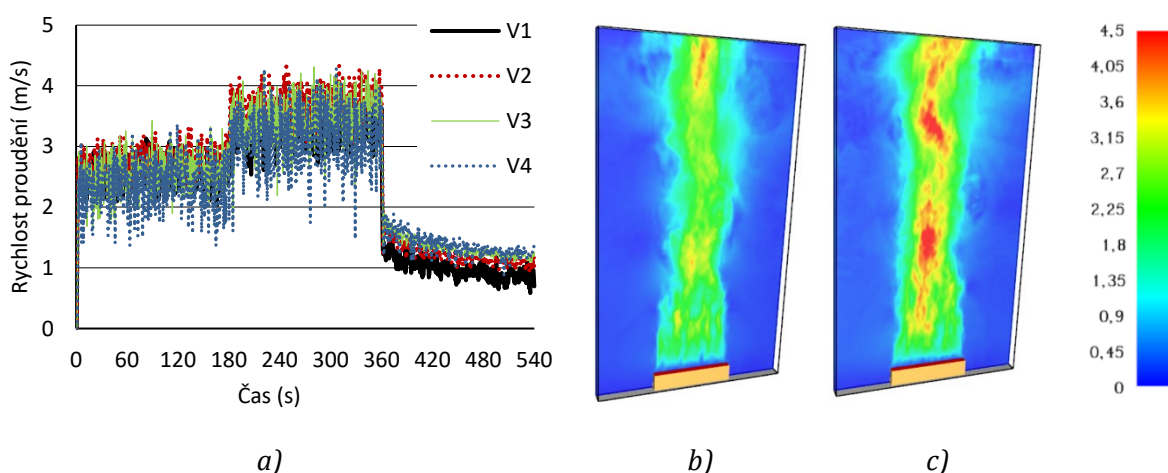
obr. 40: Dutina 70 mm – 3D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) v čase 120 s, b) v čase 240 s, včetně teplotní škály (°C)

Při vynášení spočtených hodnot teplot jsou opět zobrazeny jen hodnoty ze zařízení TC₁-TC₄. Nejvyšší teplota byla dosažena u termočlánku TC₁, a to 598 °C. Průběh těchto teplot je patrný z grafů na obr. 41, kde jsou vyneseny jak průběhy teplot, tak rovněž i zaznamenávaný aritmetický průměr v sloupci z výše zmíněných měřících zařízení.



obr. 41: Dutina 70 mm – průběh teplot horkých plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky, a) měřené termočlánky TC_1–TC_4, b) aritmetický průměr z TC_1–TC_4

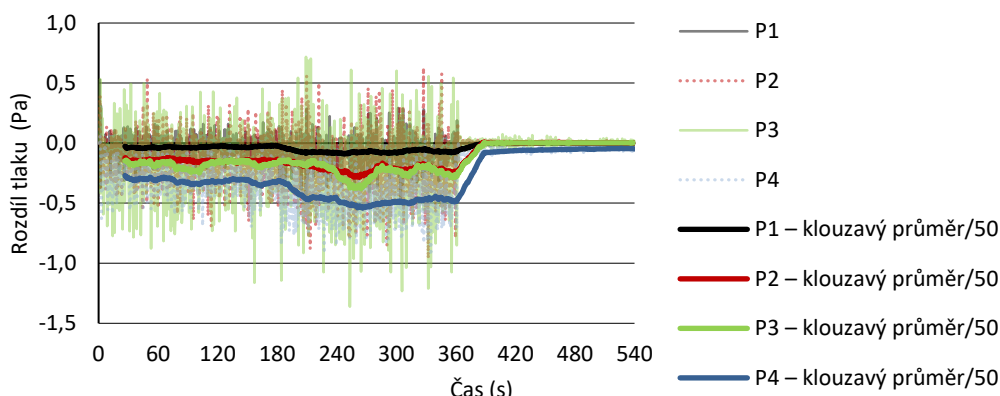
Stejně jako v předchozích dvou případech byla zkoumána rychlost proudících horkých plynů, a to uprostřed dutiny v hloubce 10 mm. Nejvyšší spočtenou rychlostí byla hodnota 4,3 m/s u rychlostní sondy označené V4. Vyšší tepelný výkon hořáku opět ovlivnil rychlost proudění, tedy byla spočtena oproti nižšímu tepelnému výkonu hořáku jako vyšší přibližně o hodnotu 1 m/s. V grafech lze zpozorovat ustálenější průběh s mírným kolísáním jako v předchozích případech a na vizualizacích na obr. 42 je patrné rozložení rychlosti proudění ve směru řezu kolmého na osu x v hloubce 10 mm. Opět je patrné, že nejvyšší rychlost proudění byla spočtena v oblasti přímo nad hořákem, směrem k okrajům se výrazně snižovala.



obr. 42: Dutina 70 mm – rychlost proudících plynů v dutině ve vzdálenosti 10 mm od líce zadní desky, a) měřené rychlostními sondami V1–V4, b) vizualizace rozložení rychlosti v čase 120 s (m/s), c) vizualizace rozložení rychlosti v čase 240 s (m/s)

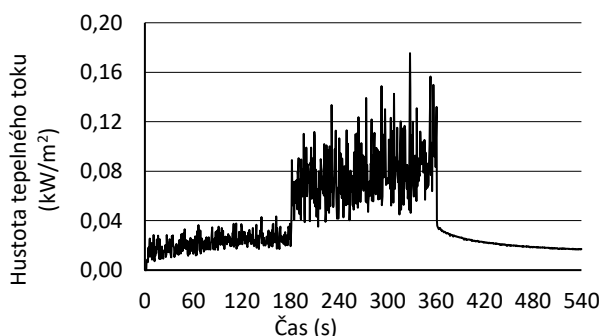
V případě tlakových změn opět i u dutiny šířky 70 mm byly vypočítány značně kolísající hodnoty, proto byly rovněž nahrazeny funkcí klouzavého průměru. Stejně jako u dutiny šířky 50 mm byl klouzavým průměrem zobrazen v grafu (obr. 43) negativní tlak, a to u všech čtyř

měřících zařízení. Jedná se o rozmezí hodnot 0–0,5 Pa, pokud není nahlíženo na lokální extrém.



obr. 43: Dutina 70 mm – průběh tlakových rozdílů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky
a) naměřený pomocí P1–P4, b) aritmetický průměr

Poslední prezentovanou veličinou je sálavá složka tepelného toku zaznamenávaná radiometrem. Jako v případě dutiny 50 mm se ale jedná o téměř zanedbatelnou hodnotu, neboť spočtené maximum se pohybuje kolem $0,17 \text{ kW/m}^2$ v případě vyššího výkonu hořáku, což je čitelné z grafu na obr. 44.



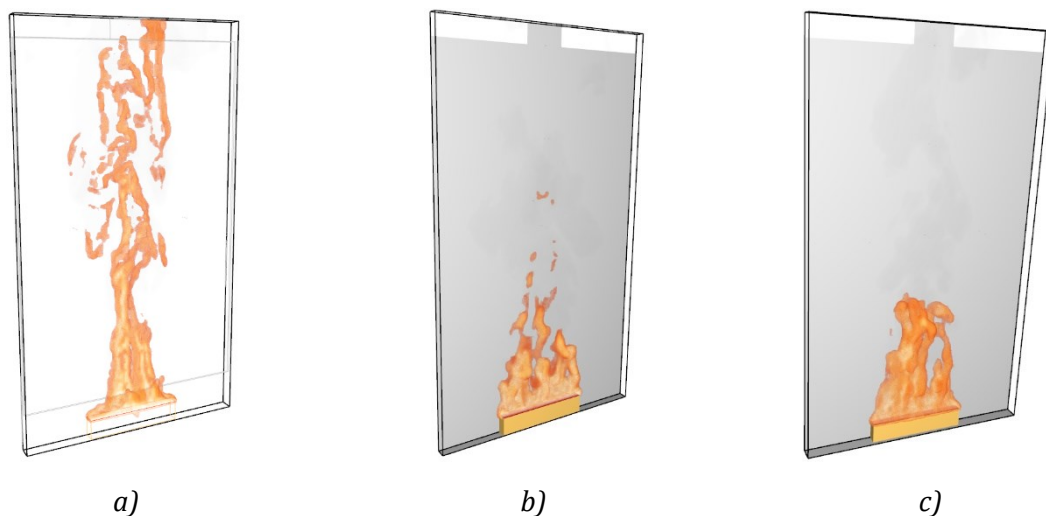
obr. 44: Dutina 70 mm – průběh spočítané hustoty tepelného toku

3.2.4 Porovnání modelovaných případů

Pro prezentování vlivu šířky dutiny na chování požáru v rámci matematického CFD modelu byla vybrána data, která jsou představena jak v podobě grafu, tak i v podobě vizualizací, jenž jasně naznačují znatelné rozdíly hodnot pozorovaných veličin.

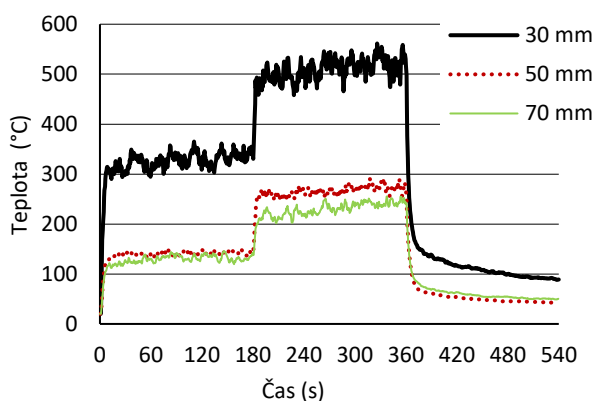
V první řadě je vizuálně porovnána výška plamene v jednotlivých modelech. Z obr. 45 je patrné, že v dutině šířky 30 mm byl plamen schopen v průběhu vizualizace prošléhávat po celé výšce modelované dutiny. V případě dutiny 50 mm byla oblast plamenného hoření výrazně nižší a plameny občasně prošlehlly maximálně do dvou třetin výšky dutiny. U dutiny šířky 70 mm byla oblast plamenného hoření srovnatelně vysoká jako v případě dutiny

50 mm, nicméně již nedocházelo k žádnému prošlehávání plamenů do vyšších úrovní jako v předchozích případech.



obr. 45: Vizualizace plamenu z programu PyroSim přibližně v čase 240 s: a) v dutině šířky 30 mm, b) v dutině šířky 50 mm c) v dutině šířky 70 mm

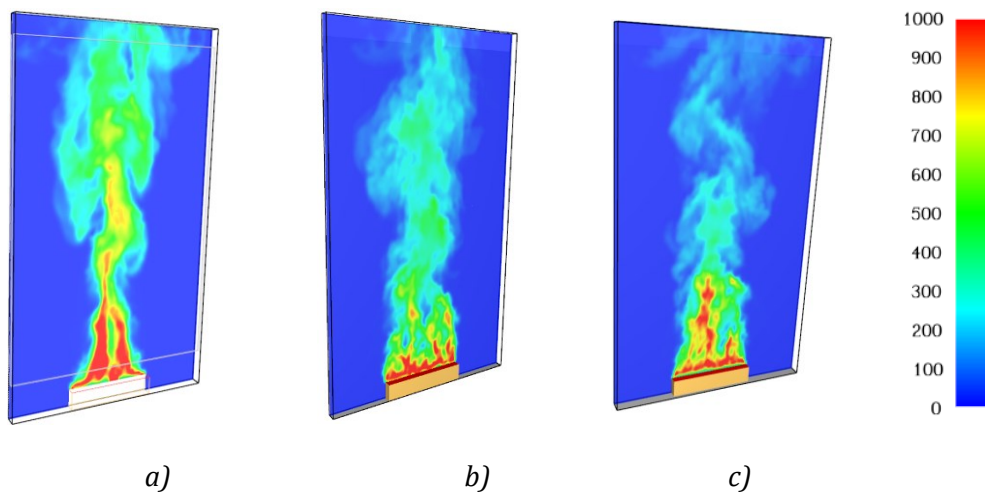
Šířka dutiny v modelu měla značný vliv i na průběh teploty plynů. Následující graf potvrzuje předpoklad, že širší dutiny má vliv na teploty v ní dosažené, a to ve smyslu, že čím užší dutina je, tím vyšší teploty jsou dosaženy. Jedná se pouze o graf s aritmetickými průměry z hodnot z termočlánků TC₁-TC₄. Vzhledem k množství prezentovatelných dat jsou hodnoty z TC₁-TC₄ porovnány jednotlivě v příloze 2. V dutině šířky 30 mm byly spočteny teploty značně vyšší, téměř s rozdílem 200 °C oproti 50 mm dutině. Dutiny širší 50 a 70 mm mezi sebou vykazovaly rozdíl v řádu desítek °C.



obr. 46: Aritmetický průměr průběhu teplot plynů v dutině ve vzdálenosti 10 mm od líce zadní desky

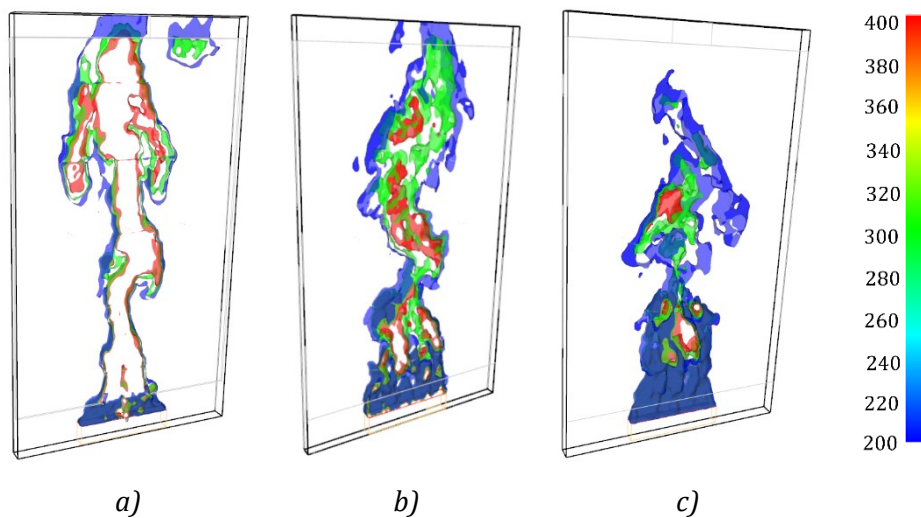
Dále jsou dosahované teploty v dutinách porovnány vizuálně isoplochami, resp. tedy řezy v hloubce 10 mm, ve kterých je díky sjednocené stupnici včetně barevného odlišení vidět značný rozdíl, který vyplývá i z grafu výše. Z obr. 47 je patrné, že v dutině šířky 30 mm bylo po výšce vzorku dosahováno vyšších teplot než v dutinách širších, kde došlo

k promísení s okolním chladným vzduchem. Ve všech případech ale platí, že nejvyšších teplot bylo dosaženo v oblasti nad hořákem, směrem ke krajům se teplota v dutině snižovala.



obr. 47: Vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim, řez kolmý na rovinu x v hloubce dutiny 10 mm v čase 240 s: a) v dutině šířky 30 mm, b) v dutině šířky 50 mm, c) v dutině šířky 70 mm, včetně teplotní škály ($^{\circ}\text{C}$)

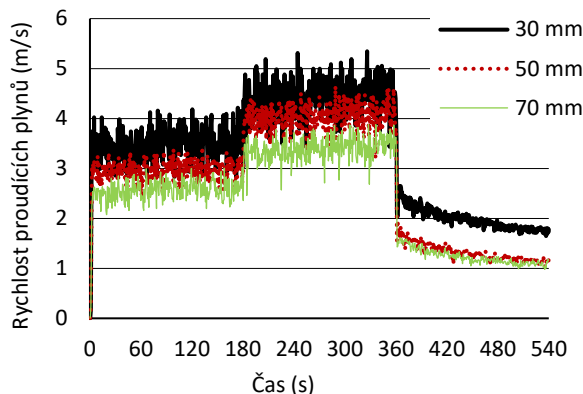
Rovněž zajímavé je vizuální porovnání 3D isoplochami, kdy pro jejich vykreslení byly zadefinovány tři hodnoty teplot, tedy 200, 300 a 400 $^{\circ}\text{C}$. Z přiložených vizualizací (obr. 48) lze pozorovat, že v dutině 30 mm je sloupec vymezený těmito isoplochami výrazně vyšší a objemnější než ve zbylých dvou případech.



obr. 48: 3D vizualizace rozložení teplot z programu PyroSim v čase 240 s: a) v dutině šířky 30 mm, b) v dutině šířky 50 mm, c) v dutině šířky 70 mm, včetně teplotní škály ($^{\circ}\text{C}$)

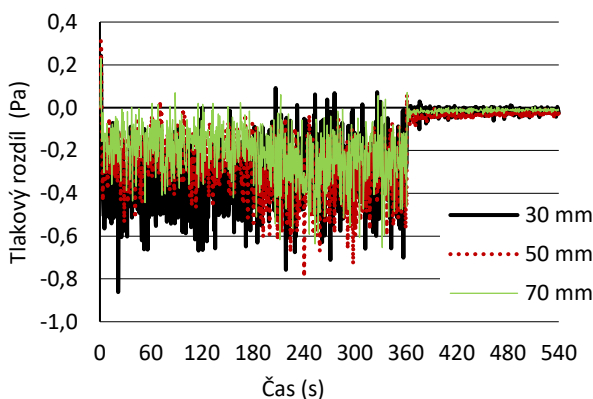
Rovněž rychlost proudění plynů v dutině vykazuje rozdílné hodnoty ve všech třech modelech. V následujícím grafu jsou porovnány aritmetické průměry rychlosti proudění z měřících zařízení V1–V4 umístěných ve sloupci. Všechny tyto průběhy jsou relativně ustálené konstantní s drobnými fluktuacemi, vzájemně se od sebe průběhy odlišují přibližně

o 0,25 m/s. Dále je také pozorovatelné, že při zvýšení výkonu hořáku z 10 kW na 20 kW došlo i k navýšení rychlosti proudění, a to cca o 1 m/s ve všech případech. Extrémy v rychlosti proudění lze zpozorovat především u nejužší dutiny, tyto extrémy přesahují hodnotu 5 m/s. Vizuální porovnání ve smyslu isoploch/řezů jako v předchozím případě teplot není provedeno, neboť program PyroSim neumožňuje v tomto případě sjednotit stupnici do stejných hodnot, tudíž by vizualizace mohly být značně zkreslující a zavádějící.



obr. 49: Průběh rychlostí proudění plynů v dutinách šířek 30, 50 a 70 mm simulovaných ve vzdálenosti 10 mm od líce zadní desky, porovnání hodnot získaných spočtením aritmetického průměru z rychlostní sond V1–V4

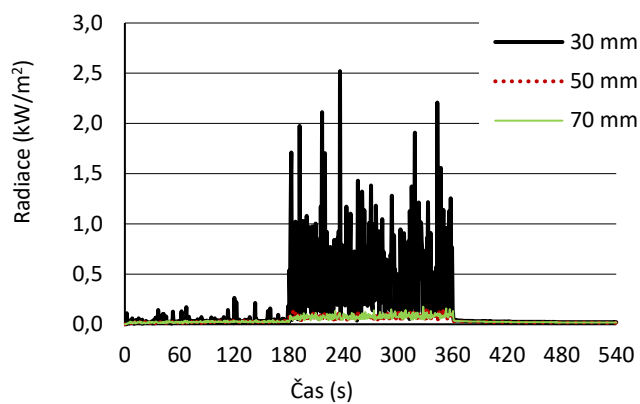
Vliv šířky dutiny byl rovněž znatelný i v případě pozorování průběhu tlakových rozdílů. S rozšířením dutiny se spočtený tlakový rozdíl snižoval. Tento jev je pozorovatelný z přiloženého grafu na obr. 50, kdy byly opět porovnány spočtené hodnoty ze zařízení měřících změnu tlaku P1–P4. Také je viditelné, že změna výkonu hořáku měla význam ve smyslu zvýšení frekvence a rozsahu fluktuací.



obr. 50: Průběh tlakových rozdílů plynů v dutinách šířek 30, 50 a 70 mm simulovaných ve vzdálenosti 10 mm od líce zadní desky, porovnání hodnot získaných spočtením aritmetického průměru ze zařízení P1–P4

Poslední veličinou, u které lze pozorovat vliv šířky dutiny, ač minimálně, je sálavá složka tepelného toku. Porovnání grafem na obr. 51 poukazuje na fakt, že jediným případem, kdy došlo k zaznamenání významnějších hodnot, bylo v případě 30 mm dutiny při vyšším

výkonu hořáku, v ostatních případech se jedná o zanedbatelné hodnoty v řádech jedné či dvou desetín kW/m^2 . U řečené dutiny šířky 30 mm došlo i ke značnému rozptylu hodnot, maximální spočtená hodnota je cca $2,5 \text{ kW}/\text{m}^2$.



obr. 51: Průběhy spočítané toku v dutinách šířek 30, 50 a 70 mm

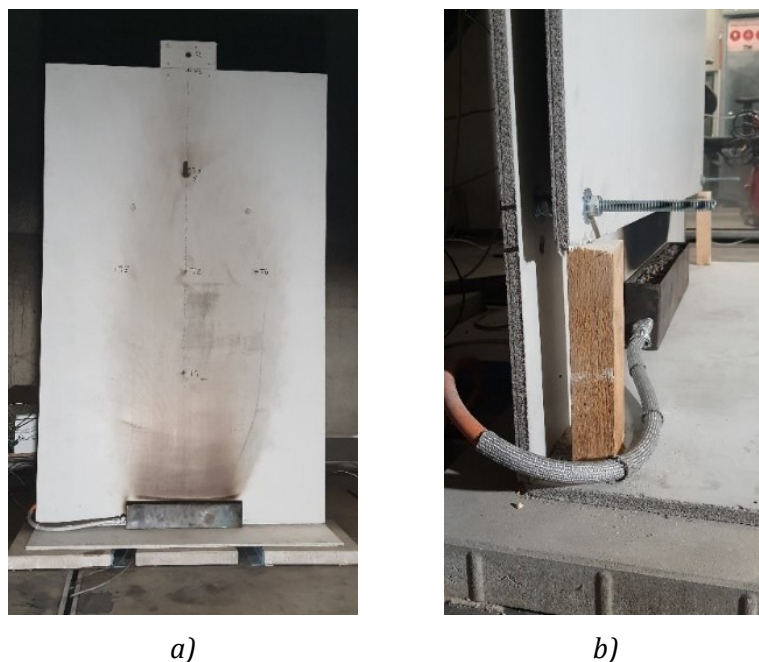
4 Experimentální analýza chování požáru v dutině s různou šířkou

V rámci této diplomové práce bylo umožněno provést experimenty za účelem zkoumání chování požáru ve větrané dutině fasádního systému, a to ve dnech 12. a 13. 11. 2021 v požární laboratoři UCEEB ČVUT v Praze. Série zahrnovala celkem čtyři experimenty, přičemž ve třech z nichž se měnila šířka dutiny a i výkon hořáku ústícího do dutiny větraného fasádního systému a čtvrtý byl proveden bez obkladu a účinků větrané dutiny. Tyto experimenty se neřídily předepsanou zkušební metodikou, ale byly navrženy tak, aby bylo možné provést větší množství účelných experimentů v krátkém časovém sledu, přičemž bylo možno pozorovat vliv rozdílných okrajových podmínek při každé zkoušce zvlášť a následně porovnat naměřená data s výsledky získanými z matematického CFD modelu. Režim zahřívání zkušební sestavy byl totožný s CFD modelem, tedy v čase 0–180 s byl nastaven výkon hořáku na 10 kW, poté došlo ke skokovému nárůstu na 20 kW v časovém rozmezí 180–360 s. Následně byl hořák vypnut a následovala fáze chladnutí vzorku.

