

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Diplomová práce

Vliv průběhu požáru na zuhelnatění dřeva

INFLUENCE OF FIRE BEHAVIOUR ON TIMBER CHARRING

Bc. Marie Křišťanová

vedoucí práce: prof. Ing. František Wald, CSc.

2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Křišťanová	Jméno: Marie	Osobní číslo: 477137
Zadávací katedra: K134		
Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb		
Studijní obor/specializace: -		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv průběhu požáru na zuhelnatění dřeva	
Název diplomové práce anglicky: Influence of Fire Behaviour on Timber Charring	
Pokyny pro vypracování: Shrnutí problematiky CFD model Validace modelu	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. František Wald, CSc.	
Datum zadání diplomové práce: 20. 9. 2022	Termín odevzdání DP v IS KOS: 9. 1. 2023 <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“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Marie Kříšťanová

Název diplomové práce: Vliv průběhu požáru na zuhelnatění dřeva

Základní část: podíl: 100 %

Formulace úkolů: Popis problematiky a stav poznání řešeného tématu, CFD model, validace modelu

Vyhodnocení a závěrečná doporučení

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:

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením prof. Ing. Františka Walda, CSc. a Ing. Kamily Cábové, Ph.D. za použití uvedených zdrojů.

V Praze dne

Marie Křišťanová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce, panu prof. Ing. Františku Waldovi, za vedení, za vytvoření příjemného prostředí a za možnost být součástí tohoto vědeckého projektu. Velké díky bych také ráda věnovala paní Ing. Kamile Cábové, Ph.D. za její čas a za cenné rady zkušenějšího. Ráda bych poděkovala Ing. Jakubu Šejnovi za jeho odpovědi na mé otázky, za velkou pomoc a technickou podporu. Experimentální výzkum byl podpořen Grantovou agenturou České republiky v rámci projektu GAČR 301-3012107a132 „Charring of timber under fully developed fire – Stochastic modelling.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na analýzu vlivu průběhu přirozeného požáru na zuhelnatění dřeva. První část práce je věnována porovnání zjednodušených a pokročilých přístupů stanovení hloubky zuhelnatění. Poukazuje na možnosti zohlednění parametrů požáru, možnosti a podmínky využití těchto metod.

Druhá část představuje poznatky z proběhlých experimentů dřevěných prvků vystavených přirozenému požáru. Porovnáva výsledky ze skutečných požárech experimentů s predikovanými hodnotami. Součástí této rešerše je praktický příklad. Jedná se o experiment přirozeného požáru, na kterém jsou aplikovány zjištěné poznatky a jsou získána nová data. Závěrem druhé části je analýza dat a srovnání s očekávanými výstupy.

Třetí část představuje parametrickou studii. Na modelu provedeného experimentu je zkoumán vliv parametru požáru. Závěrem je vyhodnocení vlivu parametru požáru.

Klíčová slova

Dřevo; hloubka zuhelnatění; rychlost zuhelnatění; přirozený požár; izoterma 300 °C; tepelný tok; numerický model; množství uvolněného tepla; výkon hořáku

Abstract

The diploma thesis is focused on analysis of influence of natural fire on charring of timber. The first part of the work is engaged in comparison of simple and advanced methods of timber charr determination. The work gives possibilities of taking into account parameters of fire in charring determination, possibilities and conditions of using these methods.

The second part presents the pieces of knowledge from passed experiments of timber elements exposed to natural fire. The results from real fire tests are compared with predicted values. There is also practical part of the work – experiment of natural fire with timber elements. The pieces of knowledge are applied on the practical case and new obtained data are presented. The second part is finished by analysis of data and comparison with predictions.

The third part is a parametric study of influence of fire. It is done on numerical model of passed experiment. The conclusion is evaluation of influence of fire parameters.

Keywords

Wood; Charring depth; Charring rate; Natural fire; Isotherm 300 °C; Heat flux; Numerical model; Heat release rate; Burning rate

Obsah

Čestné prohlášení	3
Poděkování	4
Abstrakt	5
Abstract	5
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam použitých symbolů a zkratk	10
1 Úvod	12
1.1 Motivace.....	12
1.2 Cíle práce	12
2 Současný stav poznání	13
2.1 Zjednodušené metody pro stanovení hloubky zuhelnatění	13
2.1.1 Metoda pro normový požár	13
2.1.2 Metoda pro parametrický požár	14
2.1.3 Metoda pro ASTM E 119	16
2.1.4 Metody Mikkola a Hietaniemi	19
2.1.5 Vliv průběhu požáru ve zjednodušených metodách.....	20
2.2 Pokročilé přístupy stanovení hloubky zuhelnatění.....	20
2.3 Speciální modely stanovení zuhelnatělé vrstvy	21
3 Chemické a fyzikální procesy ve dřevě	22
3.1 Teorie.....	22
3.2 Aplikace v modelech	23
4 Vliv přirozeného požáru na zuhelnatění dřeva	23
5 Experiment	31
5.1 Popis experimentu.....	31
5.2 Měření teploty	32
5.3 Průběh požáru.....	33
5.4 Sběr a analýza dat.....	34
5.4.1 Teploty.....	34
5.4.2 Hloubky zuhelnatění.....	36
5.4.3 Analýza dat.....	37
6 Shrnutí poznatků vlivu průběhu požáru na zuhelnatění dřeva	42
6.1 Teoretické poznatky	42
6.2 Poznatky z experimentální části.....	42
6.3 Hlubší studium poznatků.....	42
7 Model experimentu v RCT	43
7.1 Popis modelu	43