4.1 Konstrukce testovaného vzorku

Celá sestava pro experimenty byla navržena tak, aby bylo umožněno provedení většího množství zkoušek v relativně malém časovém rozmezí a zároveň kopírovala sestavu matematického CFD modelu popisovanou v kapitole 3. Referenční zkušební vzorek sestával z nosné konstrukce ocelových ližin, na kterých byla připevněna nehořlavá cementovláknitá deska Fermacell Powerpanel H₂O třídy reakce na oheň A1 a tloušťky 12,5 mm. Jako druhá deska představující fasádní obklad byla použita rovněž cementovláknitá deska Fermacell Powerpanel. Dutina nebyla vyplněna žádným izolačním materiálem obdobně jako v CFD modelu.

Konstrukce všech zkoušených vzorků byly stejné, dané rozměrem zadní celistvé desky, a to 1250 x 2000 mm. Tato deska byla přes šrouby, matice a pérové podložky připevněna k ocelovým ližinám. Na tuto desku byla následně zavěšena přes závitové tyče s maticemi, a podložkami druhá cementovláknitá deska, dodatečně byla na dvou místech ve spodu podepřena z důvodů stability. Toto zavěšení umožňovalo snadnou a rychlou rektifikovatelnost, co se týče přesné šířky dutiny, přičemž absence klasického roštu umožňovala boční pohled do větrané dutiny. Přední deska byla rozměrů 1250 x 1800 mm a posazena o 200 mm nad úroveň ±0,000 vzorku z toho důvodu, aby bylo umožněno přisávání vzduchu do dutiny fasádního systému, ale také aby bylo umožněno pozorování plamene nad hořákem zepředu. Dodatečně byl na vrchu vzorku přikotven přířez cementovláknité desky, do které byl před experimenty vyvrtán otvor a vložen vodou chlazený radiometr. Celá konstrukce včetně detailu kotvení předsazené fasádní desky je patrná na obr. 52.



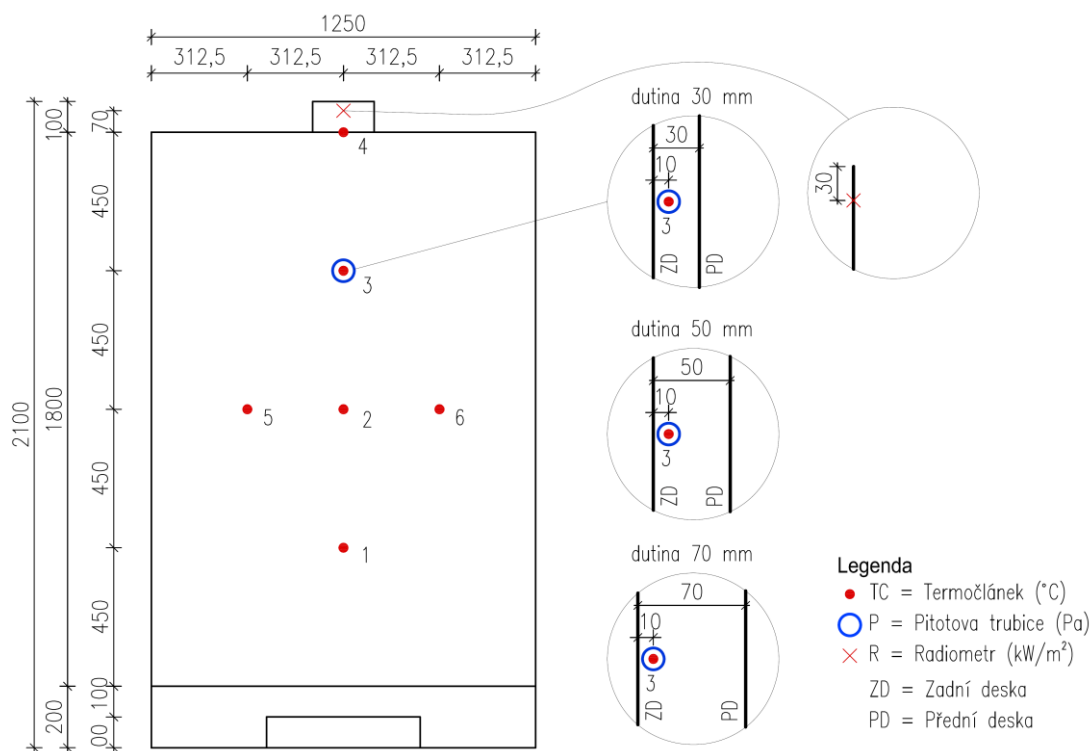
obr. 52: a) zkušební sestava, b) detail kotvení a podepření přední cementovláknité desky

Na spodek vzorku byly umístěny betonové dlaždice a na ně přířez cementovláknité desky, jejíž horní líc pro experiment představoval úroveň $\pm 0,000$. Na ni byl umístěn pískový propanový hořák délky 500 mm, výšky 100 mm a šířky 50 mm, který byl umístěn v těsné blízkosti zadní desky.

4.2 Měřené veličiny

Měřeny byly především teploty plynů ve větrané dutině. Pro tento účel posloužilo 6 termočlánků typu K, přičemž byly použity termočlánky o průměru 3 mm a 1,5 mm. Slabší termočlánky byly umístěny v horní části vzorku, kde je požadovaná citlivější odezva, zatímco v blízkosti hořáku byly umístěny termočlánky většího průměru, které vykazují nižší fluktuační měřených teplot. Termočlánky byly rozmístěny totožně jako v matematickém CFD modelu (viz obr. 22 a obr. 54) v ose vzorku ve sloupci po výšce 650, 1100, 1550 a 2000 mm od $\pm 0,000$. Ve výšce 1100 mm byly umístěny termočlánky T5 a T6, a to ke každému kraji ve vzdálenosti cca 312,5 mm od středního sloupce. Dále pomocí Pitotovy trubice byly měřeny změny tlaku v dutině u termočlánku T3 ve výšce 1550 mm. Změřené změny tlaku vyhodnocoval tlakový převaděč od výrobce CRESSTO typu SV – snímač tlaku s měřícím rozsahem na desetinu Pa. Naměřené tlakové změny pomocí Pitotovy trubice je případně dále možné přepočítat na rychlost proudění horkých plynů v dutině. Nicméně se stále jedná o rozsáhlou a velmi specifickou problematiku, zejména co se týče turbulentního proudění vzduchu, které se věnovaly práce [34] a [35]. V neposlední řadě byl měřen tepelný tok pomocí radiometru umístěného ve výšce přibližně 2070 mm od $\pm 0,000$. Jednalo se o radiometr chlazený vodou typu Schmidt-Boelter s měřícím rozsahem 0–100 kW/m².

Všechna zmíněná měřicí zařízení jsou zanesena ve schématu na obr. 53. Závěrečným sledovaným aspektem bylo vizuální pozorování plamene a požáru v dutině a vliv jednotlivých aspektů, které byly měněny v průběhu zkoušek, na jeho chování.



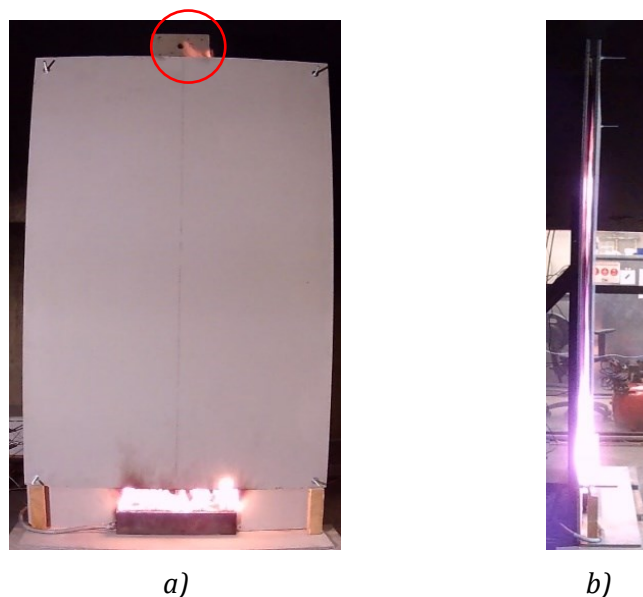
obr. 53: Schéma rozmiřtění měřicích zařízení v experimentu

4.3 Diskuse získaných výsledků a porovnání s CFD modelem

Tři dutiny o šířkách 30, 50 a 70 mm jsou vyhodnoceny každá zvlášť, přičemž jsou porovnány s CFD modelem a také s experimentem, ve kterém nebyla umístěna předsazená deska a větraná dutina tedy nevznikla. To umožňuje poměrně zajímavé zamyšlení, jaká rizika větraná dutina představuje oproti jiným fasádním systémům bez ní. Na závěr jsou mezi sebou porovnány experimentální analýzy pouze mezi sebou nezávisle na CFD modelech. Výsledky jsou prezentovány ve stejném sledu jako u CFD modelu, tedy vizuální pozorování, teplota plynů, tlaková změna naměřená Pitotovou trubicí a závěrem radiace horkých plynů.

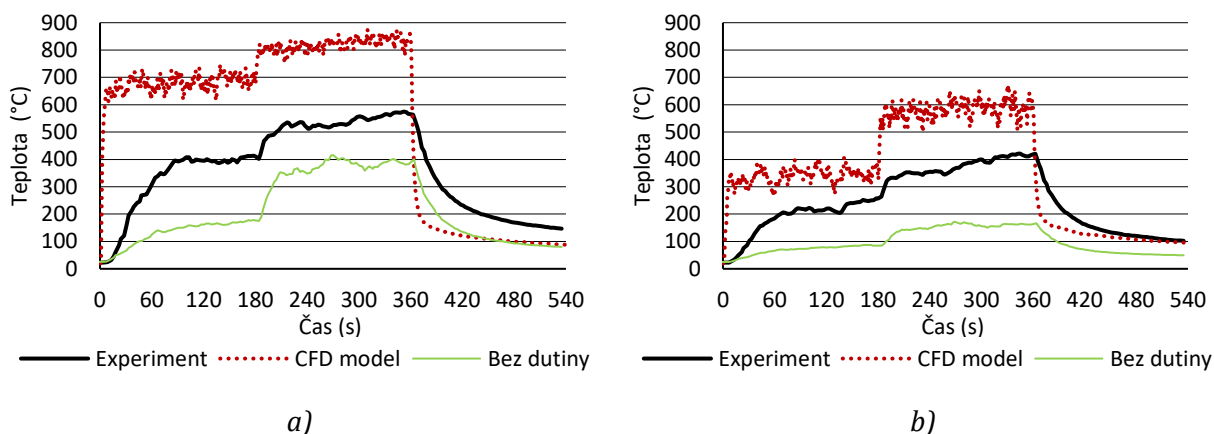
4.3.1 Experiment s dutinou šířky 30 mm

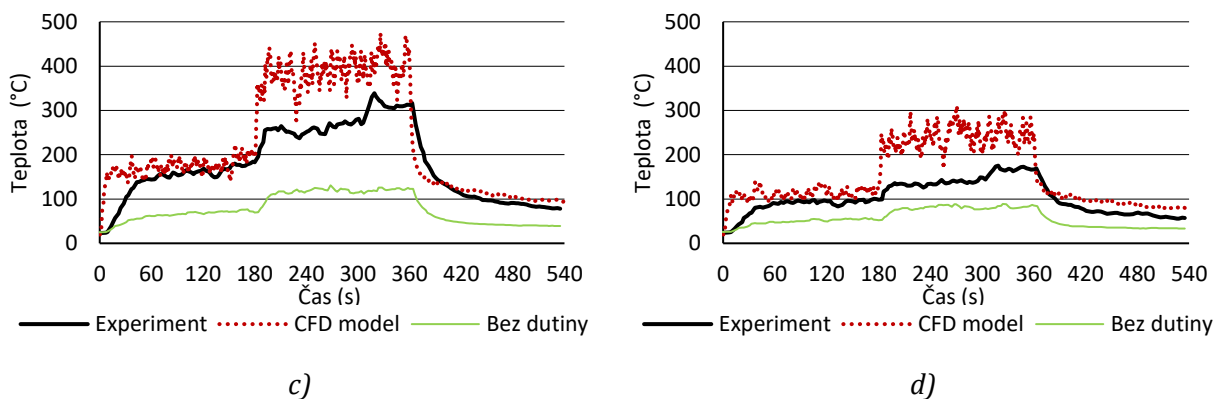
V průběhu tohoto experimentu s dutinou šířky 30 mm bylo možné pozorovat občasné prošlehnutí plamene nad horní hranou vzorku. Tento jev je patrný na obr. 54, který byl pořízen jakožto výřez z videozáznamu z průběhu zkoušky.



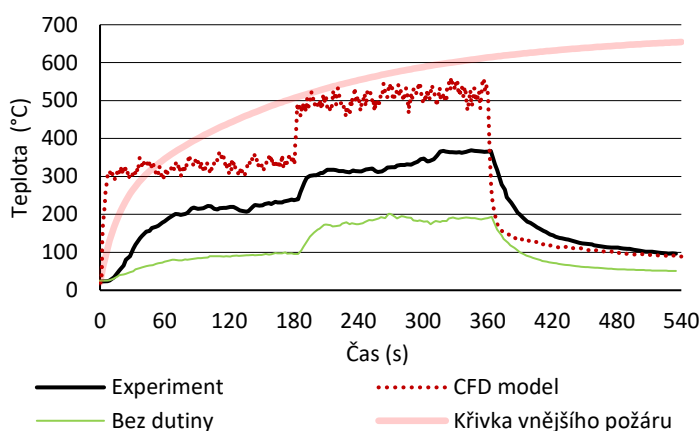
obr. 54: Pohled na sestavu při prošlehávání plamene po celé výšce dutiny šířky 30 mm: a) zepředu, b) z boku

Průběhy teplot horkých plynů byly zaneseny do grafů a porovnány s CFD modelem dutiny šířky 30 mm. V grafech jsou prezentovány naměřené hodnoty z termočlánků TC_1 až TC_4, ze kterých je patrné, že CFD model předpovídal vyšší teploty, než jaké byly naměřeny při experimentu, jedná se o rozdíl přibližně kolem 100–200 °C. Nejvyšší naměřenou hodnotou byla teplota 566 °C. Ačkoliv byla sestavena výhradně z materiálu třídy reakce na oheň A1, tak v průběhu zkoušky byla v oblasti termočlánků TC_1 a TC_2 překročena teplota 350 °C, při které by mohlo dojít ke vzplanutí většiny hořlavých materiálů, pokud by byly do dutiny umístěny. Rovněž byl do porovnání zahrnut i vzorek bez obkladové desky, u něhož jsou plameny výrazně nižší (viz přílohu 3 – fotodokumentace) a naměřené teploty jsou znatelně nižší než v případě experimentální analýzy i CFD modelu.



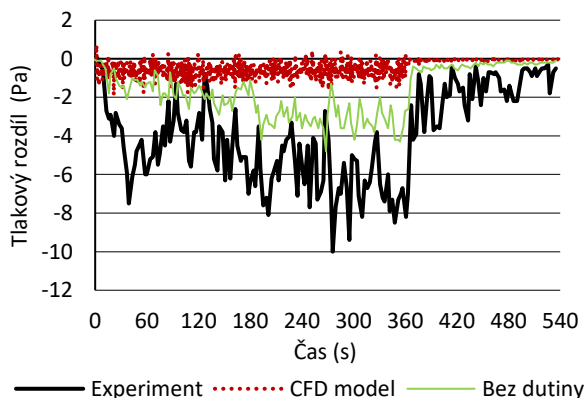


obr. 55: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 30 mm mezi experimentem a CFD modelem pro termočlánky: a) TC_1, b) TC_2, c) TC_3, d) TC_4



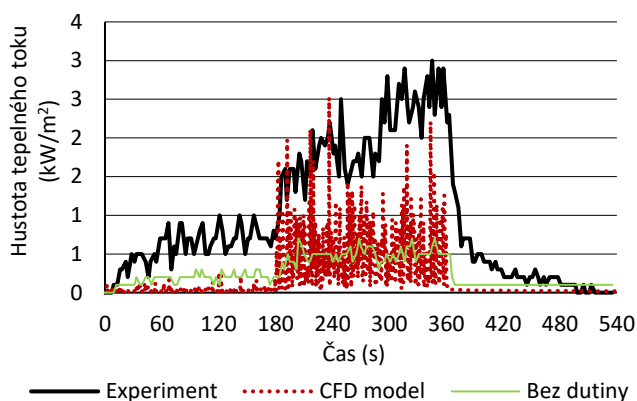
obr. 56: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 30 mm mezi experimentem a CFD modelem, aritmetický průměr z průběhu teplot naměřených termočlánky TC_1-TC_4

Tlakový rozdíl v dutině byl měřený Pitotovou trubicí v místě termočlánku TC_3, tedy ve výšce 1550 mm. Při porovnání s modelem lze pozorovat rozdílné hodnoty, kdy CFD model předpokládal kolísání kolem 1 Pa negativního tlaku, ale skutečné hodnoty naměřené v dutině se pohybovaly kolem 5 Pa negativního tlaku či více, přičemž bylo možné pozorovat výrazné fluktuace a extrémy směřovaly až k 10 Pa.



obr. 57: Porovnání průběhu tlakových rozdílů uvnitř dutiny šířky 30 mm mezi experimentem a CFD modelem

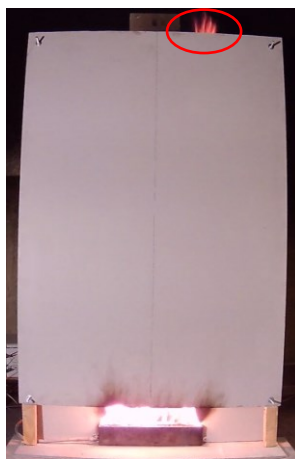
Průběh hustoty tepelného toku byl při zkoušce o něco vyšší než předpokládal CFD model, maxima dosahovala k hodnotě 4 kW/m². Tento rozdíl může být způsoben odlišným zjišťováním tepelného toku, v CFD modelu bylo definováno zařízení měřící čistě radiační složku tepelného toku, zatímco radiometr při experimentu měřil celkový dopadající tepelný tok, tedy konvekční složku i radiační složku zároveň.



obr. 58: Porovnání průběhu hustoty tepelného toku uvnitř dutiny šířky 30 mm mezi experimentem a CFD modelem

4.3.2 Experiment s dutinou šířky 50 mm

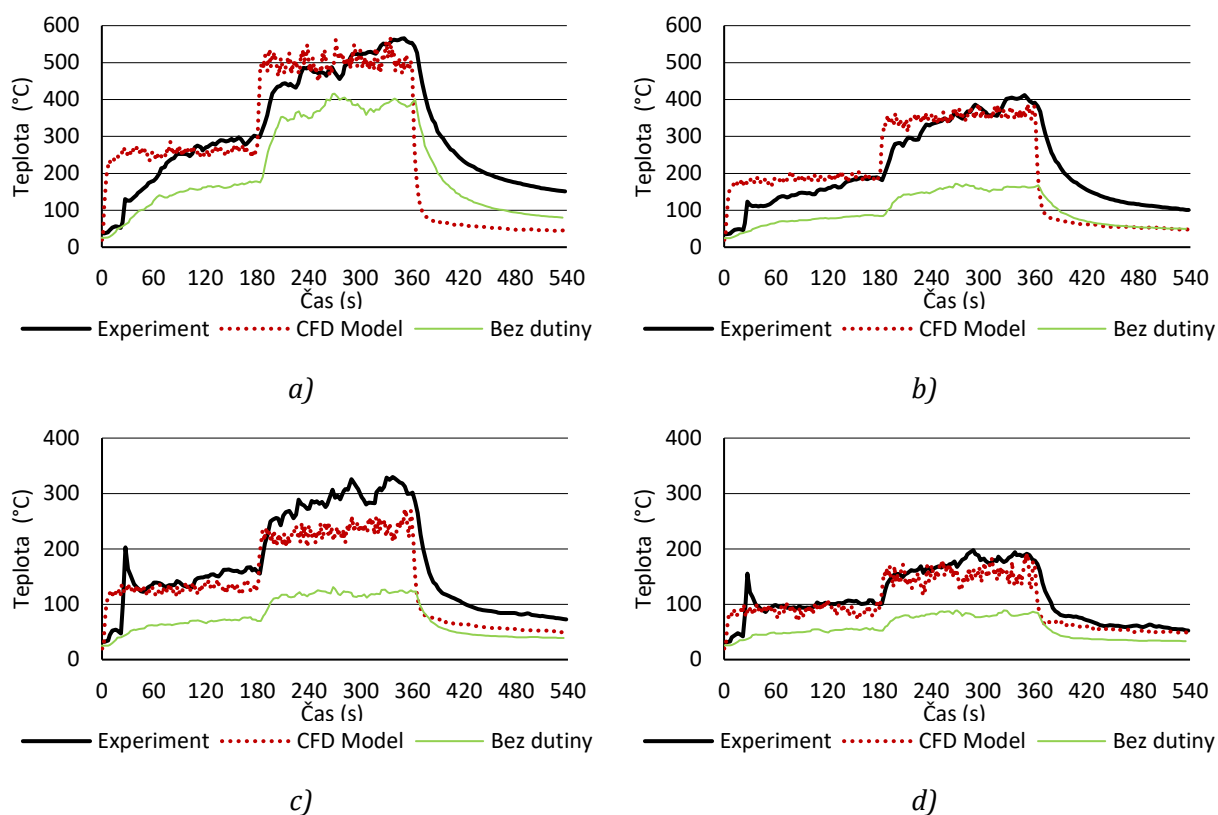
V průběhu experimentu s dutinou šířky 50 mm bylo možné pozorovat občasné prošlehnutí plamene nad horní hranou vzorku (obr. 59), avšak tento jev nebyl tak frekventovaný jako v případě dutiny šířky 30 mm.



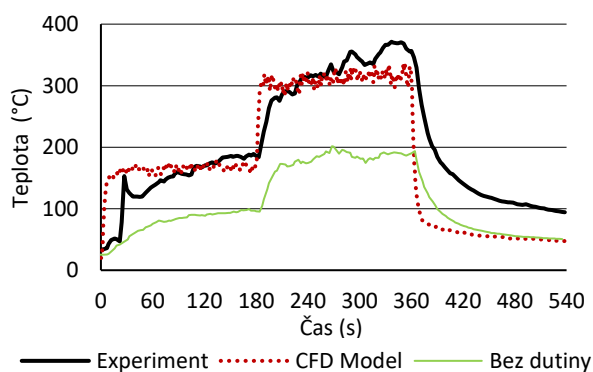
obr. 59: Pohled na sestavu při prošlehávání plamene po celé výšce dutiny šířky 50 mm

Stejně jako v předchozím případě dutiny šířky 30 mm byly naměřená data zanesena do grafů a následně porovnány s výsledky CFD modelu, kdy se jedná pouze o termočlánky TC_1–TC_4. Na grafech je patrné, že v případě všech termočlánků CFD model předpověděl přesný průběh teplot s maximálním rozdílem pohybujícím se kolem teplot 50 °C. Nejvyšší naměřené teploty se blíží k 550 °C. Do porovnání jako v předchozím případě byl zahrnut i vzorek bez obkladu, kde je z grafů zřejmé, že teploty v dutině jsou mnohem vyšší než u vzorku bez

vznikající dutiny. Velmi dobré shody bylo dosaženo i při spočtení aritmetického průměru z celého sloupce termočlánků TC_1–TC_4 (obr. 61).

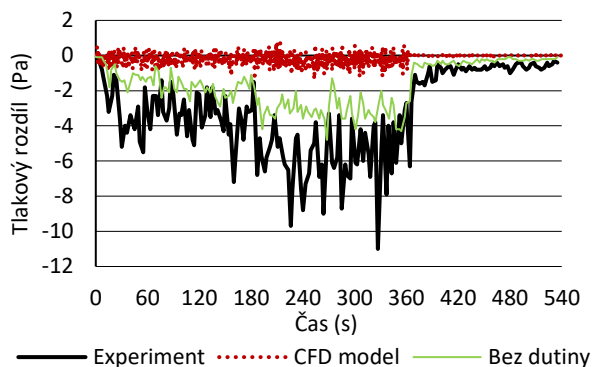


obr. 60: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 50 mm mezi experimentem a CFD modelem pro termočlánky: a) TC_1, b) TC_2, c) TC_3, d) TC_4



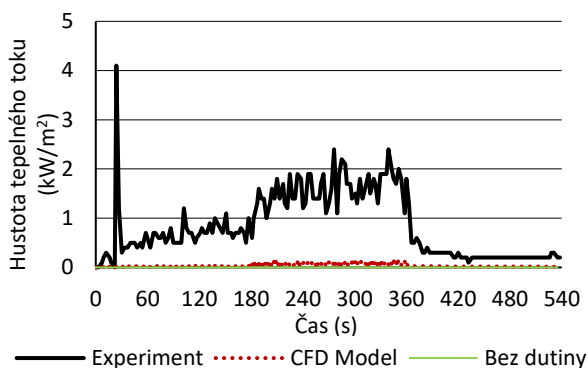
obr. 61: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 50 mm mezi experimentem a CFD modelem, aritmetický průměr z průběhu teplot naměřených termočlánky TC_1–TC_4

V dutině šířky 50 mm je možné pozorovat stejně jako v předchozím případě značný nesoulad s propočtem matematického CFD modelu co se týče průběhu tlakových rozdílů. V průběhu experimentu bylo dosahováno mnohem vyšších tlakových rozdílů než bylo předpokládáno. Jednalo se opět o hodnoty pohybující se kolem 5 Pa negativního tlaku či více a se značným kolísáním a extrémy až 10 Pa.



obr. 62: Porovnání průběhu tlakových rozdílů uvnitř dutiny šířky 50 mm mezi experimentem a CFD modelem

Poslední hodnocenou veličinou je hustota tepelného toku, jejíž průběh je zobrazen na grafu v obr. 63. Je nutné upozornit na jev vyskytující se při začátku zkoušky, kdy došlo k nahromadění nespáleného plynu v dutině a následně prošlehnutí silného plamene po celé výšce vzorku, který způsobil prudký nárůst hustoty tepelného toku. Po následném okamžitém poklesu již hodnoty plynule vzrůstaly k hodnotám pohybujícím se kolem 2 kW/m^2 , což je značně rozdílná oproti CFD modelu, který předpokládal téměř nulovou hodnotu. Jak již bylo řečeno u prvního experimentu, tento rozdíl může být daný rozdílným způsobem měření, kdy v experimentu je měřena celková hodnota hustoty tepelného toku, tedy jak konvekční, tak i radiační složka.



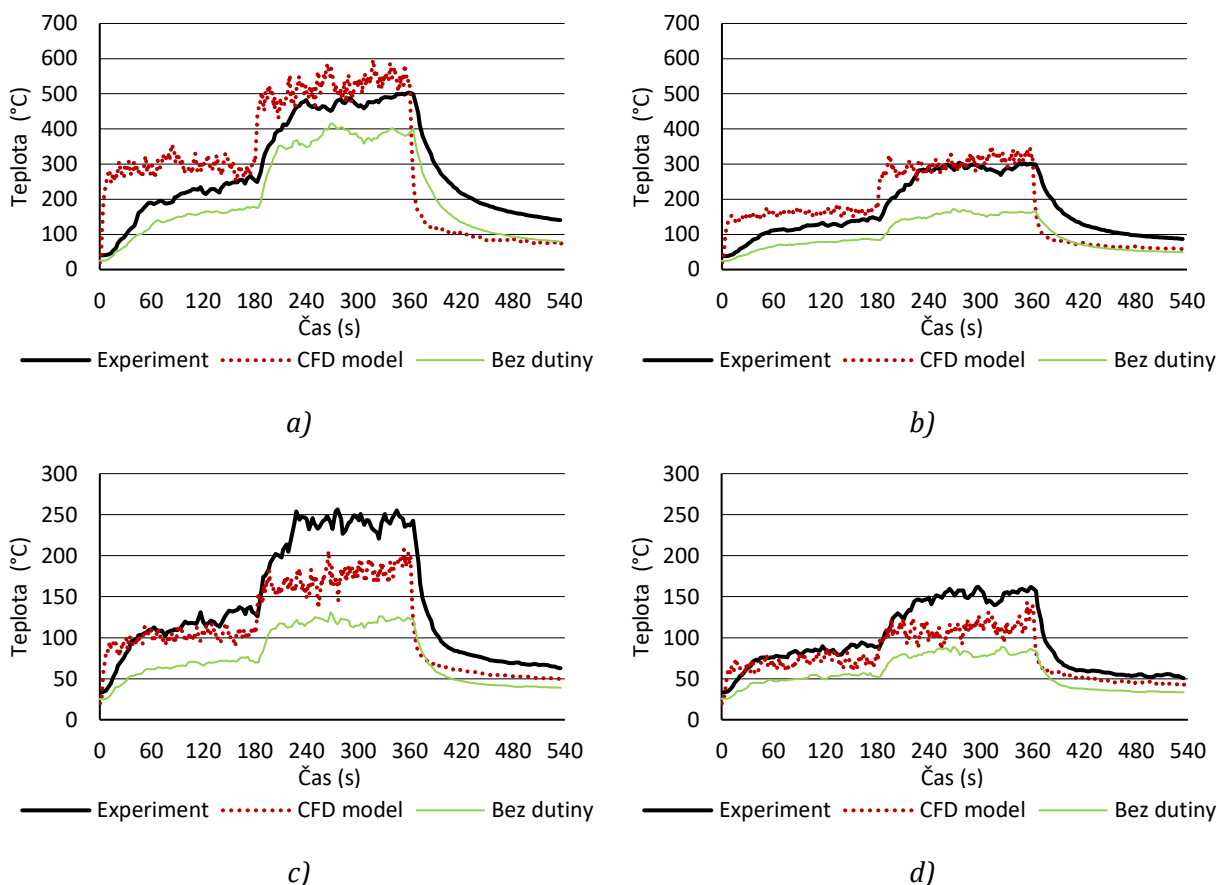
obr. 63: Porovnání průběhu hustoty tepelného toku uvnitř dutiny šířky 50 mm mezi experimentem a CFD modelem

4.3.3 Experiment s dutinou šířky 70 mm

V dutině šířky 70 mm v průběhu experimentu již nedocházelo k prošlehávání plamene nad horní hranu vzorku, maximální výška plamene se přibližovala do $2/3$ výšky celého vzorku, viz přílohu 3 (fotodokumentace).

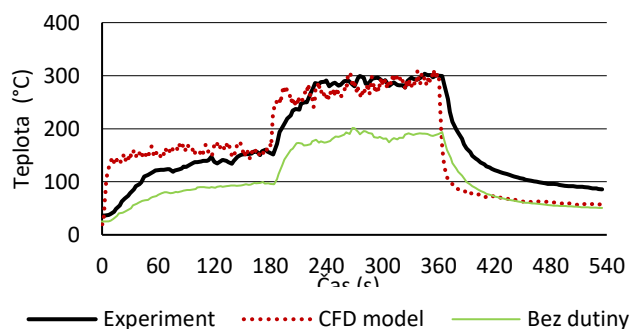
Shodně jako u dutiny šířky 50 mm byla vyhodnocená data z termočlánků podobná těm, které byly získané výpočtem z CFD modelu, krom termočlánku TC_3, kdy došlo k naměření výrazněji vyšších teplot, než bylo předpovězeno matematickým modelem, a to přibližně

o 50–100 °C. Nejvyšší teploty byly naměřeny v oblasti plamenného hoření, tyto teploty dosahovaly až hodnoty 500 °C. V dutině, ačkoliv už je poměrně široká, je stále dosahováno vyšších teplot než u vzorku bez obkladu, resp. bez dutiny.



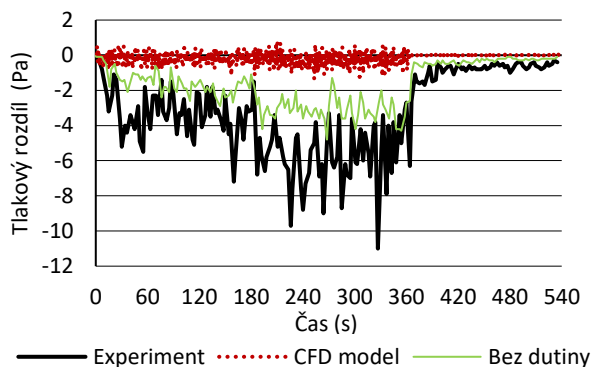
obr. 64: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 70 mm mezi experimentem a CFD modelem pro termočlánky: a) TC_1, b) TC_2, c) TC_3, d) TC_4

Velmi přesných výsledků bylo dosaženo i při spočtení aritmetického průměru z celého sloupce termočlánků TC_1–TC_4 (obr. 65). CFD model vykazoval pozorovatelný rozdíl pouze v případě zahřívání, tedy prvních 60 sekund a poté až ve fázi chladnutí.



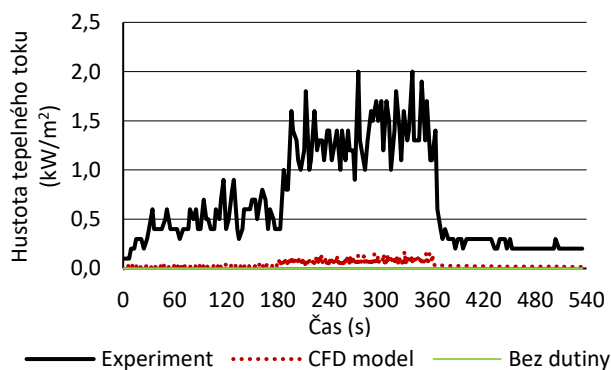
obr. 65: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 70 mm mezi experimentem a CFD modelem, aritmetický průměr z průběhu teplot naměřených termočlánky TC_1–TC_4

Stejně i v posledním případě experimentu lze z grafu vyzorovat značně rozdílný průběh tlakových rozdílů experimentu vůči CFD modelu. Obdobně jako v předchozím případě byly naměřeny hodnoty kolem 5 Pa negativního tlaku či více a se značným kolísáním a extrémy až 10 Pa.



obr. 66: Porovnání průběhu tlakových rozdílů uvnitř dutiny šířky 70 mm mezi experimentem a CFD modelem

Hustota tepelného toku je stejně jako v případě dutiny šířky 50 mm značně rozdílná oproti CFD modelu, který předpokládal radiační složku tepelného toku za téměř zanedbatelnou. Toto může být způsobeno, jak již bylo řečeno, rozdílným způsobem měření tepelného toku jak v modelu, tak ve skutečnosti při experimentu. Tepelný tok se liší oproti modelu hodnotami přibližně $1,5 \text{ kW/m}^2$.



obr. 67: Porovnání průběhu hustoty tepelného toku uvnitř dutiny šířky 70 mm mezi experimentem a CFD modelem

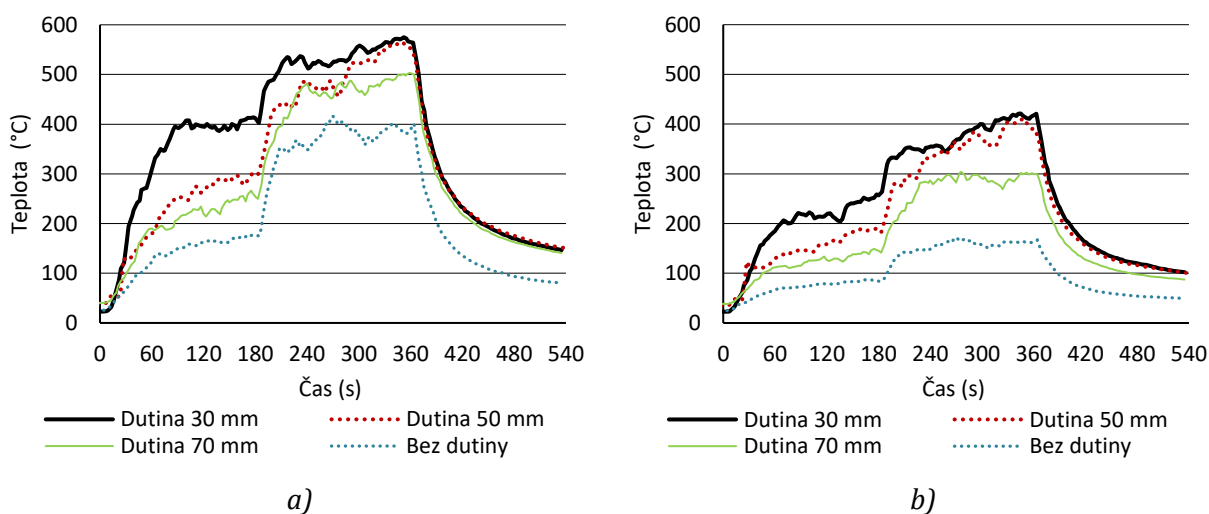
4.3.4 Porovnání experimentálních analýz

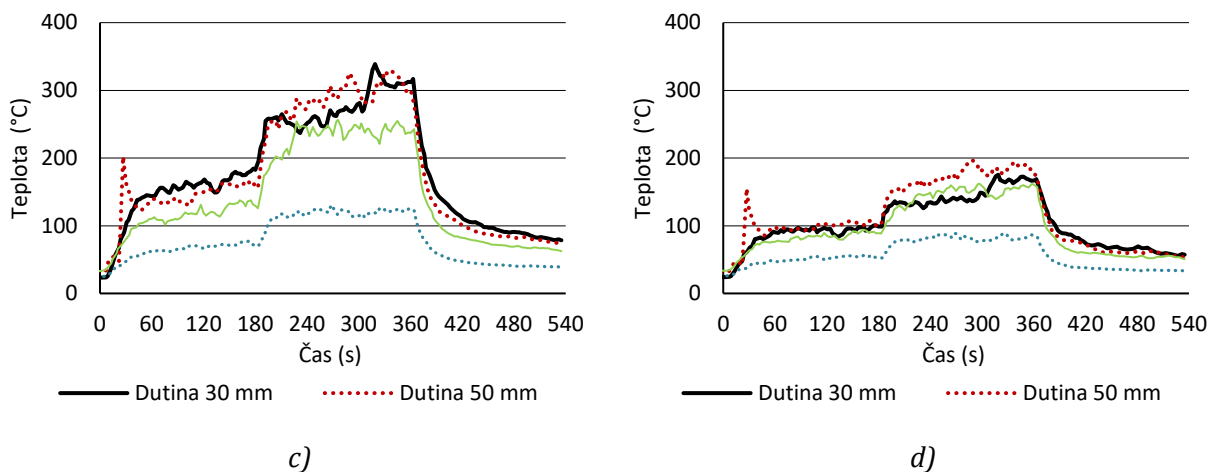
Stejně jako v CFD modelu byl pozorovatelný vliv šířky dutiny na výšku plamene, čím užší dutina byla, tím vyšší byly pozorovány plameny, rovněž také v užší dutině docházelo častěji k prošlehávání plamene po celé výšce vzorku. Tento fakt je patrný z přiložených obrázků, které sice nejsou pořizeny z videozáznamu ve stejné sekundě experimentu, ale byly vybrány tak, aby demonstrovaly průměrně dosahovanou výšku plamene zvláště pro každý experiment.



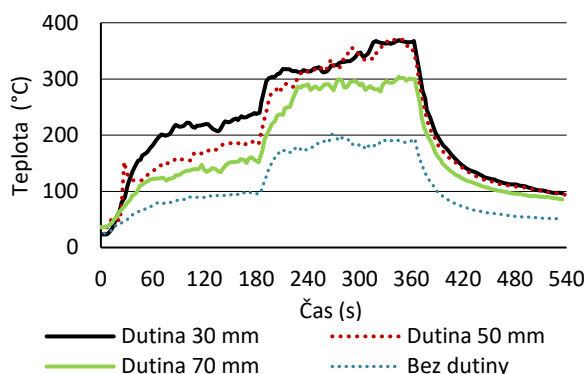
obr. 68: Vizuální zhodnocení průměrné dosahované výšky plamene z průběhu zkoušek pořízených z boku kamerou v dutině: a) šířky 30 mm, b) šířky 50 mm c) šířky 70 mm

Šířka dutiny, stejně jako v matematickém CFD modelu, měla vliv na průběh teploty plynů, ačkoliv nebylo možné pozorovat takový razantní rozdíl, který CFD model předpovídal. U termočlánků TC₁–TC₂ je možné zpozorovat trend (obr. 69), že čím užší je dutina, tím vyšších teplot je dosahováno. U termočlánku TC₃ dochází k prolínání křivek symbolizujících experimenty s dutinou šířky 30 a 50 mm. U termočlánku TC₄ se všechny křivky proplétají, přičemž zde není znát výrazný vliv šířky dutiny na naměřené teploty. Co se týče aritmetického průměru průběhu teplot z termočlánků TC₁–TC₄, tak je zde opět viditelný vliv šířky dutiny. Nejmarkantnější rozdíl je v počáteční fázi zahřívání vzorků, poté kolem 240. sekundy došlo ke splnutí dvou křivek s průměrným průběhem teplot dutin šířky 30 a 50 mm. Od vzorku s dutinou 70 mm a vzorku bez dutiny je patrný konstantně udržovaný rozdíl pohybující se v řádu desítek až jedné stovky °C.



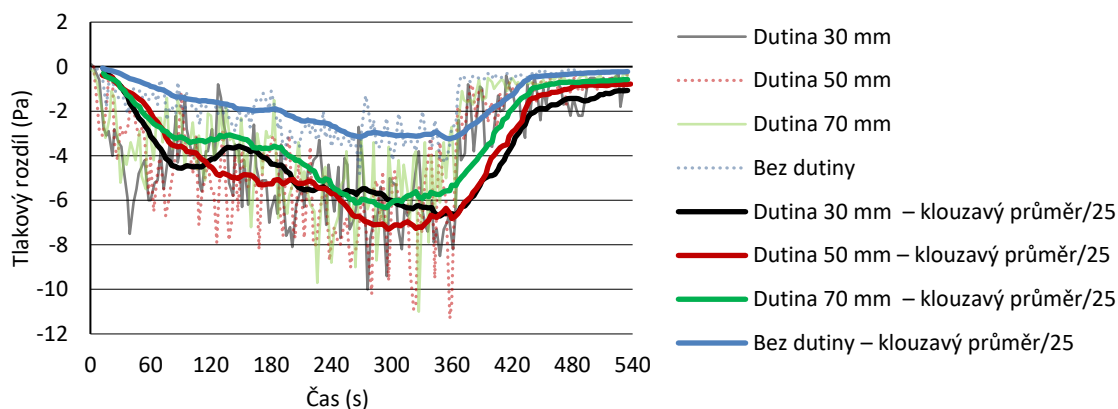


obr. 69: Porovnání průběhu teplot z experimentálních zkoušek naměřených a) termočlánkem TC_1, b) termočlánkem TC_2, c) termočlánkem TC_3, d) termočlánkem TC_4



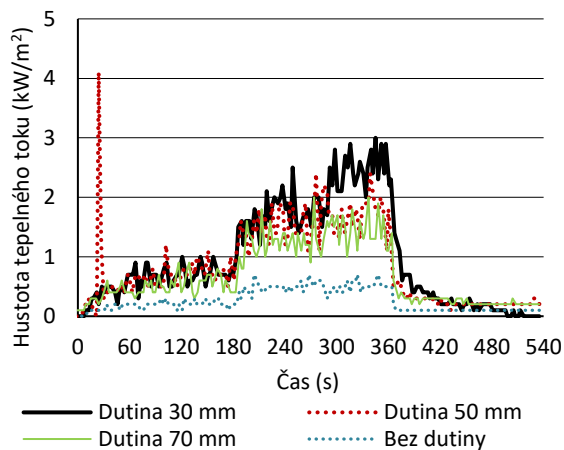
obr. 70: Porovnání aritmetického průměru průběhu teplot naměřených termočlánky TC_1–TC_4

Vzhledem ke značně fluktuujícím průběhům tlakových rozdílů během zkoušek, bylo pro snazší posouzení opět využito funkce klouzavého průměru. Z následujícího grafu je patrné, že při zkoušce jedné desky bez obkladu byly tlakové rozdíly naměřeny nejmenší, poté se v vzestupném pořadí jedná o dutinu šířky 70 mm. U dutiny šířky 30 a 50 mm nelze však jednoznačně prokázat vliv šířky dutiny na naměřené hodnoty, neboť zvýrazněné křivky klouzavých průměrů se v průběhu experimentu prolínají a výrazněji se od sebe nevzdalují.



obr. 71: Porovnání průběhu naměřených tlakových rozdílů při experimentech

Měřená hustota tepelného toku rovněž potvrzuje vliv šířky dutiny. Mezi jednotlivými experimenty jsou pozorovatelné rozdíly, sice v řádech desetin kW/m^2 , nicméně tyto rozdíly jsou v měřítku grafu (obr. 72) patrné. Na počátku zkoušky dutiny 50 mm je viditelný výkyv hodnoty ke $4 \text{ kW}/\text{m}^2$, tento jev je ale vysvětlen v kapitole 4.3.3. Naměřené hodnoty se poté pohybují mezi $1\text{--}3 \text{ kW}/\text{m}^2$ v dutině, mimo dutinu jsou naměřené hodnoty přibližně poloviční.



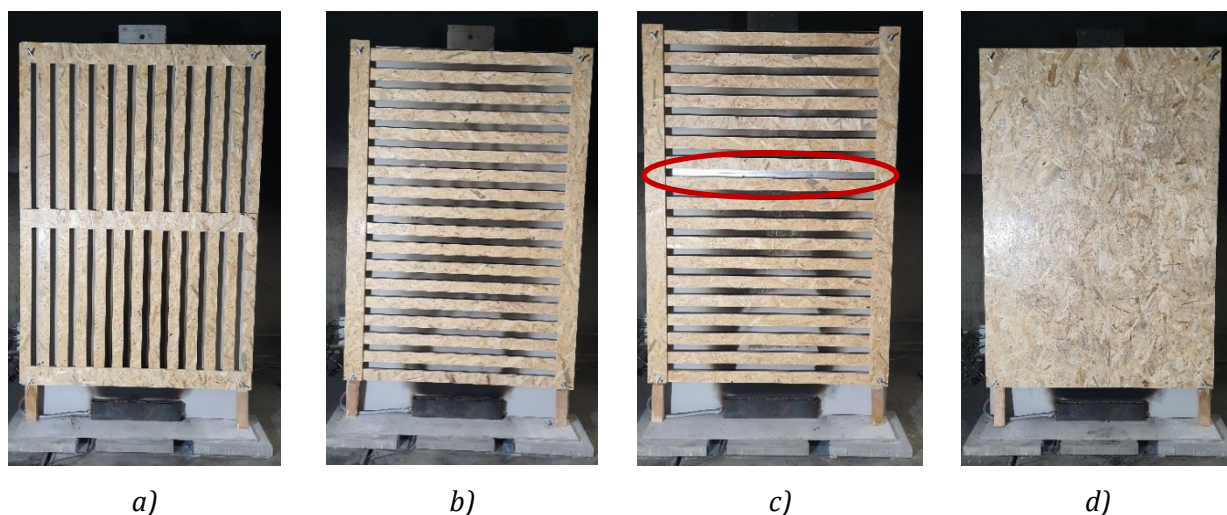
obr. 72: Porovnání průběhu naměřené hustoty tepelného toku

5 Experimentální zkouška větraného fasádního systému s dřevěným obkladem

V požární laboratoři UCEEB ČVUT v Praze byla dále realizována druhá série zkoušek, a to s hořlavým dřevěným fasádním obkladem ve dnech 12. a 13. 11. 2021. Série zahrnovala 4 experimenty, které se od předchozí analýzy liší režimem zahřívání, konstantní šířkou větrané dutiny 50 mm a také tím, že na nich byl umístěn dřevěný obklad. Jednalo se o velmi jednoduchou sestavu, která měla za úkol provést čtyři relevantní experimentální zkoušky v krátkém časovém sledu. Rovněž také nebyl prováděn CFD model, tudíž se jedná pouze o experimentální výsledky které jsou vzájemně porovnány.