7.1.1	Geometrie a materiály	43
7.1.2	Modelování dřevěných vzorků.....	44
7.1.3	Snímače teploty a výstupy	47
7.1.4	Výpočetní síť.....	47
7.2	Validace modelu.....	47
7.3	Ověření a analýza dalších výstupů modelu	49
7.3.1	Vizuální validace	54
7.4	Velikost výpočetní sítě.....	55
7.4.1	Hrubý vs jemný výpočet.....	55
7.4.2	Jemný výpočet vs experiment	57
8	Model citlivostní studie.....	60
8.1	Úvod.....	60
8.2	Výběr modelu.....	60
8.3	Parametrická studie průběhu výkonu hořáku	60
8.3.1	Parametr studie.....	60
8.3.2	Výstupy výpočtů a analýza	62
8.3.3	Zuhelnatění dřeva.....	66
8.4	Parametrická studie maximálního výkonu.....	66
8.5	Parametrická studie nastavení ventilace	69
9	Závěr	71
	Literatura.....	72

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Závislost rychlosti zuhelnatění β na čase t pro parametrický požár [2]	15
Obrázek 2-2 Srovnání ISO 834 a ASTM E 119, závislost teploty na čase [7]	16
Obrázek 2-3 Srovnání průběhů rychlosti zuhelnatění Mikkoaly a Hietaniemiho s experimentem [11]	20
Obrázek 4-1 Teploty plynů v proběhlých experimentech [16]	24
Obrázek 4-2 Průběh teplot v hloubkách (a) 4 mm (b) 33 mm (c) 66 mm (d) 99 mm [16]	24
Obrázek 4-3 Odhad hloubek zuhelnatění s 90 % intervalem spolehlivosti [16]	25
Obrázek 4-4 Porovnání požárních scénářů 1-3 dle [17]	26
Obrázek 4-5 Ilustrace ke scénářům přirozeného požáru [17]	26
Obrázek 4-6 Teploty plynů a hloubky zuhelnatění měřené a predikované dle parametrické křivky [17]	27
Obrázek 4-7 Schematický obrázek zařízení FANCI [18]	28
Obrázek 4-8 Výsledné rychlosti zuhelnatění ve vysoce (křížky) a středně (kroužky) turbulentním prostředí v závislosti na tepelném toku (exposure level) [18]	29
Obrázek 4-9 Odseparované měřené vzorky [19]	30
Obrázek 5-1 Výkony hořáků během experimentů.....	31
Obrázek 5-2 Rozmístění nosníku a sloupů v RCT	32
Obrázek 5-3 Rozmístění termočlánků (TC) ve zkušební peci.....	32
Obrázek 5-4 Sloup 1 vystavený lokálnímu požáru (experiment 2).....	33
Obrázek 5-5 Fotografie zuhelnatělých průřezů (experiment 2).....	34
Obrázek 5-6 Teploty sloupu 1	35
Obrázek 5-7 Měření průřezů v softwaru AutoCAD	36
Obrázek 5-8 Zužování zuhelnatělé vrstvy.....	37
Obrázek 5-9 Hloubky zuhelnatění sloupu 1 po výšce	38
Obrázek 5-10 Orientace sloupu 1 vůči požáru.....	39
Obrázek 5-11 Porovnání d_{char} všech stran průřezu.....	40
Obrázek 5-12 Zuhelnatění v místě trhliny	41
Obrázek 7-1 Model RCT	43
Obrázek 7-2 Modelovaná geometrie a materiály.....	43
Obrázek 7-3 Teplotní charakteristiky dřeva [2].....	45
Obrázek 7-4 Teploty ve výšce 2400 mm nad hořákem (experiment a model s pyrolýzou a bez pyrolýzy) [23]	46
Obrázek 7-5 Teploty ve výšce 1720 mm na TC stromu (experiment a model s pyrolýzou a bez pyrolýzy) [23]	48
Obrázek 7-6 Teploty ve výšce 1420 mm na TC stromu (experiment a model s pyrolýzou a bez pyrolýzy) [23]	48
Obrázek 7-7 Teploty dřeva v hloubce 5 a 15 mm ve výšce 2020 mm (experiment a model)	49
Obrázek 7-8 Teploty na deskovém snímači ve výšce 800 mm (experiment a model)	50
Obrázek 7-9 Teploty povrchu dřevěného prvku ve výšce 800 a 1000 mm (experiment a model)	51

Obrázek 7-10 Teploty na povrchu a v hloubce dřevěného prvku ve výšce 800/1000 mm (model)	52
Obrázek 7-11 Teploty na povrchu a v hloubce dřevěného prvku ve výšce 1900/2020 mm (model)	52
Obrázek 7-12 Teplota povrchu dřevěného sloupu ve výšce 1000 a 1900 mm.....	53
Obrázek 7-13 Teplota povrchu dřevěného sloupu ve výšce 1000 a 1900 mm.....	54
Obrázek 7-14 Teplota na třech termočláncích v hrubém a jemném modelu (coarse, fine)	55
Obrázek 7-15.....	56
Obrázek 7-16 Validace modelu s jemnou výpočetní sítí (TEMPERATURE).....	58
Obrázek 7-17 Validace modelu s jemnou výpočetní sítí (INSIDE WALL TEMPERATURE)	59
Obrázek 8-1 Varianty výkonů.....	61
Obrázek 8-2 Výkon hořáku a teploty stropu nad hořákem.....	62
Obrázek 8-3 Teploty dřeva v hloubce 5 mm (všechny modely)	63
Obrázek 8-4 Teplota dřeva v hloubce 5 mm (model FDS Original a Experiment 1)	64
Obrázek 8-5 Teplota dřeva v hloubce 5 mm (model Experiment 1, Constant a Fall_t300_0)	65
Obrázek 8-6 Teplota dřeva v hloubce 5 mm (model Fall_t600_100 a Fall_t300_0).....	65
Obrázek 8-7 Teplota stropu nad hořákem (model Constant 300, 600 v1 a v2).....	67
Obrázek 8-8 Teplota dřeva v hloubce 5 mm (model Constant 300, 600 v1 a v2)	67
Obrázek 8-9 Teplota plynu a stropu nad hořákem, teplota dřeva v hloubce 5 a 15 mm (Constant 600 v2).....	68
Obrázek 8-10 Teplota plynu a stropu nad hořákem, teplota dřeva v hloubce 5 a 15 mm (Constant 600 v2 a 1200).....	69
Obrázek 8-11 Porovnání teplot z modelu Experiment 1 při dvou variantách ventilace	70

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Hodnoty β_0 a β_n [mm/min] uvedené v ČSN 1995-1-2 [2]	13
Tabulka 2-2 Charakteristiky dřeva pro výpočty požární odolnosti [8]	17
Tabulka 4-1 Hodnoty rychlostí zuhelnatění jednotlivých lamel CLT [17].....	26
Tabulka 7-1 Tepelné vlastnosti materiálů modelu.....	44
Tabulka 7-2 Kinetické parametry zvolené pro pyrolýzní model [22].....	46

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

b	$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1/2}\text{K}^{-1}$	Pohltivost ohraničujících konstrukcí
C	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	Rychlost zuhelnatění kolmo na vlákna
c	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
d	mm	Hloubka teplotní penetrace
$d_{\text{char},0}$	mm	Hloubka zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění
$d_{\text{char},n}$	mm	Nominální návrhová hloubka zuhelnatění zahrnující účinek zaoblení rohů
f_c	-	Faktor kontrakce zuhelnatěné vrstvy
h_p	mm	Tloušťka desky
k_t	-	Modifikační součinitel
k_ρ	-	Součinitel vlivu hustoty
k_t	-	Součinitel vlivu tloušťky
L_v	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	Měrné teplo
m	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1,23}$	Koeficient rychlost zuhelnatění
O	$\text{m}^{0,5}$	Součinitel otvorů
$q_{t,d}$	Wm^{-2}	Návrhová hustota požárního zatížení
$q_{s,t,d}$	Wm^{-2}	Tepelný tok
t	min	Čas
T	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
x_c	mm	Hloubka zuhelnatění

Řecké symboly

β_0	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	Jednorozměrná rychlost zuhelnatění při vystavení normovému požáru
β_n	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	Nominální návrhová rychlost zuhelnatění zahrnující účinek zaoblení rohů
β_{par}	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	Návrhová míra zuhelnatění během tepelné fáze parametrické teplotní křivky
$\beta_{0,\rho,t}$	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	Rychlost zuhelnatění s vlivem hustoty a vlhkosti
Γ	-	Součinitel zohledňující tepelné vlastnosti ohraničujících konstrukcí
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
μ		Vlhkost dřeva
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Objemová hmotnost
τ	mm	Časová konstanta
ω		Vlhkost dřeva

Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
1D	Jednorozměrné

1 Úvod

Dřevo je obnovitelný stavební materiál s velkým architektonickým potenciálem a širokým využitím. Nebýt nejistoty a nedostatku poznatků o jeho chování za požáru, bylo by dřevo díky jeho přednostem využíváno více. Tento nedostatek vede k přísným požadavkům v normách požární bezpečnosti, a tudíž k omezenému využití dřeva při navrhování. Rizikem naopak také může být nesprávné pojetí návrhu a nespolehlivost navržené konstrukce. Těmto rizikům lze předejít pokročilými přístupy návrhu, verifikací a dalším zkoumáním chování dřeva za požáru.

1.1 Motivace

Snaha co nejpřesněji popsat proces zuhelnatění dřeva je velkou výzvou pro požární bezpečnost staveb. Na základě znalostí o zuhelnatění dřeva se při posuzování požární odolnosti stanovuje redukovaný průřez, z kterého pak vychází únosnost dřevěných prvků za požáru, tj. požární odolnost s mezním stavem R.

Preskriptivní metody v požární bezpečnosti využívají normového požáru a původně byly určeny pro běžné a nekomplikované typy budov [1]. Poskytují jistou míru bezpečnosti, která je přijatelná z hlediska předepsaných omezení a nákladů na splnění požadavků. Normové zkoušky byly vytvořeny v návaznosti na velké požáry. Nebyly zaměřeny na hořlavé materiály, naopak měly sloužit ke zkoušení doporučených nehořlavých materiálů [1]. Specifika normového požáru reprezentuje typický požár, jehož dynamika však není ovlivněna hořlavostí konstrukcí. Charakteristiky zuhelnatění, tj. rychlost a hloubka zuhelnatění, jsou v Eurokódu 1995-1-2 uvažovány zjednodušeně, zpravidla jako nezávislé na ostatních parametrech. V reálných požárech tomu tak nebývá. Rychlost zuhelnatění je ovlivňována parametry požáru a nezůstává konstantní.

Je předpokládáno i dokázáno, že rychlost zuhelnatění nezůstává během přirozeného požáru konstantní. Její hodnota se v čase mění, a to v závislosti na průběhu požáru. Vliv na její vývoj bude mít rychlost počátečního rozvoje požáru, délka jeho trvání a také fáze ochlazování, tj. fáze, která není u normového požáru uvažována. Dále pak se bude hodnotit vliv přístupu kyslíku, vypařené vlhkosti, uvolněného tepla při rozkladu a další vlivy.