5.1 Navržené zkoušky

Byly navrženy celkem čtyři zkoušky, v nichž se měnily pouze varianty obkladů. Dutina ve všech navržených experimentálních zkouškách byla stejná, šířky 50 mm, nosná konstrukce totožná jako při předchozích zkouškách (viz kapitolu 3), tedy z ocelových ližin a zadní cementovláknité desky. Hořák byl použit naprosto stejný jako při předchozích experimentech, tedy pískový propanový rozměrů 500 x 50 x 100 mm a tepelný výkon byl zvolen 20 kW, konstantní v čase 0–360 s, poté byl hořák vypnut a bylo pozorováno volné hoření fasádního obkladu po následujících 180 s. Následně byl vzorek uhašen a bylo sledováno a vyhodnoceno odhoření částí vzorku. Byl zkoumán pouze vliv hořlavého dřevěného obkladu a jeho orientace na chování požáru větraného fasádního systému.



obr. 73: Obklad: a) z OSB lamel svisle umístěných (vzorek 1), b) z OSB lamel vodorovně umístěných (vzorek 2), c) z OSB lamel vodorovně umístěných včetně požární bariéry (vzorek 3), d) z celistvé OSB desky (vzorek 4)

Co se týče fasádního obkladu, byl navržen tedy celkem ve čtyřech variantách, vždy tak, aby zachovával rozměry 1250 x 1800 mm se spodní hranou zvednutou o 200 mm od $\pm 0,000$

(obdobně jako cementovláknitá deska v kapitole 4). Ve vzorku 1 případě byl obklad tvořen svisle umístěnými lamelami z OSB desky, které byly 60 mm široké a mezi sebou měly 40 mm mezeru. Ve vzorku 2 se jednalo rovněž o lamely z OSB desky 60 mm široké s mezerami 40 mm, které však byly kladeny vodorovně. Ve třetím vzorku byla volena sestava totožná jako ve druhém případě, tedy vodorovně kladené lamely 60 mm s 40 mm mezerou, ale ve výšce 1250 mm od spodní hrany vzorku byla umístěna v dutině vodorovná lamela představující požární bariéru, která měla za účel zabránit šíření požáru či alespoň omezit rychlost šíření požáru. Jako čtvrtý obklad byla zvolena celistvá OSB deska rozměrů 1250 x 2000 mm, která nebyla nijak dělená. V případě umístění lamel bylo nutné přidat další přířezy představující nosný rošt obkladu, aby bylo možné lamely přichytit k nosnému podkladu. Všechny zmíněné obklady byly umístěny nosným roštem směrem ven a to z toho důvodu, aby bylo možné zachovat plný, ničím neomezený, pohled do dutiny z boku. Kotvení těchto obkladů proběhlo obdobně jako v případě předsazené cementovláknité desky, tedy přichycení na závitové tyče s maticemi a podložkami k zadní cementovláknité desce, tento detail, ač s jiným obkladovým materiálem, viz obr. 52, foto všech sestav s dřevěným obkladem je patrné na obr. 73.

5.2 Měření a sledované veličiny

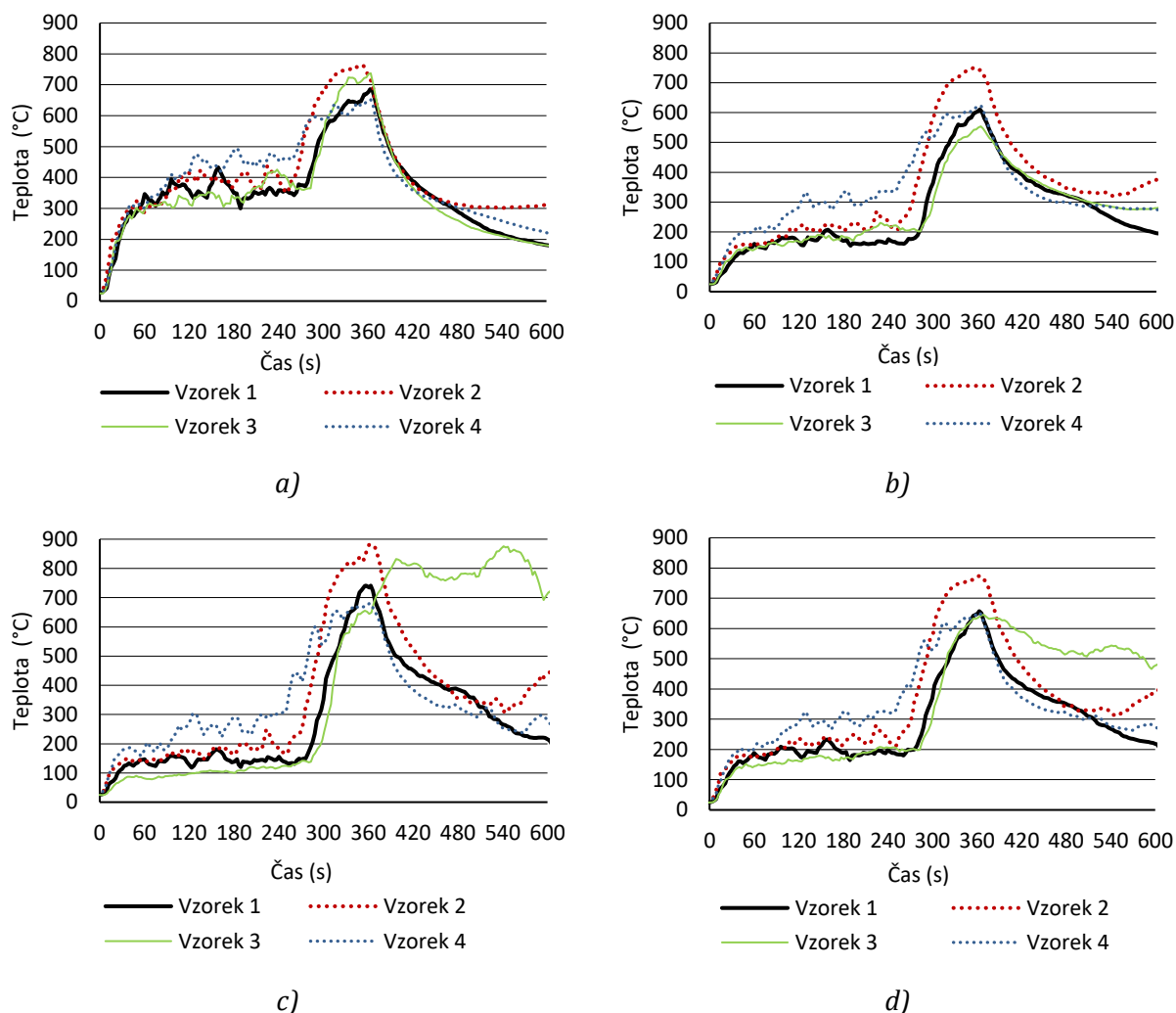
Vzhledem k tomu, že se v tomto případě jednalo o pokračování předchozí série experimentů, byla zachována stejná nosná konstrukce i zadní deska ohraničující dutinu, neboť nedošlo k žádnému jejímu výraznému porušení v průběhu předchozí série experimentů. Rovněž byla ponechána stejná měřicí zařízení, tedy celkem šest termočlánků pracovně označených TC_1–TC_6, jeden vodou chlazený radiometr a jedna Pitotova trubice. Schéma rozmístění viz obr. 53. Závěrečným aspektem bylo pozorování a vizuální hodnocení požáru v dutině, zde představené v podobě fotodokumentace.

5.3 Diskuse získaných výsledků

Vzhledem k odlišnému režimu zahřívání vzorků jsou zmíněné čtyři experimenty vyhodnoceny nezávisle na předchozích, zhotovených pouze z nehořlavých výrobků, neboť při porovnání dat by mohly podávat zkreslující výsledky. U této série experimentů je zhodnocení a porovnání naměřených dat provedeno grafy, důležité ale rovněž bylo vizuální pozorování chování požáru v případě jednotlivých zkoušek s rozdílnými obklady. Takové vizuální zhodnocení chování požáru v jednotlivých případech je provedeno jak zde v samostatné podkapitole a tak další fotografie z průběhu zkoušek jsou uvedeny v příloze 4.

5.3.1 Porovnání naměřených veličin

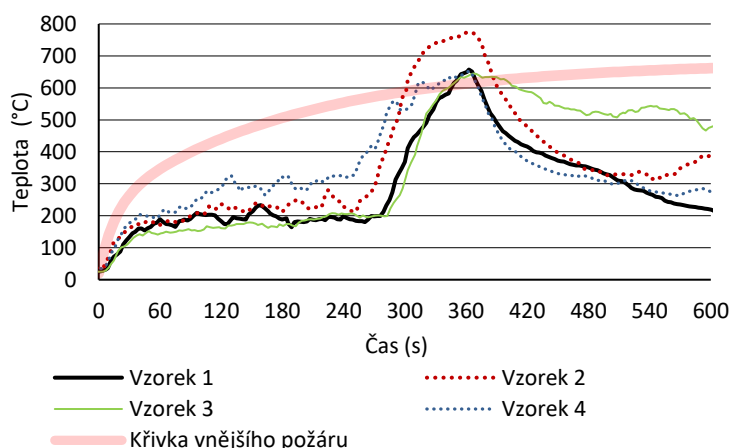
O teplotách horkých plynů pojednávají grafy na obr. 74. Jedná se o porovnání hodnot naměřených termočlánky TC_1–TC_4, přičemž je sledován průběh v každém termočlánku zvlášť, aby bylo možné odlišit průběhy teplot v každé ze čtyř zkoušek samostatně.



obr. 74: Porovnání průběhu teplot u zkoušek vzorků 1–4 naměřených a) termočlánkem TC_1, b) termočlánkem TC_2, c) termočlánkem TC_3, d) termočlánkem TC_4

Při hodnocení je postupováno v posloupnosti od termočlánku TC_1 až po termočlánek TC_4. Při pohledu na teploty naměřené TC_1 je patrné, že v oblasti plamenného hoření propanového hořáku nejsou pozorovatelné nijak výrazné rozdíly, tedy maximálně do 75 °C. Při porovnání dat získaných z termočlánku TC_2 lze zpozorovat, že nejvyšších teplot bylo dosaženo ve vzorku 2 s vodorovně kladeným obkladem, a to o více než 150 °C v porovnání s ostatními případy. Ten samý trend je viditelný i u termočlánků TC_3 a TC_4, což vede ke konstatování, že ve vzorku 2 bylo dosaženo nejvyšších teplot a jeví se jako nejméně vhodný způsob provádění obkladu z tohoto hlediska.

Rovněž krom rozboru naměřených teplot je nutné se podívat, jak se chovaly jednotlivé vzorky v průběhu všech zkoušek. U vzorku 1 je patrné, že přibližně do 240. sekundy byly termočlánky schopné naměřit teplo uvolněné z hořáku a od 240. sekundy je dále možné zpozorovat značný příspěvek OSB desky. Nejvyšší naměřená teplota je 741 °C v případě termočlánku TC_3 kolem 360. sekundy zkoušky. Následně po vypnutí hořáku teploty při volném hoření klesaly. Obdobný trend je viditelný i u vzorků 2 a 3, kdy k příspěvku dřevěného obkladu došlo až kolem 240. sekundy, zatímco příspěvek celistvé desky byl zpozorován už kolem 120. sekundy. Zajímavé porovnání se nabízí u vzorků 2 a 3, kdy byl obklad prováděn totožně, vzorek 3 byl ale navíc vybaven vodorovnou cementovláknitou lamelou v dutině, která představovala požární bariéru za účelem zabránit či alespoň omezit šíření účinků požáru. Jak je z grafů patrné, tak v úrovních u termočlánků TC_1 a TC_2 byl zaznamenán pozitivní vliv, byly zde totiž naměřeny nižší teploty, nicméně ale u termočlánků TC_3 a TC_4 bylo naměřenými hodnotami prokázáno, že nedošlo k naplnění očekávání v podobě omezení šíření požáru, neboť oproti ostatním případům po vypnutí hořáku zde došlo k nárůstu teploty, která po dobu volného hoření nijak výrazně neklesla, přičemž se jednalo o hodnoty kolísající okolo 800 °C u TC_3 a 600 °C u TC_4.

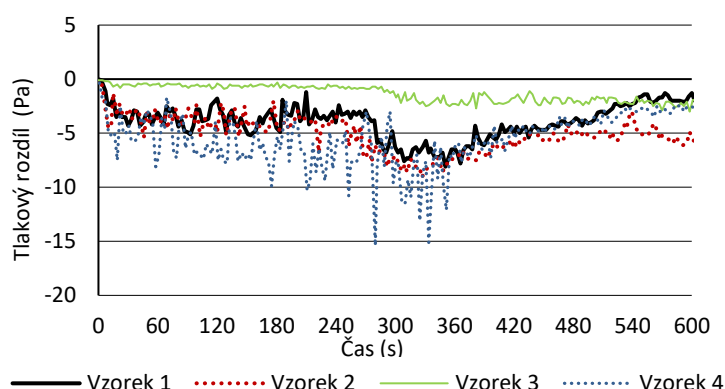


obr. 75: Porovnání aritmetických průměrů z teplot naměřených termočlánky TC_1-TC_4

Rovněž je zajímavé porovnání pomocí aritmetických průměrů z hodnot naměřených termočlánky TC_1-TC_4, kde je patrné, že po příspěvku hoření dřevěného obkladu byly naměřeny teploty buďto dosahující teplot křivky vnějšího požáru, nebo ji dokonce přesahovaly. V těchto případech je patrné, jaké riziko představuje kombinace hořlavých materiálů a větrané dutiny, neboť teploty v ní dosažené jsou vyšší, než je při běžném požáru předpokládáno.

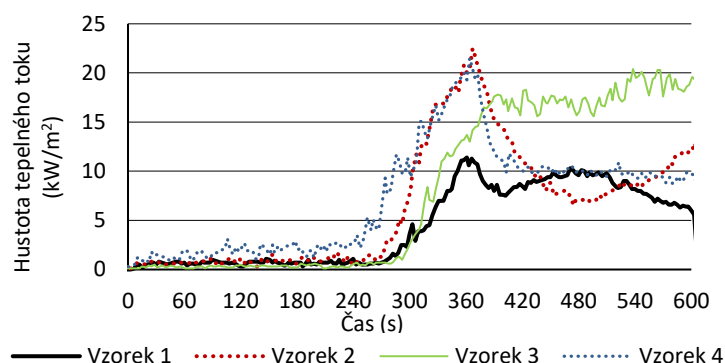
Průběh tlakových rozdílů při první a druhé zkoušce je dost podobný ve fázi zahřívání, poté bylo dosaženo vyšších rozdílů u vzorku druhého, a to v celém zbylém průběhu i včetně fáze volného hoření. U vzorku 3 je zpozorovatelný značný vliv požární bariéry v prostoru dutiny, přičemž Pitotova trubice se nacházela přibližně 350 mm nad ní. Je tedy patrné, že zde nebylo dosaženo takových hodnot jako při ostatních zkouškách, což v tomto ohledu

nezávisle na ostatních měřených veličinách potvrzuje pozitivní vliv požární bariéry. V případě zkoušky vzorku 4 byly naměřeny nejvyšší hodnoty tlakových rozdílů, z grafu na obr. 76 jsou patrné časté fluktuace ústící až v hodnoty 15 Pa.



obr. 76: Porovnání hodnot tlaků při zkouškách dřevěných obkladů

Co se týče hustoty tepelného toku, tak nejvyšších hodnot bylo naměřeno opět v případě vzorku 2, je však patrné, že koresponduje s výsledky ze zkoušky prováděné s vzorkem 4. Během zkoušky se svislým fasádním obkladem, tedy vzorku 1, byly naměřeny nejmenší hodnoty ze všech.



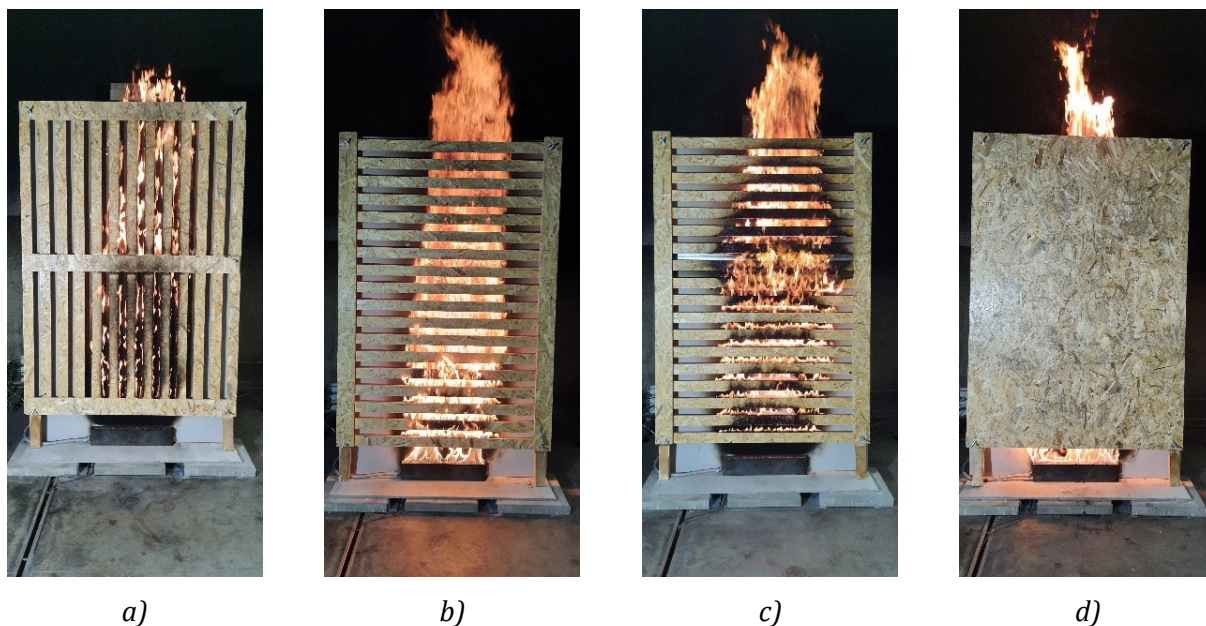
obr. 77: Porovnání hustoty tepelného toku naměřené při zkouškách dřevěných obkladů

5.3.2 Vizuální hodnocení experimentálních analýz jednotlivých vzorků

Vizuální hodnocení je prezentováno na základě fotodokumentace pořízené v průběhu zkoušek a také sestřihaných snímků z videozáznamů pořízených dvěma kamerami v průběhu zkoušek. Některé ze snímků jsou prezentovány v této kapitole pro zdůraznění důležitých jevů zpozorovaných při zkouškách, další snímky jsou pak vloženy v příloze 4.

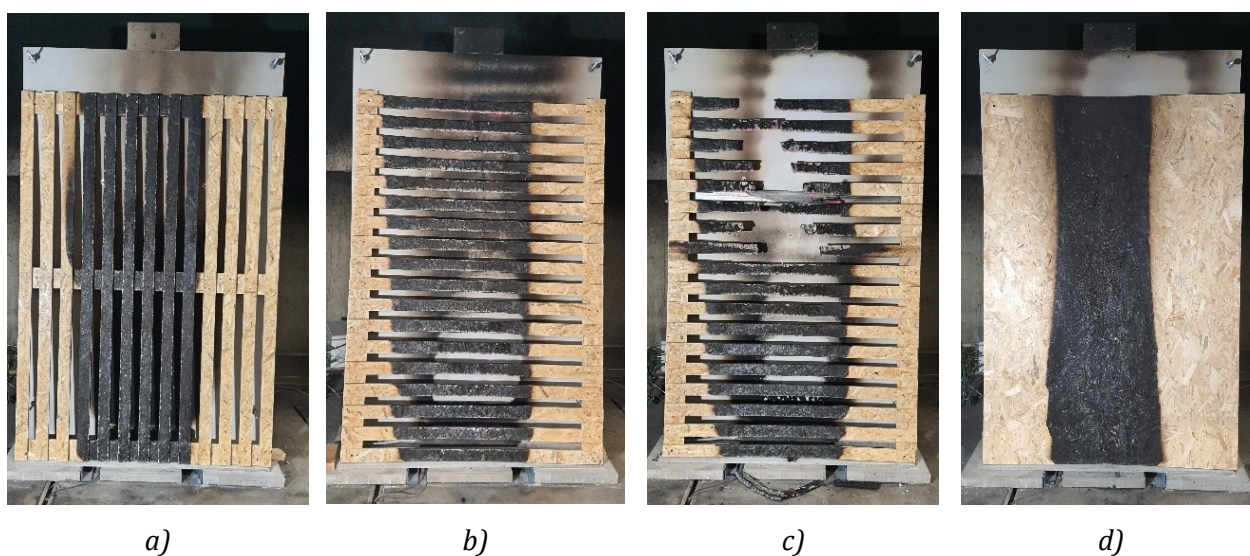
Na obr. 78 je patrná maximální výška plamene jednotlivých vzorků. Na základě těchto snímků lze konstatovat, že v průběhu zkoušky vzorku 1 nebyla zpozorována taková výška plamenů jako u zkoušek ostatních. U těchto vzorků, tedy s čísly 2, 3 a 4, nelze jednoznačně konstatovat, v jakém z nich byla zpozorována nejvyšší výška plamene, neboť z přiložených

obrázků je patrné, že ve všech případech dosahovala podobné výškové úrovně a docházelo i k občasnému prošlehnutí plamene nad prezentovanou úroveň (obr. 78).



obr. 78: Fotodokumentace z průběhu experimentální analýzy – maximální výška plamene u: a) vzorku 1, b) vzorku 2, c) vzorku 3, d) vzorku 4

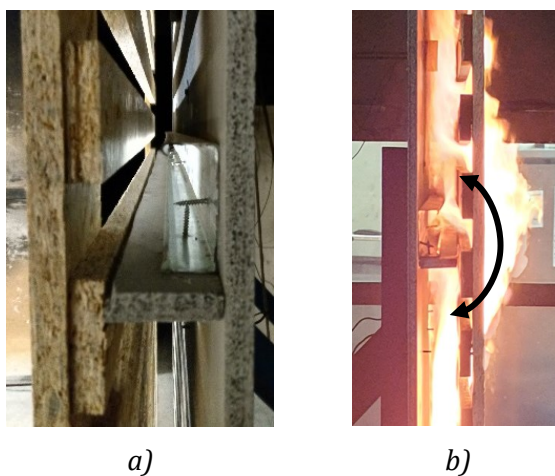
Na následujícím obr. 79 je zobrazen každý vzorek po ukončení zkoušky, kdy byl demontován ze závitových tyčí a otočen o 180° tak, aby bylo patrné odhoření z vnitřní strany. Je patrné, že nejvíce zuhelnatěly fasádní vzorky 2 a 3, přičemž ke konci zkoušky vzorku 3 došlo i k odpadnutí částí žhnoucích lamel. U vzorku 1 došlo ke zuhelnatění, ale ne v takovém množství jako u následujících dvou. Rovněž tak i u vzorku 4, tedy celistvé OSB desky, kdy je patrné namáhání v prostředním sloupci přibližně v místě hořáku, avšak po celé výšce.