Otázkou je, jak významné tyto parametry jsou a jak je možné je zohlednit. Významnost parametrů bude ověřována na experimentech a v citlivostních analýzách numerických modelů. Způsoby, jak je možné parametry zohlednit, budou čerpány z již známých principů pokročilých modelů. Vzájemným srovnáním poznatků bude možné zvážit, ke kterým parametrům je bezpečné přihlížet. Je třeba nahlížet na problematiku komplexně nebo stačí jednoduchý model s méně parametry? Jak přistupovat ke zohlednění průběhu požáru při popisu zuhelnatění? Tyto a další otázky budou zodpovězeny v této práci.

1.2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je ověřit vliv průběhu požáru na zuhelnatění dřeva. Dílčí cíle jsou:

1. Rešerše a analýza současného stavu poznání
2. Analýza principů modelování zuhelnatění
3. Rešerše a analýza požárních experimentů z literatury
4. Realizace vlastních experimentálních měření
5. Analýza vlastních experimentálních dat

2 Současný stav poznání

Zuhelnatění dřeva je popisováno dvěma základními veličinami – hloubkou a rychlostí zuhelnatění. Hloubka zuhelnatění je měřitelná v experimentech a slouží ke stanovení skutečné požární odolnosti dřevěného prvku. Rychlost zuhelnatění slouží k výpočtu hloubky zuhelnatění, popisuje její vývoj v čase.

Tato kapitola je koncipována jako výčet metod, jak lze hloubku zuhelnatění stanovit. Rychlost zuhelnatění, pokud je známa, je zde považována pouze za jeden z nástrojů, jak stanovit hloubku zuhelnatění. V této práci jsou metody děleny na zjednodušené a pokročilé. Do jednoduchých modelů je možné zařadit normový postup stanovení na základě rychlosti zuhelnatění nebo jiné empirické výpočty. Pokročilé metody představují numerické modely nebo další speciální modely, ke kterým již nestačí kalkulačka nebo jednoduchý software.

Hloubku zuhelnatění je možné stanovit:

1. na základě rychlosti zuhelnatění * čas vystavení požáru
2. určením polohy izotermy 300° (doporučeno v ČSN EN 1995-1-2 [2])
3. speciálními modely založenými na popisu fyzikálních jevů

2.1 Zjednodušené metody pro stanovení hloubky zuhelnatění

2.1.1 Metoda pro normový požár

Norma ČSN EN 1995-1-2 [2] udává hodnoty rychlostí zuhelnatění β_0 a β_n pro různé druhy dřeva. Tyto hodnoty, uvedené v Tabulce 2-1, jsou určeny pro normový požár. Pro 1D vedení tepla (deskové prvky) je možné použít hodnoty jednorozměrné rychlosti zuhelnatění β_0 [mm/min]. Při výpočtu hloubky zuhelnatění u sloupů, nosníků, popř. jiných prutových prvků, je třeba zohlednit specifické zaoblení hranice zuhelnatění v rozích průřezu. Pro tyto výpočty se užívají hodnoty tzv. nominální návrhové rychlosti zuhelnatění β_n [mm/min], která zahrnuje účinek zaoblení rohů.

Tabulka 2-1 Hodnoty β_0 a β_n [mm/min] uvedené v ČSN 1995-1-2 [2]

	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
a) Dřevo jehličnatých dřevin a buk		
Lepené lamelové dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Rostlé dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Dřevo listnatých dřevin		
Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL s charakteristickou hustotou $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Desky		
Dřevěné obložení	0,9 ^a	–
Překližka	1,0 ^a	–
Desky na bázi dřeva jiné než překližky	0,9 ^a	–
^a Hodnoty platí pro charakteristickou hustotou 450 kg/m^3 a tloušťku desky 20 mm; pro ostatní tloušťky a hustoty viz 3.4.2(9).		

Předpokladem pro normový požár je rovnoměrné rozložení teplot okolo průřezu. Dřevěný prvek je vystaven ze všech stran stejné teplotě. Rychlost zuhelnatění je ze všech stran průřezu stejná.

Pokud se jedná o desku na bázi dřeva, která nesplňuje podmínky hustoty a tloušťky, je možné upravit rychlost zuhelnatění pomocí součinitelů k_ρ a k_h . Tyto součinitele zohledňují vliv hustoty desky a její tloušťku. Rychlost zuhelnatění $\beta_{0,\rho,t}$ se spočítá:

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 k_\rho k_h \quad (2.1)$$

$$k_\rho = \frac{450}{\sqrt{\rho_k}} \quad (2.2)$$

$$k_h = \frac{20}{\sqrt{h_p}} \quad (2.3)$$

kde ρ_k je charakteristická hustota v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

h_p tloušťka desky v milimetrech.

Hloubku zuhelnatění získáme vynásobením rychlosti zuhelnatění β_n (nebo β_0) a času t , jedná se zpravidla o čas požadované požární odolnosti. Pro jednorozměrné zuhelnatění se počítá hloubka zuhelnatění $d_{char,0}$ dle rovnice 2.4. Pro výpočet hloubky zuhelnatění průřezu, u kterého musí být zohledněn účinek zaoblení rohů, se užívá rovnice 2.5. Po dobu vystavení normovému požáru je uvažována konstantní rychlost zuhelnatění v čase a lineární vývoj hloubky zuhelnatění.

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (2.4)$$

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (2.5)$$

kde $d_{char,0}$ je návrhová hloubka zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění;

$d_{char,n}$ nominální návrhová hloubka zuhelnatění, která zahrnuje účinek zaoblení rohů.

Paulo Cachim a Jean-Marc Franssen [3] uvádí další možnou úpravu rychlosti zuhelnatění. Jedná se o způsob zohlednění vlhkosti dřeva. Tento nový vztah umožňuje stanovit rychlost zuhelnatění pro dřevo s jinou vlhkostí než 12 %, s kterou počítá norma ČSN EN 1995-1-2. Rychlost zuhelnatění s danou vlhkostí a hustotou se určí ze vztahu:

$$\beta_{\omega,\rho,0} = \beta_0 \left(\frac{1,12}{1 + \omega} \right)^{1,5} \sqrt{\frac{450}{\rho_0}} \quad (2.6)$$

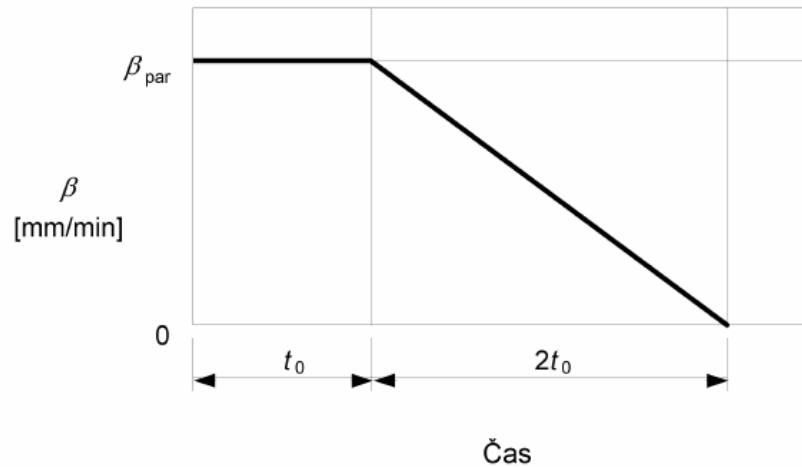
kde ω je vlhkost dřeva;

ρ_0 hustota dřeva v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.1.2 Metoda pro parametrický požár

V Příloze A normy ČSN EN 1995-1-2 [2] (dále jen Eurokód) je definován vztah mezi rychlostí zuhelnatění β a časem t pro dřevěné prvky vystavené parametrickému požáru. Rychlost zuhelnatění β [mm/min] je v prvotní fázi požáru konstantní, pak klesá lineárně v závislosti na čase (viz Obrázek 2-1). Pro výpočet hloubky zuhelnatění se užívá veličina β_{par} . Tato veličina se nazývá míra zuhelnatění během tepelné fáze parametrické křivky.

Ve výpočtu míry zuhelnatění β_{par} jsou zohledněny parametry požárního úseku, tj. součinitel otvorů O a pohltivost ohraničujících konstrukcí b , nepřímo pomocí součinitele Γ . V závislosti na řešeném prvku (průřezu) je možné v rovnici 2.7 použít jak nominální tak jednorozměrnou rychlost zuhelnatění [4].



Obrázek 2-1 Závislost rychlosti zuhelnatění β na čase t pro parametrický požár [2]

Míra zuhelnatění β_{par} se určí:

$$\beta_{par} = 1,5 \beta_n \frac{0,2 \sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16 \sqrt{\Gamma} + 0,08} \quad (2.7)$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} \quad (2.8)$$

kde O je součinitel otvorů, viz ČSN EN 1991-1-2, Příloha A [5];

b pohltivost pro celé ohraničující konstrukce, viz ČSN EN 1991-1-2, Příloha A [5].

Hloubka d_{char} se pro parametrickou teplotní křivku stanoví z vypočtené míry zuhelnatění β_{par} pomocí rovnic 2.9., 2.10 a 2.11. Popis hloubky zuhelnatění je rozdělen na tři časové úseky a vychází z časové závislosti rychlosti zuhelnatění (Obrázek 2-1). Hloubka zuhelnatění se stanoví:

v čase $t \leq t_0$

$$d_{char} = \beta_{par} t \quad (2.9.)$$

v čase $t_0 \leq t \leq 3t_0$

$$d_{char} = \beta_{par} \left(1,5t_0 - \left(\frac{t^2}{4t_0}\right) - \frac{t_0}{4} \right) \quad (2.10)$$

v čase $3t_0 \leq t \leq 5t_0$

$$d_{char} = 2\beta_{par} t_0 \quad (2.11)$$

kde

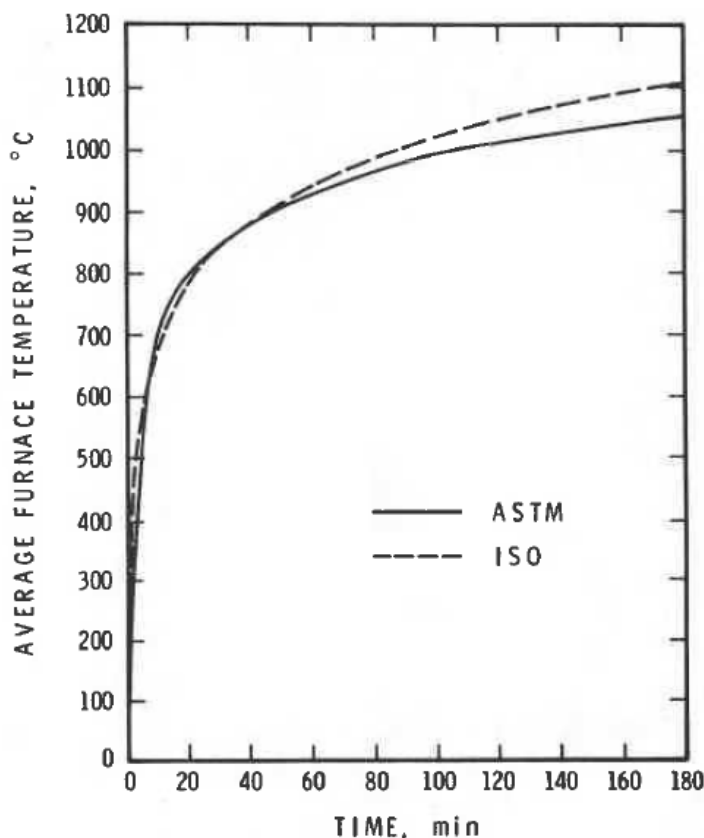
$$t_0 = 0,009 \frac{q_{t,d}}{O} \quad (2.12)$$

kde $q_{t,d}$ je návrhová hustota požárního zatížení vztažená na celkovou plochu ohraničujících konstrukcí, viz ČSN EN 1991-1-2, Příloha A [5].