obr. 79: Fotodokumentace po ukončení experimentální analýzy: a) vzorek 1, b) vzorek 2, c) vzorek 3, d) vzorek 4

5.3.3 Vyhodnocení

Z výsledků měření průběhu experimentálních zkoušek s dřevěným obkladem a vizuálního hodnocení lze vyvodit několik závěrů. Jakožto nejvhodnější obklad z hlediska chování při požáru se jeví vzorek 1, tj. svisle orientované lamely, neboť všechna měřící zařízení zaznamenala v tomto případě výsledky nižší než v průběhu zkoušek ostatních vzorků. Také nedošlo k výraznějšímu odhoření jednotlivých lamel jako u vzorků 2 a 3. Vzorek 2, tj. vodorovně orientované lamely, se při požáru choval ze všech zkoušených nejhůře, neboť v průběhu této zkoušky byly naměřeny nejvyšší hodnoty jak teplot, tak tlakových rozdílů a také hustoty tepelného toku. Na zajímavé chování je nutné upozornit v případě zkoušky vzorku 3, tj. vodorovně orientované lamely a bariéra, ve kterém byla instalována přepážka z cementovláknité desky představující požární bariéru. Tato bariéra měla omezit šíření požáru dutinu, čehož docíleno bylo, nicméně vzhledem k velkým mezerám mezi lamelami došlo vlivem podtlaku k nasátí horkých plynů a tedy i plamene do dutiny nad bariérou. Požár se tedy v úrovni bariéry šířil vnějškem a nad lamelou se vrátil zpět do dutiny. Tento jev je patrný na obr. 80 včetně detailního pohledu na bariéru. Ve spodní části tohoto vzorku bylo tedy dosaženo nižších teplot mimo oblast plamenného hoření (TC_2), ve vyšší úrovni vzorku (TC_3 a TC_4) však byly dosaženy teploty velmi vysoké, a to zejména během fáze volného hoření, kdy u ostatních vzorků docházelo ke klesání teplot. Je tedy otázkou, zda u takového obkladu s vodorovně kladenými lamelami či jiným řezivem a většími mezerami lze požární bariérou účinně zabránit šíření požáru fasádním systémem, ať už dutinou či vnějškem. V případě vzorku 4, tedy celistvé OSB desky, se požár choval jako v uzavřené dutině s tím rozdílem oproti experimentům a CFD modelu (viz kapitoly 3 a 4), že došlo k výraznému příspěvku při hoření vnitřního povrchu OSB desky. Vzorek 4 se stále ale nechoval hůře než vzorek 2, kdy rychlé hoření a značná destrukce tohoto vzorku byla způsobena fasádním obkladem, který umožňoval komínový efekt a i průběžné přisávání vzduchu podporujícího spalování v jednotlivých úrovních mezerami mezi OSB lamelami.



obr. 80: Detail: a) přířez cementovláknité desky ve funkci požární bariéry, b) přestup požáru vnějškem fasádního obkladu přes požární bariéru

6 Závěr

6.1 Závěr k současnému poznání řešené problematiky

V diplomové práci je řešena problematika chování požáru ve větrané dutině fasádních systémů. Množství zkušeností ze skutečných požárů výškových staveb poukazují na rizika v oblasti šíření požáru fasádními systémy. Větraná dutina fasádních systémů představuje riziko velmi rychlého vertikálního a horizontálního šíření požáru obálkou budovy, který může mít fatální následky. V rámci této diplomové práce je rozebrán vliv jednotlivých komponentů fasádního systému na chování a účinky požáru v dutině, případně i další přidružená rizika s požárem takového fasádního systému spojená. Dále je v rámci teoretické části práce věnován prostor přezkoumání normativních požadavků jak norem řady ČSN 73 08xx, tak i dostupných zahraničních požadavků. S tím souvisí rovněž zkušební metodika šíření požáru po fasádě, která je v současné době nejednotná v rámci EU. To by mělo být napraveno nově navrhovanou metodikou v podobě dvou velkorozměrových zkoušek, jedna se středním účinkem požáru a druhá se silným účinkem požáru. V současné době probíhá projekt zaštitěný evropskou komisí, který však musí dále vyústit v legislativní proces, což potrvá dalších několik let a následně bude teprve možné implementovat tuto zkušební metodiku do národních norem členských zemí, tedy i ČR. Celková doba trvání všech těchto procesů je odhadovaná na přibližně 10–15 od roku 2020, tedy navrhovaná metodika by měla vejít v platnost mezi roky 2030 a 2035.

6.2 Závěr k CFD modelům chování požáru v dutině s různou šířkou

Výpočetní část této práce se zaměřuje na matematický CFD model větrané dutiny fasádního systému. Celkem byly zpracovány tři modely malých rozměrů, přesněji délky 1200 mm, výšky 2100 mm a s rozdílnou šířkou dutiny v hodnotách 30, 50 a 70 mm. V modelu byly umístěny výhradně nehořlavé materiály a byl zkoumán pouze vliv šířky dutiny na chování požáru ve větrané dutině ve fasádním systému. Tepelný výkon hořáku umístěného pod dutinou byl 10 a 20 kW. U těchto tří modelů byl potvrzen předpoklad značného vlivu šířky dutiny na chování požáru. U všech sledovaných veličin, tedy teploty, tlakových změn, rychlosti proudění a radiace, je možné s přiložených grafů v rámci kapitoly 3 zpozorovat, že v dutině šířky 30 mm byly spočteny nejvyšší hodnoty a s rostoucí šířkou dutiny klesaly. Obecně však platí, že v dutině je dosahováno teplot, které jsou vyšší než teplota vzplanutí běžně používaných hořlavých výrobků ve stavebnictví pro fasádní systémy (izolanty, difúzní fólie, obkladové materiály), a to i při nízkém výkonu hořáku (10 a 20 kW) oproti platným zkušebním metodám, např. 100 kW pro ČSN ISO 13785-1 [1]. Co se týče vizuálního hodnocení chování požáru v dutinách různých šířek, tak nejvyšší výška plamene byla

zpozorovaná v dutině šířky 30 mm, v této dutině rovněž plamen prošelával po celé výšce modelované dutiny. U dvou zbylých modelovaných dutin šířek 50 a 70 mm nebyl jev prošelávání plamene po celé výšce dutiny pozorován a s rostoucí šířkou dutiny klesala výška plamene obecně.

6.3 Závěr k experimentálním zkouškám

V rámci této diplomové práce byly provedeny dvě série experimentálních zkoušek. První série se věnuje experimentálnímu zkoumání vlivu šířky dutiny na chování požáru uvnitř této dutiny a navazuje na CFD model. Tato série měla za úkol potvrdit stanovené předpoklady, tedy že v užší větrané dutině je dosahováno vyšších teplot, tlakových rozdílů a radiace, resp. vzhledem ke způsobu měření celkové hustoty tepelného toku (konvekční i radiční složky), rovněž je v ní pozorovatelná vyšší výška plamene. Tyto předpoklady byly potvrzeny, nicméně v rámci experimentální analýzy nebyly naměřeny tak rozdílné hodnoty, jak CFD model předpokládal, přesněji u nejužší větrané dutiny šířky 30 mm. V rámci vizuálního hodnocení bylo možné oproti CFD modelu zpozorovat prošelávání plamene po celé výšce dutiny šířky jak 30 mm, tak i 50 mm. Stejně jako v CFD modelu byla průměrná pozorovaná výška plamene nejvyšší v případě dutiny šířky 30 mm, s rostoucí šířkou pak výška plamene klesala. V rámci experimentální analýzy byla udělána i referenční zkouška bez obkladu, tedy bez účinků větrané dutiny. Ta potvrdila, že ve větrané dutině je dosahováno výrazněji vyšších teplot a tlakových rozdílů než u kontaktních fasádních systémů bez dutiny. Druhá série experimentů se věnuje zkoumání větraného fasádního systému s dřevěným obkladem a konstantní šířkou dutiny, přičemž je tedy detailněji zkoumán vliv orientace dřevěného obkladu na chování účinku požáru u takového fasádního systému. Výsledky jsou pro tuto experimentální sérii interpretovány samostatně nezávisle na předchozích CFD modelech a sérii experimentů, neboť byly podrobeny rozdílnému režimu zahřívání. Získaná data z měření potvrdily, že orientace dřevěného fasádního obkladu má významný vliv na chování požáru ve větrané dutině fasádního systému. Rovněž se zde naskytla otázka vhodnosti uplatnitelnosti požárních bariér pro dřevěné fasádní systémy s většími spárami mezi jednotlivými obkladovými prvky.

6.4 Doporučení pro navazující práce

Vzhledem k rešerši současného stavu poznání je patrné, že se jedná o velmi komplexní a nedostatečně probádané téma. V návaznosti na tuto práci se nabízí další výzkum, zejména co se týče materiálových komponentů celého větraného fasádního systému. Tím je myšlena např. integrace hořlavých komponentů, tedy izolací, roštů či různých obkladů, ale i požárních bariér do matematických CFD modelů, případně i experimentálních zkoušek.

Dále je nutné upozornit na soudobé požadavky vyplývající z řady norem ČSN 73 08xx, ve kterých není řádně definován žádný jiný fasádní systém než ETICS. To vybízí k zamyšlení, jakým způsobem by šly soudobé požadavky upravit a v jaké míře, aby jasně a přehledně šly definovat podmínky použitelnosti nejen větraných fasádních systémů, ale jakýchkoliv jiných obvodových plášťů a jejich komponentů.

V poslední řadě je doporučeno sledovat budoucí vývoj jednotné evropské metodiky zkoušení fasád z hlediska požární bezpečnosti. V současné době, jak bylo řečeno, je zkušební metodika po celé EU značně nejednotná. Sjednocení zkušebních předpisů do metodiky platné ve vícero zemích, mezi které by měla v budoucnu patřit i ČR, značně ulehčí zkoušení, definování kritérií a požadavků na fasádní systémy a také velmi usnadní pohyb výrobků na mezinárodním trhu.

Příloha 1 – Zdrojový kód PyroSim

Dutina 30 mm

```
&HEAD CHID='dutina_30mm'/
&TIME T_END=540.0/
&DUMP DT_RESTART=10.0, DT_SL3D=0.25/
&MISC RESTART=.TRUE./

&MESH ID='Mesh01', IJK=6,120,36, XB=0.0,0.06,0.0,1.2,0.0,0.36/
&MESH ID='Mesh02', IJK=6,120,36, XB=0.0,0.06,0.0,1.2,0.36,0.72/
&MESH ID='Mesh03', IJK=6,120,36, XB=0.0,0.06,0.0,1.2,0.72,1.08/
&MESH ID='Mesh04', IJK=6,120,36, XB=0.0,0.06,0.0,1.2,1.08,1.44/
&MESH ID='Mesh05', IJK=6,120,36, XB=0.0,0.06,0.0,1.2,1.44,1.8/
&MESH ID='Mesh06', IJK=6,120,30, XB=0.0,0.06,0.0,1.2,1.8,2.1/

&REAC ID='PROPANE',
  FUEL='REAC_FUEL',
  FORMULA='C3H8',
  SOOT_YIELD=8.0E-3/

&DEVC ID='TC_01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,0.65/
&DEVC ID='TC_02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,1.1/
&DEVC ID='TC_03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,1.55/
&DEVC ID='TC_04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,2.0/
&DEVC ID='TC_05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.29,1.1/
&DEVC ID='TC_06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.91,1.1/
&DEVC ID='Radiometr01', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.0,0.6,2.07, ORIENTATION=1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Radiometr02', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.0,0.6,2.07/
&DEVC ID='V01', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,0.65/
&DEVC ID='V02', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,1.1/
&DEVC ID='V03', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,1.55/
&DEVC ID='V04', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,2.0/
&DEVC ID='P01', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,0.65/
&DEVC ID='P02', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,1.1/
&DEVC ID='P03', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,1.55/
&DEVC ID='P04', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,2.0/
&DEVC ID='WT01', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,0.65, IOR=1/
&DEVC ID='WT02', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,1.1, IOR=1/
&DEVC ID='WT03', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,1.55, IOR=1/
&DEVC ID='WT04', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,2.0, IOR=1/
&DEVC ID='WT05', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.29,1.1, IOR=1/
&DEVC ID='WT06', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.91,1.1, IOR=1/
&DEVC ID='WT07', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.03,0.6,0.65, IOR=-1/
&DEVC ID='WT08', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.03,0.6,1.1, IOR=-1/
&DEVC ID='WT09', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.03,0.6,1.55, IOR=-1/
&DEVC ID='WT10', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.03,0.6,2.0, IOR=-1/
&DEVC ID='WT11', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.03,0.29,1.1, IOR=-1/
&DEVC ID='WT12', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.03,0.91,1.1, IOR=-1/
&DEVC ID='V05', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.05,0.6,0.65/
&DEVC ID='V06', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.05,0.6,1.1/
&DEVC ID='V07', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.05,0.6,1.55/
&DEVC ID='V08', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.05,0.6,2.0/
&DEVC ID='P05', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.05,0.6,0.65/
&DEVC ID='P06', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.05,0.6,1.1/
&DEVC ID='P07', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.05,0.6,1.55/
&DEVC ID='P08', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.05,0.6,2.0/
&DEVC ID='TC_07', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.05,0.6,0.65/
&DEVC ID='TC_08', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.05,0.6,1.1/
&DEVC ID='TC_09', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.05,0.6,1.55/
&DEVC ID='TC_10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.05,0.6,2.0/
&DEVC ID='TC_11', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.05,0.29,1.1/
```

```

&DEVC ID='TC_12', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.05,0.91,1.1/
&DEVC ID='WT13', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.04,0.6,0.65, IOR=1/
&DEVC ID='WT14', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.04,0.6,1.1, IOR=1/
&DEVC ID='WT15', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.04,0.6,1.55, IOR=1/
&DEVC ID='WT16', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.04,0.6,2.0, IOR=1/
&DEVC ID='WT17', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.04,0.29,1.1, IOR=1/
&DEVC ID='WT18', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.04,0.91,1.1, IOR=1/

&MATL ID='Fermacell_Powerpanell',
  SPECIFIC_HEAT=1.0,
  CONDUCTIVITY=0.173,
  DENSITY=1000.0/

&SURF ID='Fermacell Powerpannell',
  COLOR='GRAY 80',
  MATL_ID(1,1)='Fermacell_Powerpanell',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
  THICKNESS(1)=0.0125/
&SURF ID='propan_horak',
  COLOR='RED',
  HRRPUA=800.0,
  RAMP_Q='propan_horak_RAMP_Q',
  TMP_FRONT=0.0/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=0.0, F=0.5/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=179.9, F=0.5/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=180.0, F=1.0/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=359.9, F=1.0/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=360.0, F=0.0/

&OBST ID='predni_Deska', XB=0.03,0.04,0.0,1.2,0.2,2.0, SURF_ID='Fermacell Powerpannell'/
&OBST ID='obst_horak', XB=0.0,0.05,0.35,0.85,0.0,0.1, SURF_IDS='propan_horak','INERT','INERT'/

&VENT ID='zadni_deska', SURF_ID='Fermacell Powerpannell', XB=0.0,0.0,0.0,1.2,0.0,2.0/
&VENT ID='zadni_deska_prirez', SURF_ID='Fermacell Powerpannell', XB=0.0,0.0,0.5,0.7,2.0,2.1/
&VENT ID='spodni_deska_+-0,000', SURF_ID='Fermacell Powerpannell', XB=0.0,0.06,0.0,1.2,0.0,0.0/
&VENT ID='bocni_otvor_01', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.06,0.0,0.0,0.0,2.1/
&VENT ID='bocni_otvor_02', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.06,1.2,1.2,0.0,2.1/
&VENT ID='vrchni_otvor_03', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.06,0.0,1.2,2.1,2.1/
&VENT ID='zadni_otvor_01', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.0,0.5,2.0,2.1/
&VENT ID='zadni_otvor_02', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.7,1.2,2.0,2.1/
&VENT ID='predni_otvor_03', SURF_ID='OPEN', XB=0.06,0.06,0.0,1.2,0.0,2.1/

&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE=200.0,300.0,400.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.05/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.05/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.05/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/

```

```
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
```

```
&TAIL /
```

Dutina 50 mm

```
&HEAD CHID='dutina_50mm'/
&TIME T_END=540.0/
&DUMP DT_RESTART=10.0, DT_SL3D=0.25/
```

```
&MESH ID='Mesh01', IJK=5,120,36, XB=0.0,0.05,0.0,1.2,0.0,0.36/
&MESH ID='Mesh02', IJK=5,120,36, XB=0.0,0.05,0.0,1.2,0.36,0.72/
&MESH ID='Mesh03', IJK=5,120,36, XB=0.0,0.05,0.0,1.2,0.72,1.08/
&MESH ID='Mesh04', IJK=5,120,36, XB=0.0,0.05,0.0,1.2,1.08,1.44/
&MESH ID='Mesh05', IJK=5,120,36, XB=0.0,0.05,0.0,1.2,1.44,1.8/
&MESH ID='Mesh06', IJK=5,120,30, XB=0.0,0.05,0.0,1.2,1.8,2.1/
```

```
&REAC ID='PROPANE',
  FUEL='REAC_FUEL',
  FORMULA='C3H8',
  SOOT_YIELD=8.0E-3/
```

```
&DEVC ID='TC_01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,0.65/
&DEVC ID='TC_02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,1.1/
&DEVC ID='TC_03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,1.55/
&DEVC ID='TC_04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,2.0/
&DEVC ID='TC_05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.29,1.1/
&DEVC ID='TC_06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.91,1.1/
&DEVC ID='Radiometr01', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.0,0.6,2.07, ORIENTATION=1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Radiometr02', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.0,0.6,2.07/
&DEVC ID='V01', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,0.65/
&DEVC ID='V02', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,1.1/
&DEVC ID='V03', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,1.55/
&DEVC ID='V04', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,2.0/
&DEVC ID='P01', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,0.65/
&DEVC ID='P02', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,1.1/
&DEVC ID='P03', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,1.55/
&DEVC ID='P04', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,2.0/
&DEVC ID='WT01', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,0.65, IOR=1/
&DEVC ID='WT02', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,1.1, IOR=1/
&DEVC ID='WT03', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,1.55, IOR=1/
&DEVC ID='WT04', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,2.0, IOR=1/
&DEVC ID='WT05', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.29,1.1, IOR=1/
&DEVC ID='WT06', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.91,1.1, IOR=1/
&DEVC ID='WT07', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.05,0.6,0.65, IOR=-1/
&DEVC ID='WT08', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.05,0.6,1.1, IOR=-1/
&DEVC ID='WT09', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.05,0.6,1.55, IOR=-1/
&DEVC ID='WT10', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.05,0.6,2.0, IOR=-1/
&DEVC ID='WT11', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.05,0.29,1.1, IOR=-1/
&DEVC ID='WT12', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.05,0.91,1.1, IOR=-1/
```

```
&MATL ID='Fermacell_Powerpanell',
  SPECIFIC_HEAT=1.0,
  CONDUCTIVITY=0.173,
  DENSITY=1000.0/
```

```
&SURF ID='Fermacell Powerpannell',
  COLOR='GRAY 80',
```

```

MATL_ID(1,1)='Fermacell_Powerpanell',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.0125/
&SURF ID='propan_horak',
COLOR='RED',
HRRPUA=800.0,
RAMP_Q='propan_horak_RAMP_Q',
TMP_FRONT=0.0/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=0.0, F=0.5/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=179.9, F=0.5/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=180.0, F=1.0/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=359.9, F=1.0/
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=360.0, F=0.0/

&OBST ID='obst_horak', XB=0.0,0.05,0.35,0.85,0.0,0.1, SURF_IDS='propan_horak','INERT','INERT'/

&VENT ID='zadni_deska', SURF_ID='Fermacell Powerpanell', XB=0.0,0.0,0.0,1.2,0.0,2.0/
&VENT ID='zadni_deska_priraz', SURF_ID='Fermacell Powerpanell', XB=0.0,0.0,0.5,0.7,2.0,2.1/
&VENT ID='spodni_deska_+0,000', SURF_ID='Fermacell Powerpanell', XB=0.0,0.05,0.0,1.2,0.0,0.0/
&VENT ID='bocni_otvor_01', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.05,0.0,0.0,0.0,2.1/
&VENT ID='bocni_otvor_02', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.05,1.2,1.2,0.0,2.1/
&VENT ID='vrchni_otvor_03', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.05,0.0,1.2,2.1,2.1/
&VENT ID='zadni_otvor_01', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.0,0.5,2.0,2.1/
&VENT ID='zadni_otvor_02', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.7,1.2,2.0,2.1/
&VENT ID='predni_deska01', SURF_ID='Fermacell Powerpanell', XB=0.05,0.05,0.0,1.2,0.2,2.0/
&VENT ID='predni_otvor_01', SURF_ID='OPEN', XB=0.05,0.05,0.0,1.2,0.0,2.0/
&VENT ID='predni_otvor_02', SURF_ID='OPEN', XB=0.05,0.05,0.0,1.2,2.0,2.1/

&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE=200.0,300.0,400.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.02/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.03/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.04/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.02/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.03/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.04/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.02/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.03/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.04/

```

&TAIL /

Dutina 70 mm

&HEAD CHID='dutina_70mm'/

&TIME T_END=540.0/

&DUMP DT_RESTART=10.0, DT_SL3D=0.25/

&MESH ID='Mesh01', IJK=7,120,36, XB=0.0,0.07,0.0,1.2,0.0,0.36/

&MESH ID='Mesh02', IJK=7,120,36, XB=0.0,0.07,0.0,1.2,0.36,0.72/

&MESH ID='Mesh03', IJK=7,120,36, XB=0.0,0.07,0.0,1.2,0.72,1.08/

&MESH ID='Mesh04', IJK=7,120,36, XB=0.0,0.07,0.0,1.2,1.08,1.44/

&MESH ID='Mesh05', IJK=7,120,36, XB=0.0,0.07,0.0,1.2,1.44,1.8/

&MESH ID='Mesh06', IJK=7,120,30, XB=0.0,0.07,0.0,1.2,1.8,2.1/

&REAC ID='PROPANE',

FUEL='REAC_FUEL',

FORMULA='C3H8',

SOOT_YIELD=8.0E-3/

&DEVC ID='TC_01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,0.65/

&DEVC ID='TC_02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,1.1/

&DEVC ID='TC_03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,1.55/

&DEVC ID='TC_04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.6,2.0/

&DEVC ID='TC_05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.29,1.1/

&DEVC ID='TC_06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.01,0.91,1.1/

&DEVC ID='Radiometr01', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.0,0.6,2.07, ORIENTATION=1.0,0.0,0.0/

&DEVC ID='Radiometr02', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.0,0.6,2.07/

&DEVC ID='V01', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,0.65/

&DEVC ID='V02', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,1.1/

&DEVC ID='V03', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,1.55/

&DEVC ID='V04', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.01,0.6,2.0/

&DEVC ID='P01', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,0.65/

&DEVC ID='P02', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,1.1/

&DEVC ID='P03', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,1.55/

&DEVC ID='P04', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=0.01,0.6,2.0/

&DEVC ID='WT01', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,0.65, IOR=1/

&DEVC ID='WT02', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,1.1, IOR=1/

&DEVC ID='WT03', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,1.55, IOR=1/

&DEVC ID='WT04', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.6,2.0, IOR=1/

&DEVC ID='WT05', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.29,1.1, IOR=1/

&DEVC ID='WT06', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.0,0.91,1.1, IOR=1/

&DEVC ID='WT07', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.07,0.6,0.65, IOR=-1/

&DEVC ID='WT08', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.07,0.6,1.1, IOR=-1/

&DEVC ID='WT09', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.07,0.6,1.55, IOR=-1/

&DEVC ID='WT10', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.07,0.6,2.0, IOR=-1/

&DEVC ID='WT11', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.07,0.29,1.1, IOR=-1/