Výše uvedené vztahy jsou určeny pouze pro prvky z jehličnatého dřeva. Dalším omezením je nutnost splnění podmínek pro parametry požárního úseku O a b uvedených v ČSN EN 1991-1-2 [5]. Tyto podmínky platí i pro použití parametrického požáru.

2.1.3 Metoda pro ASTM E 119

Severoamerický přístup používá jinou normovou teplotní křivku a matematické vztahy pro stanovení hloubky a rychlosti zuhelnatění. Scénář normového požáru je definován teplotní křivkou ASTM E 119. Tato křivka téměř kopíruje evropskou normovou teplotní křivku ISO 834 [6] (Obrázek 2-2). Postupy severoamerického přístupu jsou založeny na podobných principech jako evropské, avšak v doporučených hodnotách rychlosti zuhelnatění, podmínkách pro použití rovnic, předpokládaných vlhkostech dřeva a v dalších bodech se liší.



Obrázek 2-2 Srovnání ISO 834 a ASTM E 119, závislost teploty na čase [7]

Pro výpočet hloubky zuhelnatění je běžně užívána lineární závislost na rychlosti zuhelnatění jako u evropského přístupu. Pro dřeva, jako je Douglasova jedle (Douglas-fir, dub bílý (white oak) a borovice (Southern Pine) je možné vypočítat jejich rychlost zuhelnatění s ohledem na jejich vlhkost a hustotu pomocí vztahů 2.13 až 2.15 uvedených v [8].

$$C = (0,002269 + 0,00457\mu)\rho + 0,331 \text{ (Douglas-fir)} \quad (2.13)$$

$$C = (0,000469 + 0,00095\mu)\rho + 1,016 \text{ (Southern Pine)} \quad (2.14)$$

$$C = (0,001583 + 0,00318\mu)\rho + 0,594 \text{ (white oak)} \quad (2.15)$$

kde C je rychlost zuhelnatění kolmo na vlákna v $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$;

μ vlhkost dřeva;

ρ hustota dřeva v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Další variantou výpočtu požární odolnosti je použit nelineární model rychlosti zuhelnatění:

$$t = m \cdot x_c^{1,23} \quad (2.16)$$

kde t je čas v minutách;

x_c hloubka zuhelnatění v milimetrech;

m koeficient rychlosti zuhelnatění vypočtený pomocí rovnice 2.17 v $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1,23}$

$$m = -0,147 + 0,000564\rho + 1,21\mu + 0,532f_c \quad (2.17)$$

kde f_c je faktor kontrakce zuhelnatělé vrstvy.

Tabulka 2-2 Charakteristiky dřeva pro výpočty požární odolnosti [8]

Species	Density ^c (kg m^{-3})	Wood exposed to a constant heat flux ^b									
		Wood exposed to ASTM E 119 exposure ^a			Linear charring rate ^a (min mm^{-1})		Thermal penetration depth d^g (mm)		Average mass loss rate ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
		Char contraction factor ^d	Linear charring rate ^a (min mm^{-1})	Non-linear charring rate ^e ($\text{min mm}^{-1,23}$)	Thermal penetration depth ^h (mm)	18- kW m^{-2} heat flux	55- kW m^{-2} heat flux	18- kW m^{-2} heat flux	55- kW m^{-2} heat flux	18- kW m^{-2} heat flux	55- kW m^{-2} heat flux
Softwoods											
Southern Pine	509	0.60	1.24	0.56	33	2.27	1.17	38	26.5	3.8	8.6
Western redcedar	310	0.83	1.22	0.56	33	—	—	—	—	—	—
Redwood	343	0.86	1.28	0.58	35	1.68	0.98	36.5	24.9	2.9	6.0
Engelmann spruce	425	0.82	1.56	0.70	34	—	—	—	—	—	—
Hardwoods											
Basswood	399	0.52	1.06	0.48	32	1.32	0.76	38.2	22.1	4.5	9.3
Maple, hard	691	0.59	1.46	0.66	31	—	—	—	—	—	—
Oak, red	664	0.70	1.59	0.72	32	2.56	1.38	27.7	27.0	4.1	9.6
Yellow-poplar	504	0.67	1.36	0.61	32	—	—	—	—	—	—

^aMoisture contents of 8% to 9%.

^bCharring rate and average mass loss rate obtained using ASTM E 906 heat release apparatus. Test durations were 50 to 98 min for 18- kW m^{-2} heat flux and 30 to 53 min for 55- kW m^{-2} heat flux. Charring rate based on temperature criterion of 300 °C and linear model. Mass loss rate based on initial and final weight of sample, which includes moisture driven from the wood. Initial average moisture content of 8% to 9%.

^cBased on weight and volume of oven-dried wood.

^dThickness of char layer at end of fire exposure divided by original thickness of charred wood layer (char depth).

^eBased on temperature criterion of 288 °C and linear model.

^fBased on temperature criterion of 288 °C and nonlinear model of Equation (18-3).

^gAs defined in Equation (18-6). Not sensitive to moisture content.

Pro rovnice 2.16 a 2.17 jsou stanoveny doporučené charakteristiky 8 druhů dřeva (Tabulka 2-2). Součinitel kontrakce zuhelnatělé vrstvy v rovnici 2.17 vyjadřuje podíl zbylé hloubky zuhelnatění a původní hloubky zuhelnatění.

Dále jsou v [8] uvedeny rychlosti zuhelnatění pro konstantní tepelný tok (Tabulka 2-2). Dle [8] existují i hodnoty rychlostí zuhelnatění pro konstantní teploty 538, 815 a 927 °C. Teplota u vnitřní hranice zuhelnatělé vrstvy (hranice s pyrolyzujícím dřevem) je předpokládána 300 °C. Ve vzdálenosti 6 až 7 mm od této hranice je předpokládána teplota 180 °C. Teplotní profil pod vrstvou zuhelnatění může být vyjádřen pomocí vztahu 2.18 [8], který vychází z obecné rovnice 2.19 [9].

$$T = T_i + (300 - T_i)\left(1 - \frac{x}{d}\right)^2 \quad (2.18)$$

$$T = T_i + (T_p - T_i)\left(1 - \frac{x_i}{a}\right)^2 \quad (2.19)$$

kde T je teplota v °C;

T_i počáteční teplota v °C;

T_i počáteční teplota v °C;

x vzdálenost od hranice zuhelnatělé vrstvy v milimetrech;

x_i hloubka zuhelnatění i -té vrstvy v milimetrech;

d hloubka teplotní penetrace v milimetrech;

a referenční hloubka zuhelnatění v milimetrech.

Předchozí možnosti stanovení rychlosti zuhelnatění předpokládají rozvoj požáru dle normové teplotní křivky (ISO 834, ASTM E 119), popřípadě parametrické teplotní křivky. Žádný vztah zatím není aplikovatelný na scénáře přirozeného požáru a nezohledňuje vliv průběhu požáru. Jediným náznakem vlivu průběhu požáru jsou parametry požárního úseku v parametrické míře zuhelnatění (otvory a hořlavost konstrukcí). Hustota požárního zatížení má vliv pouze na trvání konstantní rychlosti zuhelnatění (čas t_0). Daly by se zmínit i rychlosti zuhelnatění dřeva při daném konstantním tepelném toku (Tabulka 2-2). Avšak ty jsou omezeny na dvě hodnoty tepelného toku, a to 18 a 55 kW·m⁻².

Na základě matematického modelu PDE (modified partial differential equation) Yanga Lizhonoga a kol. [10] jsou navrženy různé druhy rovnic pro výpočet hloubky zuhelnatění pro vzorek vystavený konstantnímu tepelnému toku a lineárně rostoucímu tepelnému toku. Pro konstantní tepelný tok je vhodné použít exponenciální model (rovnice 2.21). Pro tepelný tok rostoucí v čase (zkoušeno pro rychlosti 0,07; 0,113; 0,208; 0,306; 0,425 kWm⁻²s⁻¹), je doporučen lineární model s počátečním časem tvorby zuhelnatění a (rovnice 2.20).

$$t = m \cdot x_c + a \quad (2.20)$$

$$t = m \cdot x_c^b \quad (2.21)$$

kde t je čas v sekundách;

a počáteční čas v sekundách;

m koeficient zuhelnatění v s·m⁻¹;

x_c hloubka zuhelnatění v metrech (popsáno v publikaci [10]).

2.1.4 Metody Mikkola a Hietaniemi

Metody výpočtu rychlosti zuhelnatění dle Mikkoly a Hietaniemiho jsou aplikovatelné na jakýkoliv požární scénář. Nutností je znalost tepelného toku. Vzorec dle Hietaniemiho obsahuje faktor koncentrace kyslíku

Rychlost zuhelnatění dle Mikkoly (1991) se stanoví

$$\beta = (q_e - q_L) / (\rho \cdot \{c_O \cdot (T_p - T_0) + L_v + [(c_w - c_{O,1}) \cdot (T_v - T_0) + L_{v,w}] \cdot w\}) \quad (2.20)$$

kde q_e je tepelný tok na jednotku plochy, složený z tepelného toku radiace a konvekce v $W \cdot m^{-2}$

- q_L tepelné ztráty na povrchu zuhelnatělé vrstvy v $W \cdot m^{-2}$;
- ρ hustota dřeva ($512 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
- c_O měrná tepelná kapacita dřeva při teplotách mezi T_0 a T_p v $J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- c_w měrná tepelná kapacita odpařování vody v $J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- $c_{O,1}$ průměr měrných tepelných kapacit při teplotách $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $99 \text{ }^\circ\text{C}$ v $J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- T_p průměrná teplota vrstvy pyrolýzy ($360 \text{ }^\circ\text{C}$);
- T_0 teplota počáteční ($20 \text{ }^\circ\text{C}$);
- T_v teplota odpařování vody ($100 \text{ }^\circ\text{C}$);
- L_v měrné teplo odpařování suchého dřeva ($2250 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$);
- $L_{v,w}$ měrné teplo odpařování vody ($2260 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$);
- w vlhkost dřeva ($12 \text{ } \%$).