&DEVC ID='WT12', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=0.07,0.91,1.1, IOR=-1/

&MATL ID='Fermacell_Powerpanell',

SPECIFIC_HEAT=1.0,

CONDUCTIVITY=0.173,

DENSITY=1000.0/

&SURF ID='Fermacell Powerpanell',

COLOR='GRAY 80',

MATL_ID(1,1)='Fermacell_Powerpanell',

MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,

THICKNESS(1)=0.0125/

&SURF ID='propan_horak',

COLOR='RED',

HRRPUA=800.0,

RAMP_Q='propan_horak_RAMP_Q',

TMP_FRONT=0.0/

&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=0.0, F=0.5/

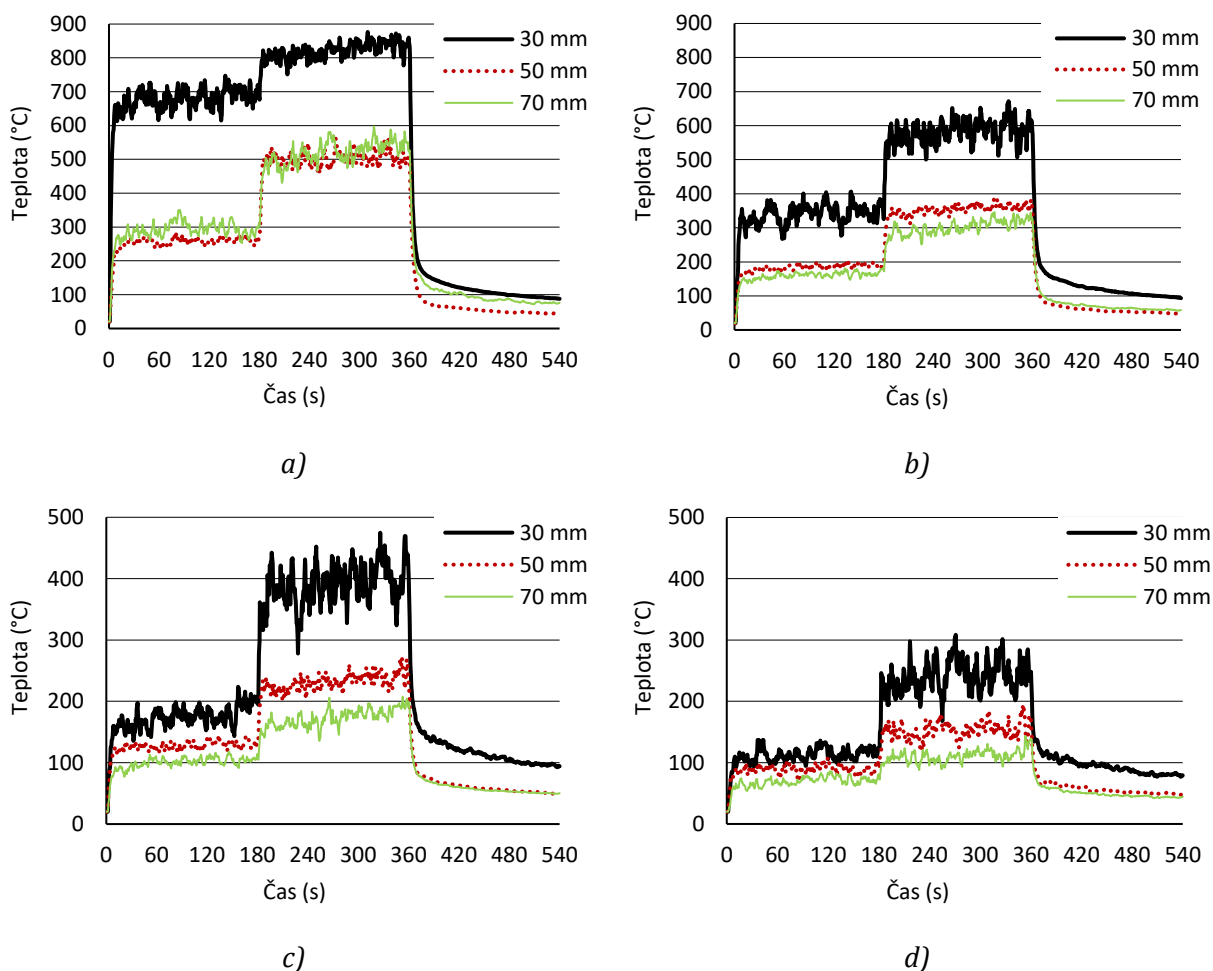

```
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=179.9, F=0.5/  
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=180.0, F=1.0/  
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=359.9, F=1.0/  
&RAMP ID='propan_horak_RAMP_Q', T=360.0, F=0.0/  
  
&OBST ID='obst_horak', XB=0.0,0.05,0.35,0.85,0.0,0.1, SURF_IDS='propan_horak','INERT','INERT'/  
  
&VENT ID='zadni_deska', SURF_ID='Fermacell Powerpanel', XB=0.0,0.0,0.0,1.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='zadni_deska_prizez', SURF_ID='Fermacell Powerpanel', XB=0.0,0.0,0.5,0.7,2.0,2.1/  
&VENT ID='spodni_deska_+-0,000', SURF_ID='Fermacell Powerpanel', XB=0.0,0.07,0.0,1.2,0.0,0.0/  
&VENT ID='bocni_otvor_01', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.07,0.0,0.0,0.0,2.1/  
&VENT ID='bocni_otvor_02', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.07,1.2,1.2,0.0,2.1/  
&VENT ID='vrchni_otvor_03', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.07,0.0,1.2,2.1,2.1/  
&VENT ID='zadni_otvor_01', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.0,0.5,2.0,2.1/  
&VENT ID='zadni_otvor_02', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.7,1.2,2.0,2.1/  
&VENT ID='predni_deska01', SURF_ID='Fermacell Powerpanel', XB=0.07,0.07,0.0,1.2,0.2,2.0/  
&VENT ID='predni_otvor_01', SURF_ID='OPEN', XB=0.07,0.07,0.0,1.2,0.0,0.2/  
&VENT ID='predni_otvor_02', SURF_ID='OPEN', XB=0.07,0.07,0.0,1.2,2.0,2.1/  
  
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/  
  
&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE=200.0,300.0,400.0/  
  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.01/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.6/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.35/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.85/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.65/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.1/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.55/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.02/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.03/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.04/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.02/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.03/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.04/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.02/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.03/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.04/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.05/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.06/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.05/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.06/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.05/  
  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.06/  
  
&TAIL /
```

Příloha 2 – Doplnující data k CFD modelům

Celkem v rámci této práce byly sestaveny tři CFD modely, které poskytly mnoho výsledků. V rámci kapitoly 3 byly prezentovány ty nejrelevantnější výsledky poukazující na vliv šířky na chování účinku požáru ve větrané dutině. V této příloze jsou pak v podobě grafů prezentována vybraná data, která doplňují podkapitulu 3.2.4 ve smyslu porovnání hodnot spočítaných v jednotlivých modelech.

Termočlánky TC_1–TC_4

Na následujícím obrázku jsou porovnány výsledky z jednotlivých termočlánků. Je patrné, že CFD model předpokládá značný rozdíl dosahovaných teplot zejména u dutiny šířky 30 mm oproti zbylým dvěma. Při porovnání dutiny šířky 50 mm a 70 mm je vidět, že ke spočtení odlišnějších teplot došlo až ve vyšších úrovních, tedy u termočlánků TC_2–TC_4, v oblasti plamenného hoření (TC_1) se tyto křivky prolínají po celou dobu simulace experimentu.

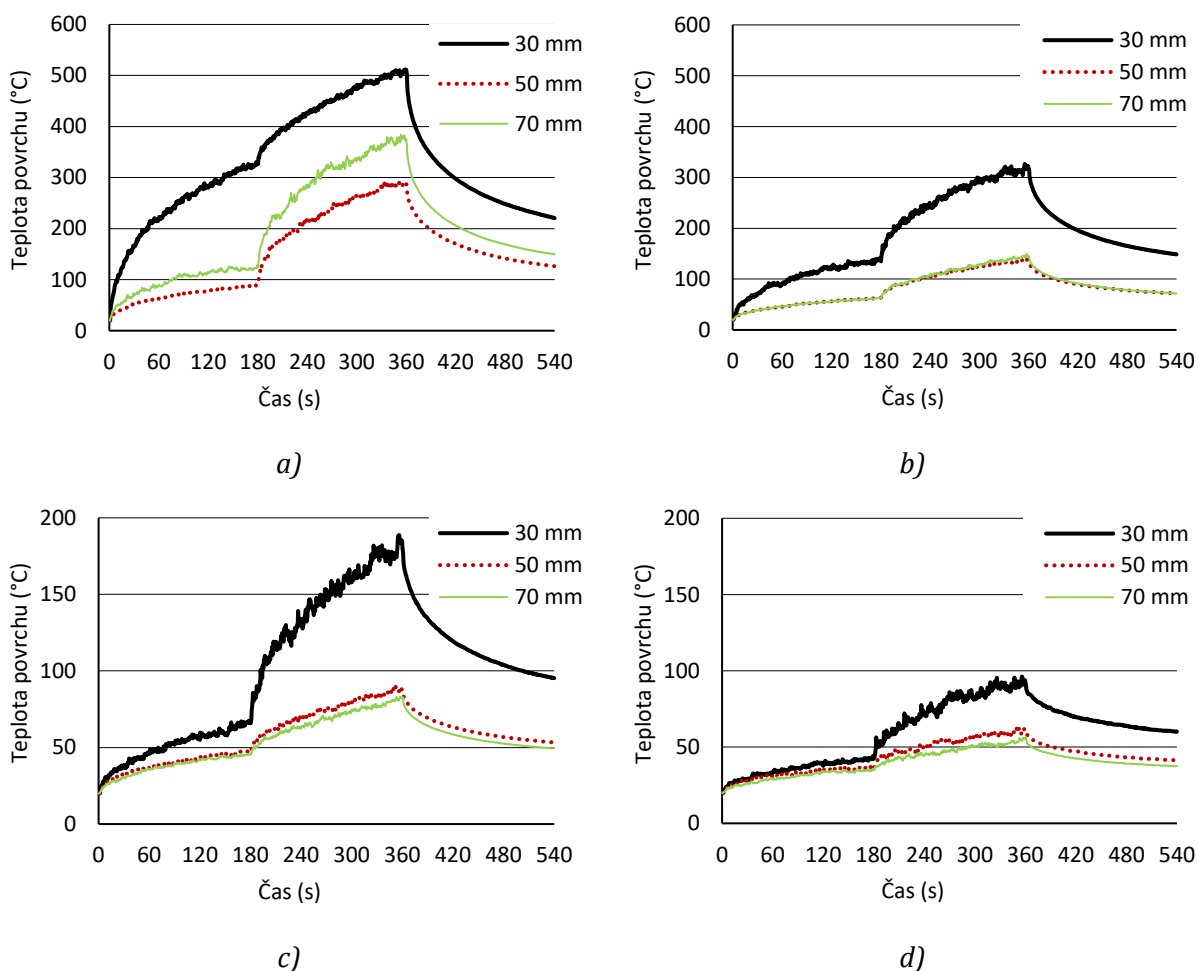


obr. 81: Porovnání průběhu teplot CFD modelu: a) termočlánek TC_1, b) termočlánek TC_2, c) termočlánek TC_3, d) termočlánek TC_4

Povrchové teploty

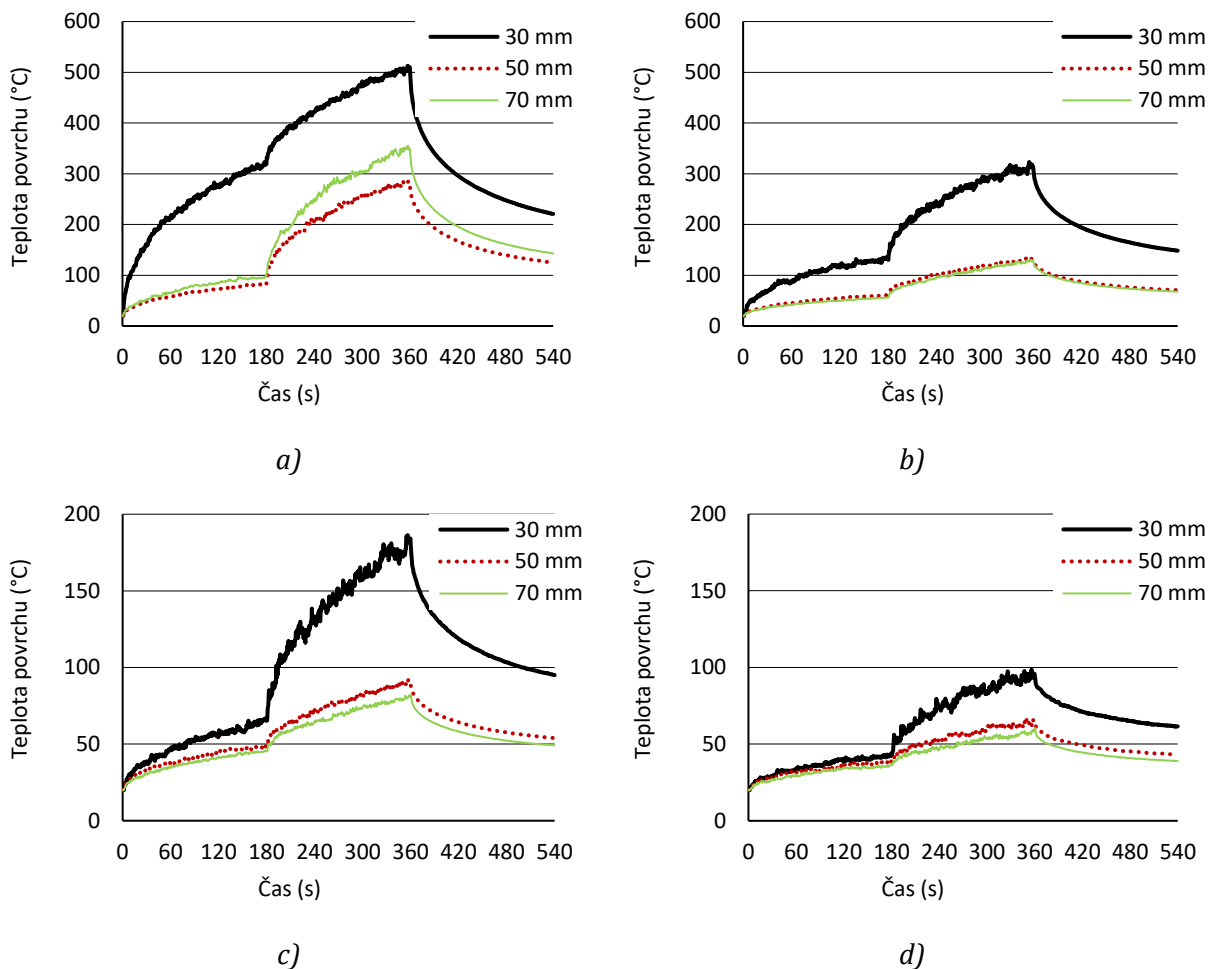
Jak bylo řečeno v kapitole 3.1.2, použité cementovláknité desky byly uvažovány s konstantními tepelně technickými vlastnostmi, což oproti skutečnému experimentu znamená, že data mohou být mírně zkreslená. V reálu se totiž materiály chovají odlišně a tyto vlastnosti se v průběhu zahřívání mění, a to má vliv na měřené veličiny. Nicméně tato data jsou dalším důkazem CFD modelu pro potvrzení vlivu šířky dutiny na chování účinků požáru, resp. v tomto případě dosažených povrchových teplot v dutině.

Na obr. 82 jsou prezentovány povrchové teploty desky představující obvodovou konstrukci budovy, ke které byl na sraz modelován propanový hořák. Stejně jako v mnohých předchozích případech CFD model předpokládá značně rozdílné teploty povrchů v dutině 30 mm oproti dvěma ostatním případům. Při pohledu na dva zmíněné případy dutin 50 mm a 70 mm je možné si povšimnout, že krom dat naměřených zařízením WT1 (rozmístění zařízení měřících teplotu povrchů viz obr. 22) jsou ostatní průběhy velmi podobné.



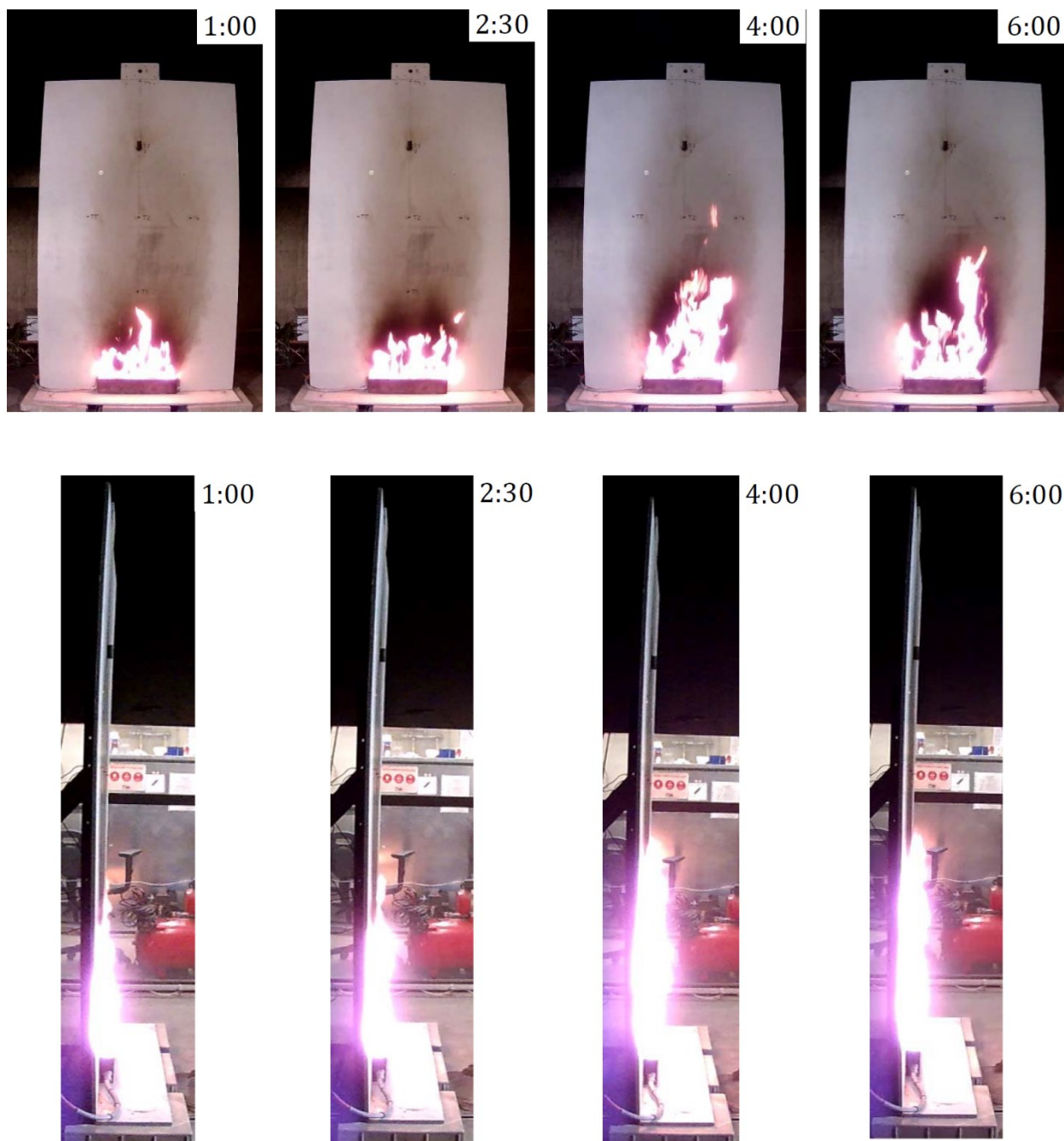
obr. 82: Porovnání průběhu povrchových teplot desky představující obvodovou stěnu (CFD model): a) WT_1, b) WT_2, c) WT_3, d) WT_4

Průběhy povrchových teplot desky představující fasádní obklad jsou prezentovány na obr. 83. Tato data a rozdíly mezi jednotlivými modely s rozdílnou šířkou dutiny jsou velmi podobné jako v případě na předchozí stránce.

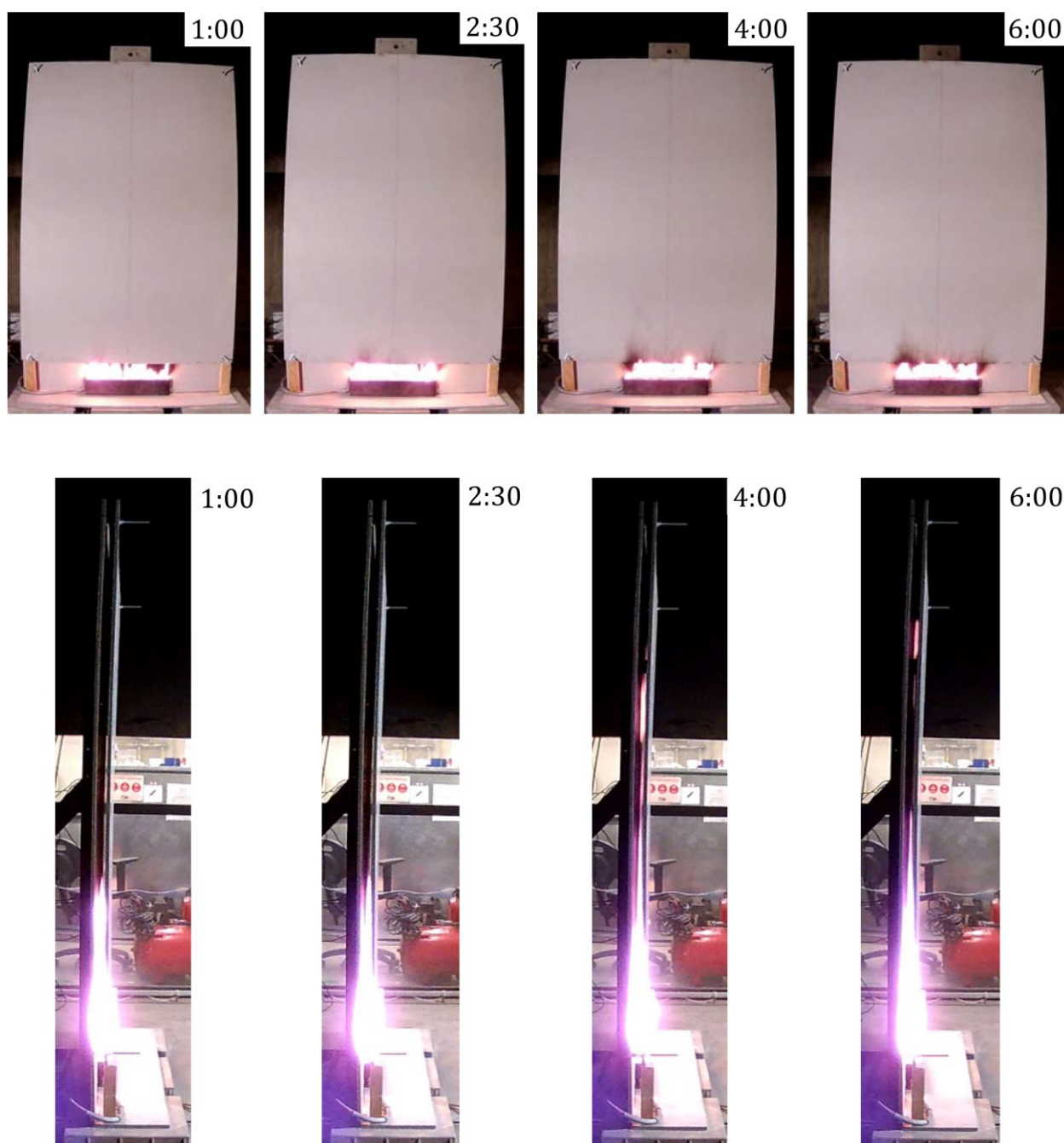


obr. 83: Porovnání průběhu povrchových teplot vnitřní strany desky představující fasádní obklad (CFD model): a) WT_1, b) WT_2, c) WT_3, d) WT_4

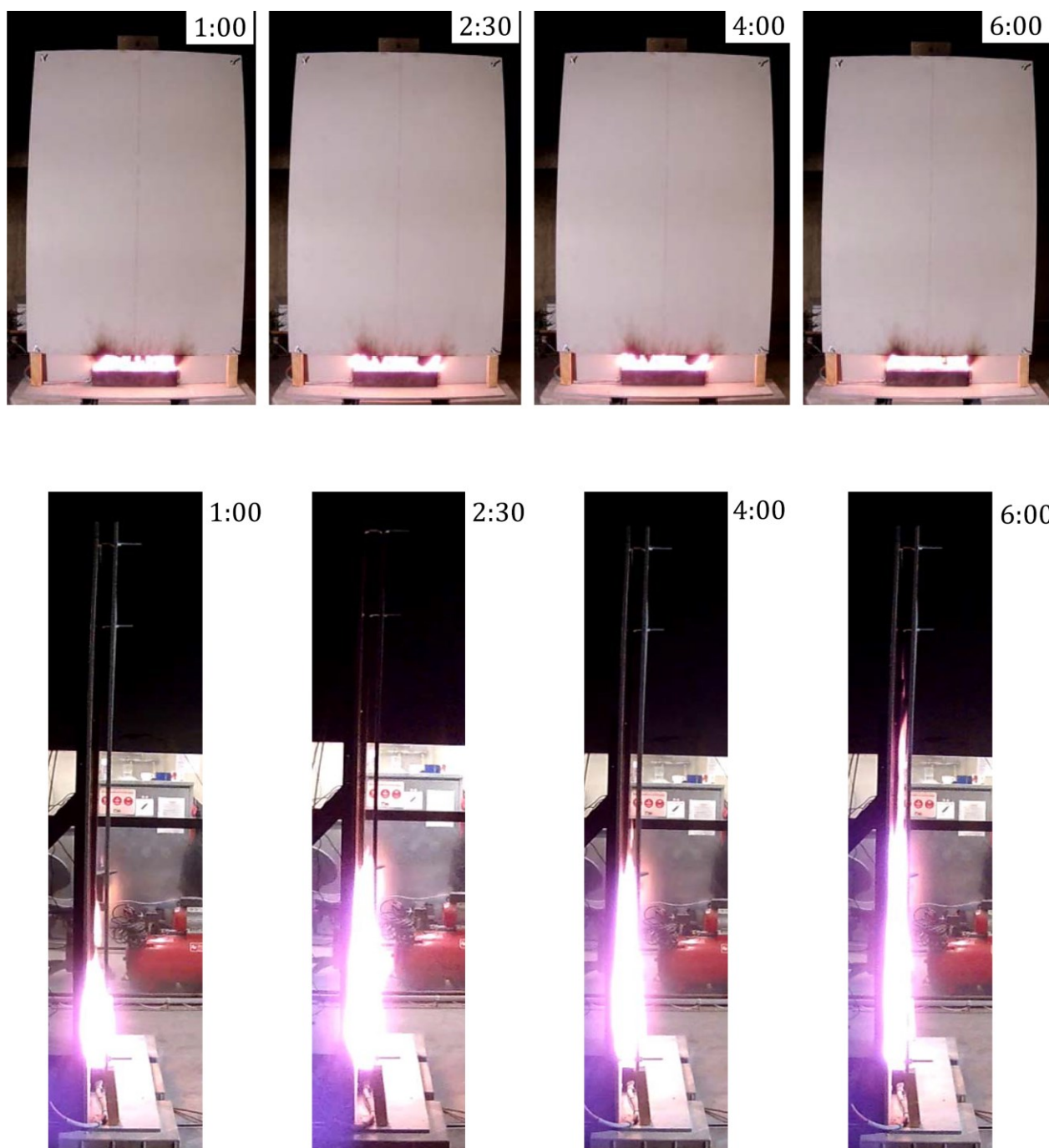
Příloha 3 – Fotodokumentace z experimentální analýza chování požáru v dutině



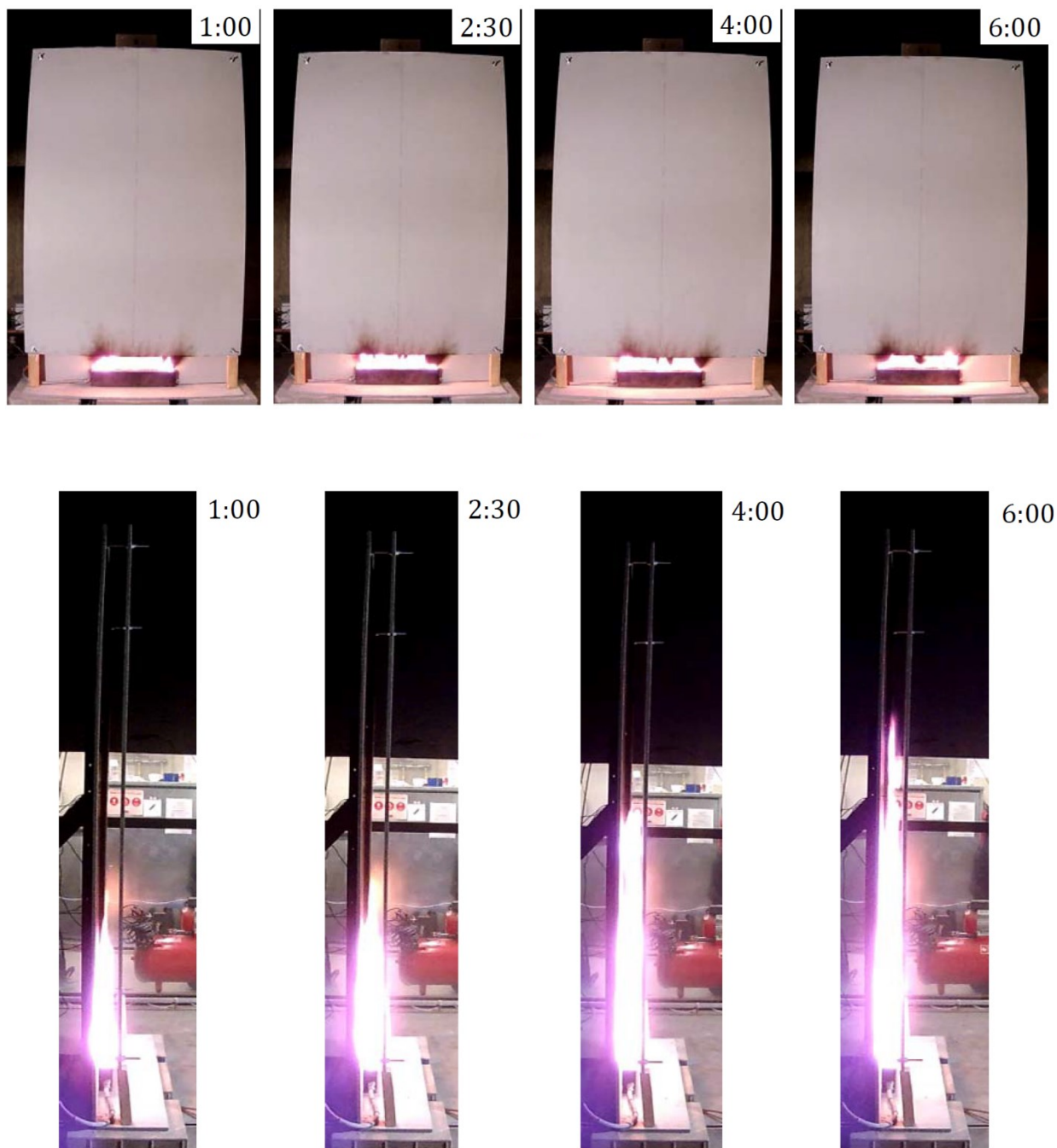
obr. 84: Fotodokumentace z průběhu zkoušky experimentální analýzy, sestava bez dutiny, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku



obr. 85: Fotodokumentace z průběhu zkoušky experimentální analýzy chování požáru v dutině šířky 30 mm, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku

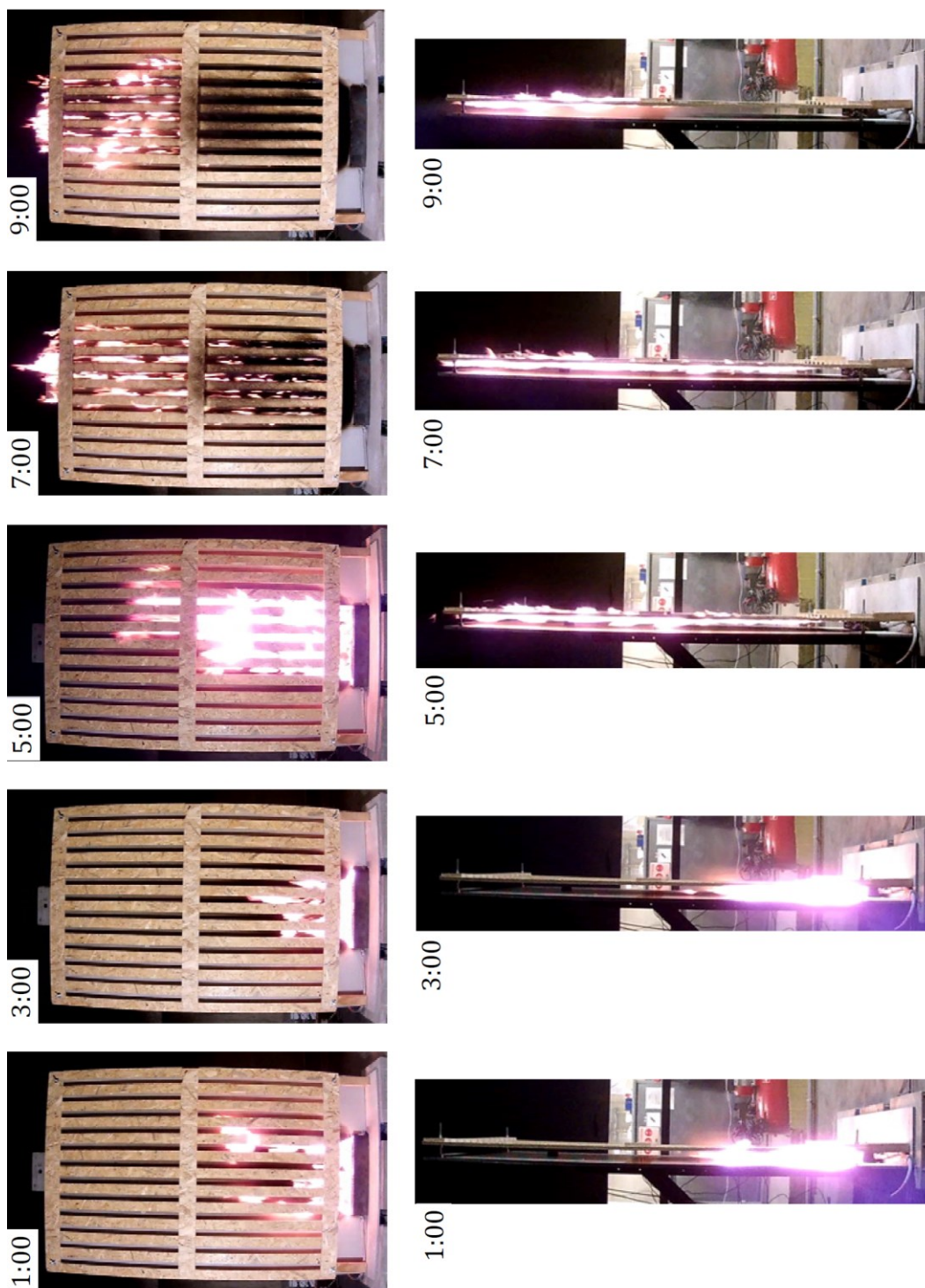


obr. 86: Fotodokumentace z průběhu zkoušky experimentální analýzy chování požáru v dutině šířky 50 mm, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku

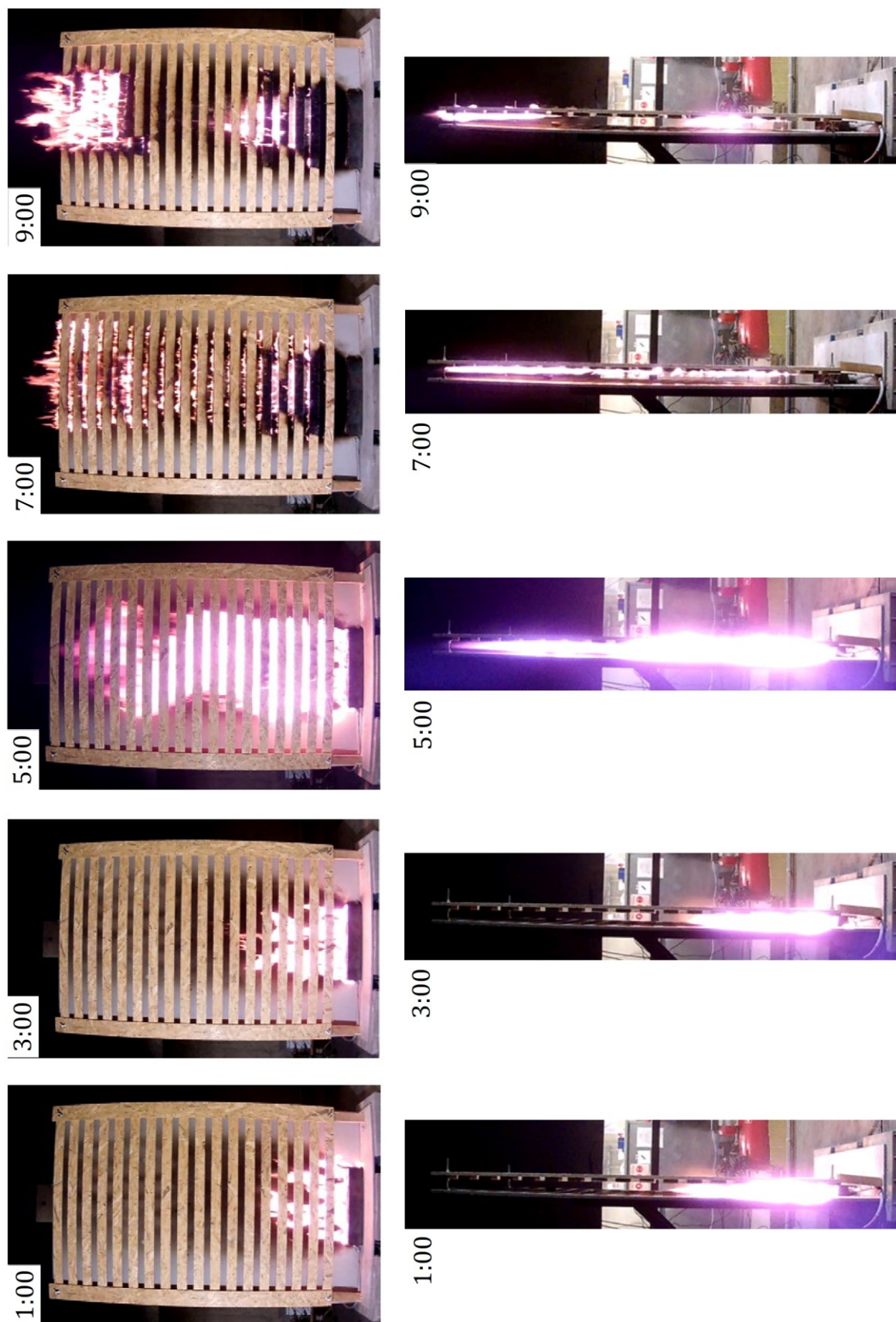


obr. 87: Fotodokumentace z průběhu zkoušky experimentální analýzy chování požáru v dutině šířky 70 mm, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku

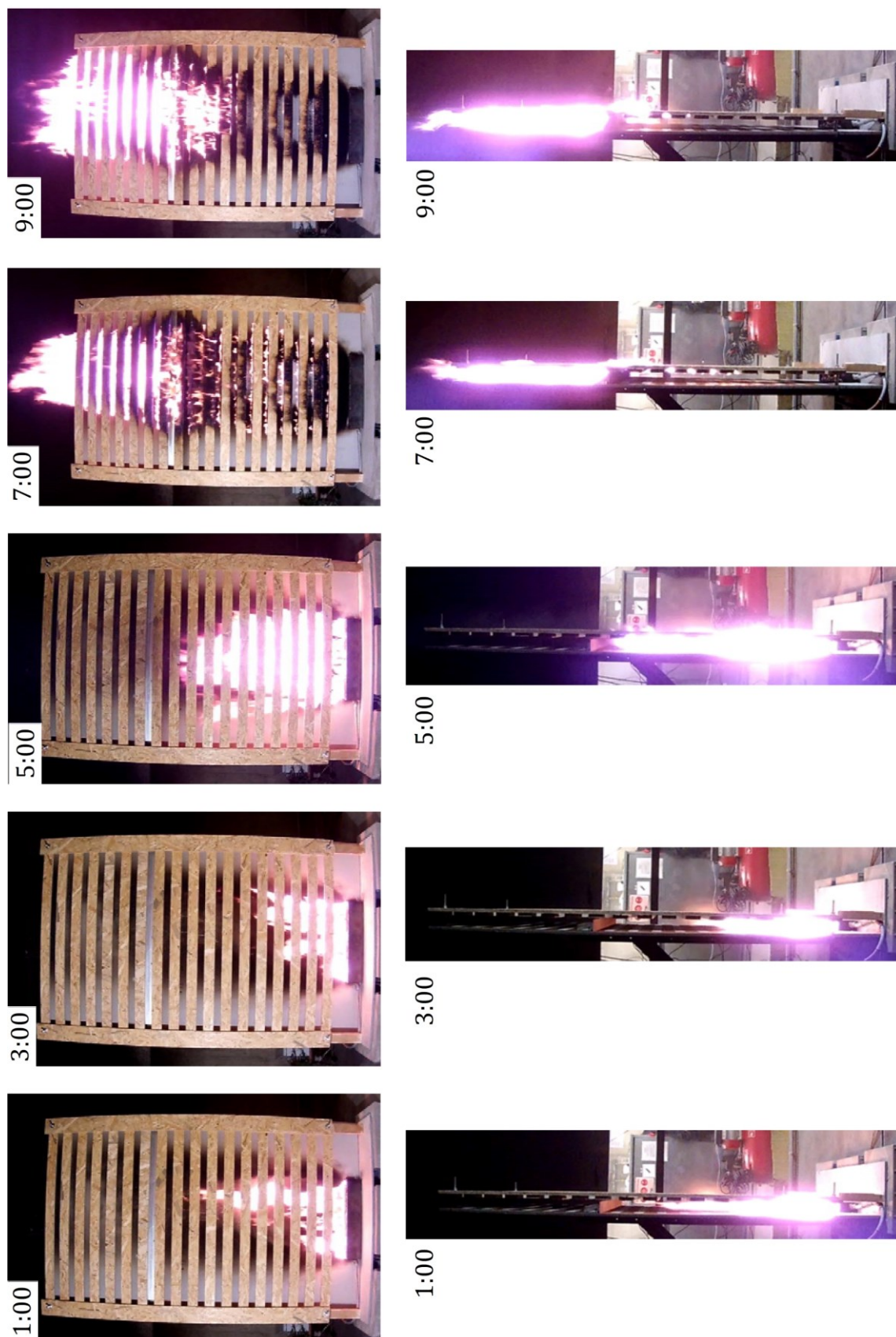
Příloha 4 – Fotodokumentace z experimentální zkoušky větraného fasádního systému s dřevěným obkladem



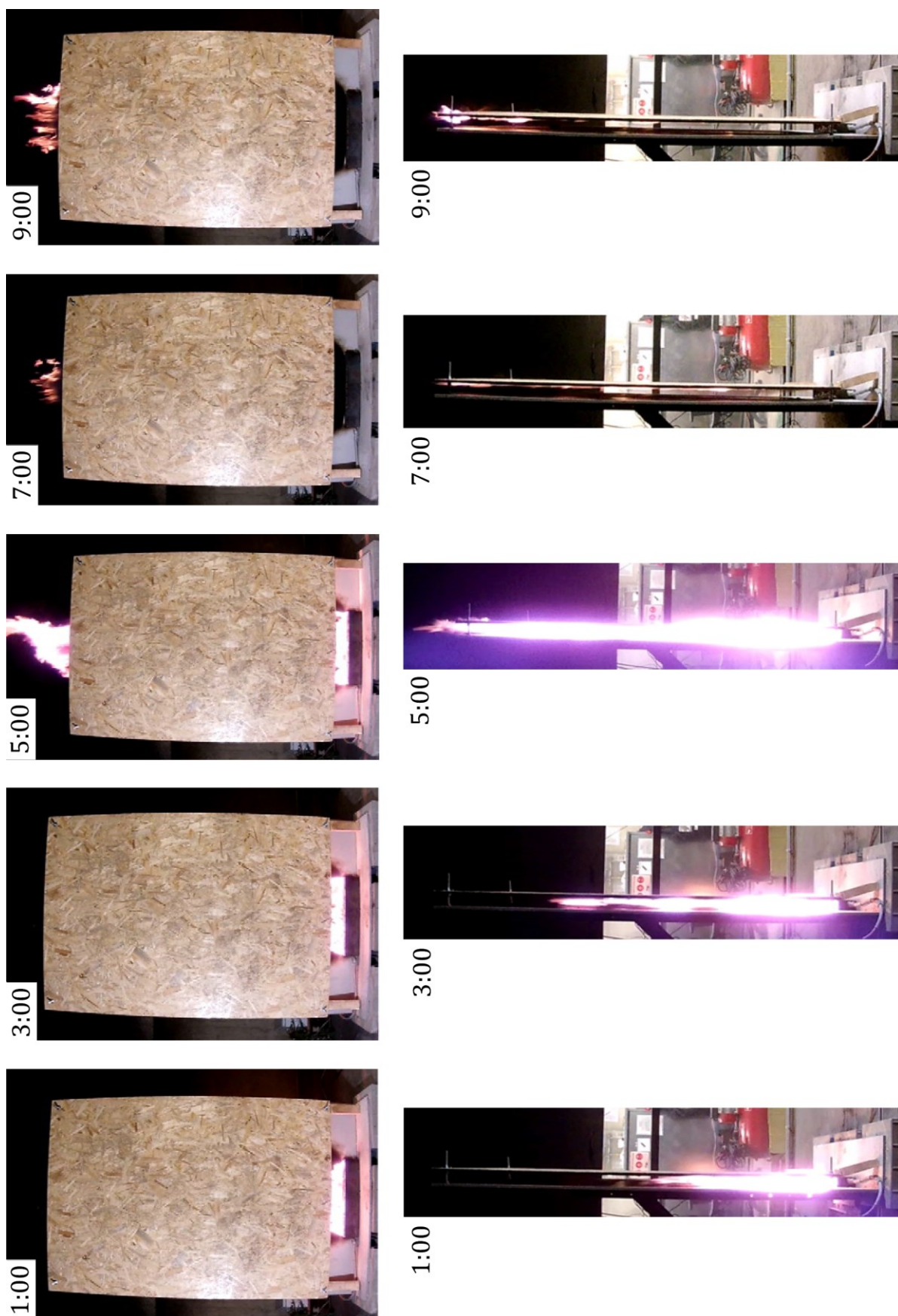
obr. 88: Fotodokumentace z průběhu experimentální zkoušky větraného fasádního systému se svisle kladeným dřevěným obkladem, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku



obr. 89: Fotodokumentace z průběhu experimentální zkoušky větraného fasádního systému s vodorovně kladeným dřevěným obkladem, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku



obr. 90: Fotodokumentace z průběhu experimentální zkoušky větraného fasádního systému s vodorovně kladeným dřevěným obkladem a cementovláknitou lamelou ve funkci požární bariéry, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku



obr. 91: Fotodokumentace z průběhu experimentální zkoušky větraného fasádního systému s celistvou OSB deskou, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku

Seznam obrázků

obr. 1: Závažné požáry výškových budov: a) Grenfell Tower (2017), zdroj: Design Building Wiki, b) Televizního kulturního centra v Pekingu (2009), zdroj: Arch Daily, c) bytového domu v Miláně (2021), zdroj: Architect's journal.....	3
obr. 2: Řez skladbou větraného fasádního systému.....	4
obr. 3: Možnosti šíření požáru: a) obkladem fasádního systému, b) exteriérem a spárou ve styku podlahy a obvodové konstrukce, c) konstrukcí fasádního systému [3]	5
obr. 4: Fotodokumentace výšky plamene ve větrané dutině šířky: 100 mm, 60 mm, 50mm, 40 mm, 30 mm, 20 mm [4]	7
obr. 5: Grafy dopadajících tepelných toků, legenda – w= šířka dutiny, one wall = bez účinku větrané dutiny, výkon hořáku: a) 16,5 kW/m, b) 24,8 kW/m, c) 32,3 kW/m, d) 40,4 kW/m	8
obr. 6: Rozmístění požárních bariér a termočlánků ve vzorku číslo: a) 2, b) 4 a 6, c) 5, d) 7 [6].....	10
obr. 7: Pohled na vzorky fasádních systémů v průběhu zkoušky v době 15, 30 a 60 min: a) vzorek 1, b) vzorek 2, c) vzorek 3, d) vzorek 4, e) vzorek 5, f) vzorek 6, g) vzorek 7 [6].....	10
obr. 8: Vizualizace plamene vystupujícího z hořícího prostoru oknem s rozdílnou výškou plamene v dutině a před fasádou [8].....	11
obr. 9: Rozdílné požární bariéry pro fasádní systémy: a) intumescentní pás ve vzduchové dutině (během montáže), b) děrovaný plech, c) dřevěný labyrint, d) kovová síťovina s výplní intumescentní hmotou včetně ukázky její funkce [8]	12
obr. 10: Rozdělení větrané dutiny pomocí bariéry v podobě nerezového plechu, legenda: 1 – difúzní fólie, 2, 3 a 4 nosné prvky fasádního obkladu, 5 – proudění vzduchu v dutině, 6 – vyústění mimo dutinu, 7 – přisávání vzduchu do dutiny [3]	12
obr. 11: Schematické znázornění šíření požáru pod obkladem dutinou a po povrchu obkladu [3] ...	14
obr. 12: Zkušební sestava pro velkorozměrovou požární zkoušku a s vyznačením polohy termočlánků a označením rozmístění fasádního obkladu, na levé straně cementovláknité desky, na pravé straně velkorozměrové keramické desky [15].....	16
obr. 13: Pohled na větraný fasádní systém v průběhu experimentu: a) v 6. minutě s patrnými odpadnuvšími částmi obkladu, b) v 7. minutě na deformaci fasádního obkladu nad spalovací komorou [15]	17
obr. 14: Pohled na zkušební vzorek větrané fasády po požáru [15]	17
obr. 15: Schéma možného rizika šíření požáru spárou mezi předsazeným oknem a stěnou [1].....	18
obr. 16: Schéma zkušebních sestav pro velkorozměrové zkoušky šíření požáru po fasádě: a) se středním účinkem požáru, b) s velkým účinkem požáru [21]	21
obr. 17: První velkorozměrová zkouška ETICS dle nově připravované metodiky šíření požáru po fasádě a) před realizací zkoušky, b) detailní pohled na spalovací komoru s dřevěnou hranicí, c) po realizaci zkoušky a dohašení	22
obr. 18: Rozmístění požárních bariér ve vztahu k fasádnímu systému dle Building Regulations 2010 [26] a [27]	28

obr. 19: a) vnitřní a vnější šíření požáru z jednoho požárního úseku do druhého, b) prvky obvodových stěn s požární odolností E 60 s minimální délkou $a + b + c + d \geq 1$ m	29
obr. 20: Rozmístění požárních bariér dle belgického královského dekretu pro: a) fasády s kontinuální větranou dutinou (větrané fasády), b) fasády bez kontinuální vzduchové dutiny (ETICS)	31
obr. 21: Schematický náčrt sestavy zkušební vzorku větrané dutiny v axonometrii	32
obr. 22: Schematický náčrt rozmístění měřicích zařízení	34
obr. 23: Dutina 30 mm – vizualizace plamenu z programu PyroSim: a) plamen v dutině v čase 120 s, b) plamen v čase 240 s prošleává po celé výšce dutiny, c) pohled do dutiny v čase 240 s	35
obr. 24: Dutina 30 mm – 2D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) 120 s (10 mm od líce zadní desky), b) 240 s (10 mm od líce zadní desky), c) 240 s (kolmo na střed dutiny); teplotní škála (°C)	36
obr. 25: Dutina 30 mm – 3D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) v čase 120 s, b) v čase 240 s, včetně teplotní škály (°C)	36
obr. 26: Dutina 30 mm – průběh teplot plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky: a) měření termočlánky TC ₁ -TC ₄ , b) aritmetický průměr z TC ₁ -TC ₄	37
obr. 27: Dutina 30 mm – průběh teplot plynů mimo dutinu 10 mm před obkladovou deskou: a) měření termočlánky TC ₇ -TC ₁₀ , b) vizualizace rozložení teploty (°C)	37
obr. 28: Dutina 30 mm – rychlost proudících plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky: a) měření rychlostními sondami V1-V4, b) vizualizace rozložení rychlosti v čase 120 s (m/s), c) vizualizace rozložení rychlosti v čase 240 s (m/s)	38
obr. 29: Dutina 30 mm – průběh tlakových rozdílů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky ..	38
obr. 30: Dutina 30 mm – průběh spočtené radiace	39
obr. 31: Dutina 50 mm – vizualizace plamenu z programu PyroSim: a) plamen v dutině v čase 120 s, b) plamen v čase 240 s	39
obr. 32: Dutina 50 mm – 2D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) 120 s (10 mm od líce zadní desky), b) 240 s (10 mm od líce zadní desky), c) 240 s (kolmo na střed dutiny), teplotní škála (°C)	40
obr. 33: Dutina 50 mm – 3D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) v čase 120 s, b) v čase 240 s, včetně teplotní škály (°C)	40
obr. 34: Dutina 50 mm – průběh teplot horkých plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky: a) měření termočlánky TC ₁ -TC ₄ , b) aritmetický průměr z TC ₁ -TC ₄	41
obr. 35: Dutina 50 mm – rychlost proudících plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky: a) měření rychlostními sondami V1-V4, b) vizualizace rozložení rychlosti v čase 120 s (m/s), c) vizualizace rozložení rychlosti v čase 240 s (m/s)	41
obr. 36: Dutina 50 mm – průběh tlakových rozdílů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky ..	42
obr. 37: Dutina 50 mm – průběh naměřené hustoty tepelného toku	42
obr. 38: Dutina 70 mm – vizualizace plamenu z programu PyroSim: a) plamen v dutině v čase 120 s, b) plamen v čase 240 s	42

obr. 39: Dutina 70 mm – 2D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) 120 s (10 mm od líce zadní desky), b) 240 s (10 mm od líce zadní desky), c) 240 s (kolmo na střed dutiny), teplotní škála (°C).....	43
obr. 40: Dutina 70 mm – 3D vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim: a) v čase 120 s, b) v čase 240 s, včetně teplotní škály (°C).....	43
obr. 41: Dutina 70 mm – průběh teplot horkých plynů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky, a) měřené termočlánky TC_1–TC_4, b) aritmetický průměr z TC_1–TC_4	44
obr. 42: Dutina 70 mm – rychlost proudících plynů v dutině ve vzdálenosti 10 mm od líce zadní desky, a) měřené rychlostními sondami V1–V4, b) vizualizace rozložení rychlosti v čase 120 s (m/s), c) vizualizace rozložení rychlosti v čase 240 s (m/s).....	44
obr. 43: Dutina 70 mm – průběh tlakových rozdílů v dutině v hloubce 10 mm od líce zadní desky a) naměřený pomocí P1–P4, b) aritmetický průměr	45
obr. 44: Dutina 70 mm – průběh spočítané hustoty tepelného toku	45
obr. 45: Vizualizace plamenu z programu PyroSim přibližně v čase 240 s: a) v dutině šířky 30 mm, b) v dutině šířky 50 mm c) v dutině šířky 70 mm.....	46
obr. 46: Aritmetický průměr průběhu teplot plynů v dutině v dutině ve vzdálenosti 10 mm od líce zadní desky.....	46
obr. 47: Vizualizace rozložení teplot v dutině z programu PyroSim, řez kolmý na rovinu x v hloubce dutiny 10 mm v čase 240 s: a) v dutině šířky 30 mm, b) v dutině šířky 50 mm, c) v dutině šířky 70 mm, včetně teplotní škály (°C).....	47
obr. 48: 3D vizualizace rozložení teplot z programu PyroSim v čase 240 s: a) v dutině šířky 30 mm, b) v dutině šířky 50 mm, c) v dutině šířky 70 mm, včetně teplotní škály (°C).....	47
obr. 49: Průběh rychlostí proudění plynů v dutinách šířek 30, 50 a 70 mm simulovaných ve vzdálenosti 10 mm od líce zadní desky, porovnání hodnot získaných spočtením aritmetického průměru z rychlostní sond V1–V4.....	48
obr. 50: Průběh tlakových rozdílů plynů v dutinách šířek 30, 50 a 70 mm simulovaných ve vzdálenosti 10 mm od líce zadní desky, porovnání hodnot získaných spočtením aritmetického průměru ze zařízení P1–P4	48
obr. 51: Průběhy spočítané toku v dutinách šířek 30, 50 a 70 mm	49
obr. 52: a) zkušební sestava, b) detail kotvení a podepření přední cementovláknité desky.....	51
obr. 53: Schéma rozmístění měřících zařízení v experimentu	52
obr. 54: Pohled na sestavu při prošlehávání plamene po celé výšce dutiny šířky 30 mm: a) zepředu, b) z boku.....	53
obr. 55: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 30 mm mezi experimentem a CFD modelem pro termočlánky: a) TC_1, b) TC_2, c) TC_3, d) TC_4.....	54
obr. 56: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 30 mm mezi experimentem a CFD modelem, aritmetický průměr z průběhu teplot naměřených termočlánky TC_1–TC_4.....	54
obr. 57: Porovnání průběhu tlakových rozdílů uvnitř dutiny šířky 30 mm mezi experimentem a CFD modelem.....	54
obr. 58: Porovnání průběhu hustoty tepelného toku uvnitř dutiny šířky 30 mm mezi experimentem a CFD modelem.....	55

obr. 59: Pohled na sestavu při prošlehávání plamene po celé výšce dutiny šířky 50 mm.....	55
obr. 60: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 50 mm mezi experimentem a CFD modelem pro termočlánky: a) TC_1, b) TC_2, c) TC_3, d) TC_4.....	56
obr. 61: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 50 mm mezi experimentem a CFD modelem, aritmetický průměr z průběhu teplot naměřených termočlánky TC_1–TC_4.....	56
obr. 62: Porovnání průběhu tlakových rozdílů uvnitř dutiny šířky 50 mm mezi experimentem a CFD modelem.....	57
obr. 63: Porovnání průběhu hustoty tepelného toku uvnitř dutiny šířky 50 mm mezi experimentem a CFD modelem.....	57
obr. 64: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 70 mm mezi experimentem a CFD modelem pro termočlánky: a) TC_1, b) TC_2, c) TC_3, d) TC_4.....	58
obr. 65: Porovnání teplot uvnitř dutiny šířky 70 mm mezi experimentem a CFD modelem, aritmetický průměr z průběhu teplot naměřených termočlánky TC_1–TC_4.....	58
obr. 66: Porovnání průběhu tlakových rozdílů uvnitř dutiny šířky 70 mm mezi experimentem a CFD modelem.....	59
obr. 67: Porovnání průběhu hustoty tepelného toku uvnitř dutiny šířky 70 mm mezi experimentem a CFD modelem.....	59
obr. 68: Vizuální zhodnocení průměrné dosahované výšky plamene z průběhu zkoušek pořízených z boku kamerou v dutině: a) šířky 30 mm, b) šířky 50 mm c) šířky 70 mm	60
obr. 69: Porovnání průběhu teplot z experimentálních zkoušek naměřených a) termočlánkem TC_1, b) termočlánkem TC_2, c) termočlánkem TC_3, d) termočlánkem TC_4.....	61
obr. 70: Porovnání aritmetického průměru průběhu teplot naměřených termočlánky TC_1–TC_4.....	61
obr. 71: Porovnání průběhu naměřených tlakových rozdílů při experimentech	61
obr. 72: Porovnání průběhu naměřené hustoty tepelného toku	62
obr. 73: Obklad: a) z OSB lamel svisle umístěných (vzorek 1), b) z OSB lamel vodorovně umístěných (vzorek 2), c) z OSB lamel vodorovně umístěných včetně požární bariéry (vzorek 3), d) z celistvé OSB desky (vzorek 4)	63
obr. 74: Porovnání průběhu teplot u zkoušek vzorků 1–4 naměřených a) termočlánkem TC_1, b) termočlánkem TC_2, c) termočlánkem TC_3, d) termočlánkem TC_4.....	65
obr. 75: Porovnání aritmetických průměrů z teplot naměřených termočlánky TC_1–TC_4.....	66
obr. 76: Porovnání hodnot tlaků při zkouškách dřevěných obkladů.....	67
obr. 77: Porovnání hustoty tepelného toku naměřené při zkouškách dřevěných obkladů.....	67
obr. 78: Fotodokumentace z průběhu experimentální analýzy – maximální výška plamene u: a) vzorku 1, b) vzorku 2, c) vzorku 3, d) vzorku 4	68
obr. 79: Fotodokumentace po ukončení experimentální analýzy: a) vzorek 1, b) vzorek 2, c) vzorek 3, d) vzorek 4.....	68
obr. 80: Detail: a) přířez cementovláknité desky ve funkci požární bariéry, b) přestup požáru vnějškem fasádního obkladu přes požární bariéru.....	69

obr. 81: Porovnání průběhu teplot CFD modelu: a) termočlánek TC_1, b) termočlánek TC_2, c) termočlánek TC_3, d) termočlánek TC_4	79
obr. 82: Porovnání průběhu povrchových teplot desky představující obvodovou stěnu (CFD model): a) WT_1, b) WT_2, c) WT_3, d) WT_4	80
obr. 83: Porovnání průběhu povrchových teplot vnitřní strany desky představující fasádní obklad (CFD model): a) WT_1, b) WT_2, c) WT_3, d) WT_4.....	81
obr. 84: Fotodokumentace z průběhu zkoušky experimentální analýzy, sestava bez dutiny, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku.....	82
obr. 85: Fotodokumentace z průběhu zkoušky experimentální analýzy chování požáru v dutině šířky 30 mm, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku.....	83
obr. 86: Fotodokumentace z průběhu zkoušky experimentální analýzy chování požáru v dutině šířky 50 mm, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku.....	84
obr. 87: Fotodokumentace z průběhu zkoušky experimentální analýzy chování požáru v dutině šířky 70 mm, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku.....	85
obr. 88: Fotodokumentace z průběhu experimentální zkoušky větraného fasádního systému se svisle kladeným dřevěným obkladem, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku	86
obr. 89: Fotodokumentace z průběhu experimentální zkoušky větraného fasádního systému s vodorovně kladeným dřevěným obkladem, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku	87
obr. 90: Fotodokumentace z průběhu experimentální zkoušky větraného fasádního systému s vodorovně kladeným dřevěným obkladem a cementovláknitou lamelou ve funkci požární bariéry, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku	88
obr. 91: Fotodokumentace z průběhu experimentální zkoušky větraného fasádního systému s celistvou OSB deskou, první řada – čelní pohled, druhá řada – pohled z boku	89

Seznam tabulek

tab. 1: Zkoumané vzorky v rámci experimentální studie [6]	9
tab. 2: Přehled tepelně technických vlastností nepoužívanějších izolačních materiálů [10]	13
tab. 3: Výčet PTCH některých hořlavých izolačních materiálů [11] a [12]	14
tab. 4: Porovnání vybraných PTCH kompozitních obkladů s retardéry a bez nich [14]	15
tab. 5: Zkušební metodiky v zemích Evropy [20]	20
tab. 6: Třída reakce na oheň vnějších povrchů obvodových stěn	26
tab. 7: Nové požadavky týkající se prvků fasádních systémů dle aktualizace deketu v Belgii [29] ..	30

Literatura

- [1] SALAĎÁK, Richard. *Požární rizika provětrávaných fasádních systémů – Diplomová práce*. B.m.: ČVUT v Praze, Fakulta Stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb. 2019
- [2] BAIČEV, Matěj. *Analýza skládaných fasádních systémů v podmínkách požáru*. B.m.: ČVUT v Praze, Fakulta Stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb. 2021
- [3] Y. MARTIN, S. EECKHOUT, L. LASSOIE, E. WINNEPENNINCKX, a B. DESCHOOLMEESTER. *Fire safety of multi-storey building facades*. B.m.: BBRI, Rue du Lombard 42, 1000 Brussels. 2017
- [4] LIVKISS, Karlis, Stefan SVENSSON, Bjarne HUSTED a Patrick VAN HEES. Flame Heights and Heat Transfer in Façade System Ventilation Cavities. *Fire Technology* [online]. 2018, **54**(3), 689–713. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-018-0706-2
- [5] *BS 8414-2:2015+A1:2017 Fire performance of external cladding systems - Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to, and supported by, a masonry substrate*. 2017
- [6] ČOLIĆ, Antonela a Ivana Banjad PEČUR. Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades. *Fire Technology* [online]. 2020, **56**(4), 1725–1754. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-020-00950-w
- [7] COLWELL, Sarah a Tony BAKER. *Fire performance of external thermal insulation for walls of multistorey buildings*. Third edition. Bracknell, Berkshire: IHS BRE Press, 2013. BR, 135. ISBN 978-1-84806-234-4.
- [8] JENSEN, Geir. Fire spread modes and performance of fire stops in vented façade constructions – overview and standardization of test methods. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2013, **9**, 02002. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20130902002
- [9] MIKULECKÁ KRISTÝNA a RADIMÍR NOVOTNÝ. *Přehled tepelných izolací ve stavební praxi se zaměřením na novodobé materiály a jejich ekonomické posouzení*. B.m.: Mladá věda. 2017
- [10] SCHIAVONI, S., F. D'ALESSANDRO, F. BIANCHI a F. ASDRUBALI. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **62**, 988–1011. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.05.045
- [11] ČSN 73 0824 *Požární bezpečnost staveb – Výchřevnost hořlavých látek*. 1992
- [12] KISLINGER, Radek. *Pozžárne technické charakteristiky a technické informace pro potreby ZPP*. Praha: Ministerstvo vnitra, Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, 2015. ISBN 978-80-86466-72-9.
- [13] IGOR OLESZKIEWICZ. Fire Exposure to Exterior Walls and Flame Spread on Combustible Cladding [online]. 1990. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01293079.pdf>
- [14] MCLAGGAN, Martyn S., Juan HIDALGO MEDINA, Andres F. OSORIO, Michael HEITZMANN, Jeronimo CARRASCAL TIRADO, David LANGE, Cristian MALUK ZEDAN a Jose TORERO CULLEN. *The Material Library of Cladding Materials* [online]. B.m.: The University of Queensland. 2019 [vid. 2021-12-11]. Dostupné z: doi:10.14264/uql.2019.441

- [15] SCHABOWICZ, Krzysztof, Paweł SULIK a Łukasz ZAWIŚLAK. Identification of the Destruction Model of Ventilated Facade under the Influence of Fire. *Materials* [online]. 2020, **13**(10), 2387. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13102387
- [16] WEGHORST, Roy, B HAUZE a Eric GUILLAME. *Determination of fire performance of ventilated facade systems on combustible insulation using LEPIR2*. B.m.: Proceedings of 14th international fire and engineering conference Interflam, Windsor, UK. 12 2016
- [17] ERIC, Guillaume. Reconstruction of Grenfell tower facade fire using multi-scale experimental and numerical approach. In: *FSF 2019 - 3rd International Symposium on Fire Safety of Facades: Fire Safety of facades 2019*. 2019.
- [18] FILIPI, Bohdan, SDRUŽENÍ POŽÁRNÍHO A BEZPEČNOSTNÍHO INŽENÝRSTVÍ, a VYSOKÁ ŠKOLA BĀŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Nauka o materiálu*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2003. ISBN 978-80-86634-11-1.
- [19] LADISLAV, Městka. Zkoušení náchylnosti stavebního výrobku k souvislému doutnání. In: . PAVUS, a.s., Autorizovaná osoba 216.
- [20] JOHAN ANDERSSON, LARS BOSTRÖM AROBERT JANSSON MCNAMEE. *Fire safety of facades* [online]. B.m.: RISE Research Institutes of Sweden BORÅS. Dostupné z: https://www.brandskyddsforeningen.se/globalassets/brandforsk/brandforsk_rapport_300_151_brandkrav-pa-fasader.pdf
- [21] MAREK POKORNÝ. Požární bezpečnost pro větrané fasády. In: *Požární bezpečnost stavebních objektů: XVII. ročník konference*. 2019.
- [22] ČSN 73 0802 *Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty*
- [23] ČSN 73 0804 ed. 2 *Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty*. 2020
- [24] ČSN 73 0810 *Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení*. 2016
- [25] *STN 92 0201-2 Požiarna bezpečnosť stavieb – Spoločné ustanovenia, Časť 2: Stavebné konštrukcie*. 2017
- [26] *The Building Regulations 2010. Approved document B, Volume 1, Approved document B, Volume 1.*, 2020. ISBN 978-1-914124-02-0.
- [27] *Building regulations 2010. Approved document B, Volume 2, Approved document B, Volume 2.*, 2020. ISBN 978-1-914124-03-7.
- [28] *Fire Performance of Green Roofs and Walls*. 2013. ISBN 978-1-4098-3997-2.
- [29] YVES, Martin. Fire Safety of facades 2019. In: *FSF 2019 - 3rd International Symposium on Fire Safety of Facades: Fire Safety of facades 2019*. 2019, s. 172–179.
- [30] ČSN EN 13501-2 *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení*. 2017
- [31] MCGRATTAN, Kevin B a Glenn P FORNEY. *Fire dynamics simulator (version 4) :: user's guide* [online]. 0 vyd. NIST SP 1019. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 2004 [vid. 2021-11-24]. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.SP.1019

-
- [32] WALD, Frantisek, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMANEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENYSEK, Marta KUREJKOVÁ, Ivo SCHWARZ, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, a STAVEBNÍ FAKULTA. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [33] BENKORICHI, Salah. FDS Mesh size calculator. In: [online]. Dostupné z: <https://www.sbenkorichi.com/calculators/fds-mesh/>
- [34] SPÁČIL, Martin. *Tlakové poměry a rychlost proudění plynů v podmínkách požáru*. B.m.: ČVUT v Praze, Fakulta Stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb. 2021
- [35] POKORNÝ, Marek. *Instalační šachty z požárního hlediska - Disertační práce*. B.m.: ČVUT v Praze, Fakulta Stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb. 2012