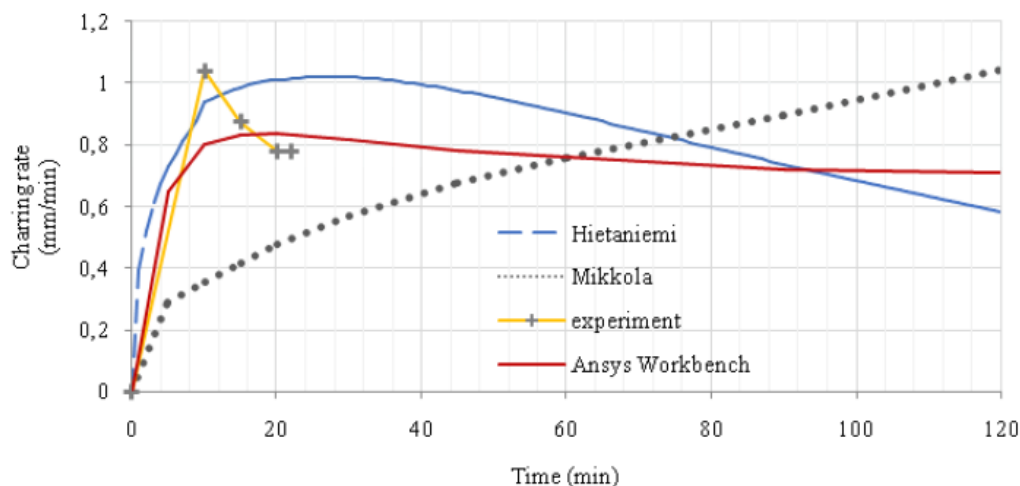
Rychlost zuhelnatění dle Hietaniemiho (2005) se stanoví vztahem

$$\beta = f(\chi_{O_2}, t) \cdot (C \cdot q_{std}(t)^p) / [(\rho + \rho_0) \cdot (A + B \cdot w)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.24)$$

kde q_e je tepelný tok na jednotku plochy, složený z tepelného toku radiace a konvekce v $W \cdot m^{-2}$

- $f(\chi_{O_2}, t)$ faktor závisející na koncentraci kyslíku;
- $q_{std}(t)$ tepelný tok v $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$;
- p parametr ($0,5$);
- ρ hustota dřeva ($512 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
- A parametr ($800 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$);
- B parametr ($2490 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$);
- w vlhkost dřeva ($12 \text{ } \%$);
- t čas vystavení požáru v min;
- τ časová konstanta (100 min).

Metody jsou popsány v [11]. V uvedené analýze je srovnávána rychlost zuhelnatění experimentu normového požáru s rychlostí zuhelnatění vypočteného pomocí vzorců Mikkoly, Hietaniemiho a pomocí softwaru Ansys (Obrázek 2-3). Výpočet dle Mikkoly nezohledňuje žádnými parametry rychlost rozvoje požáru na počátku. Naopak Hietaniemiho křivka rychlosti zuhelnatění roste obdobně jako v experimentu, lépe předpovídá počáteční fázi požáru.



Obrázek 2-3 Srovnání průběhů rychlosti zuhelnatění Mikkoly a Hietaniemiho s experimentem [11]

2.1.5 Vliv průběhu požáru ve zjednodušených metodách

Zjednodušené metody by dle svého názvu neměly být složité. Nezohledňují zbytečně mnoho parametrů, a přesto lze získat spolehlivé hodnoty. Zjednodušené výpočty rychlosti a hloubky zuhelnatění se nedají použít ve všech případech, mají svá omezení a limity pro vstupní parametry. Většina empirických výpočtů se váže na jedinou teplotní křivku. Veličiny, jako je hustota a vlhkost dřeva, jsou dané a pokud se liší, je nutné je dodatečně zohlednit. Pro některé situace je doložena nevhodnost jejich použití (viz [11]). Některé neplatí pro jiné než normové požární scénáře.

V empirických výpočtech je snadné zohlednit jeden, popř. dva parametry. Najít vzájemnou matematickou závislost mezi více parametry je obtížné. Je pravděpodobně nemožné vytvořit jednoduchý model rychlosti zuhelnatění, který by zahrnoval vše, co může ovlivňovat proces zuhelnatění. Pro studium vlivu průběhu požáru je vhodné aplikovat pokročilé přístupy.

2.2 Pokročilé přístupy stanovení hloubky zuhelnatění

Hloubku zuhelnatění je mimo jiné možné stanovit numerickými modely. Na základě modelů CFD nebo jiných pokročilých postupů (například zónovým modelem a vyřešením přestupu tepla do konstrukce) lze získat průběh teplot po průřezu a po délce prvku. Podle většiny publikací a Eurokódu je doporučeno jako hranici hloubky zuhelnatění použít izotermu 300 °C. V některých publikacích jsou uvedeny i jiné hodnoty v rozmezí 260 – 350 °C [11]. Nejnovější poznatky [12] upozorňují na proměnnost hodnoty izotermu v závislosti na teplotní křivce.

Pro modelování přestupu tepla do konstrukce a vedení tepla v konstrukci je třeba zadat vhodné kinetické parametry (kapitola 3.2), součinitele přestupu tepla a tepelné vlastnosti dřeva. V Eurokódu je uveden součinitel přestupu tepla, hodnoty tepelné vodivosti, měrného tepla a poměrné hustoty dřeva v závislosti na teplotě. Tyto hodnoty jsou deklarovány pouze pro jehličnaté dřeviny, které jsou vystavené účinkům normového požáru (čl. B.2.1 [2]). Přesto je z důvodu neznalosti přesnějších hodnot jejich použití stále jedna z nejpřijatelnějších možností.

Dle [13] jsou hodnoty tepelných vlastností dřeva z Eurokódu (dále efektivní vlastnosti) v jiných požárních scénářích zavádějí. Je-li například scénářem parametrický požár přesahující teploty ISO 843 [6], teplota v průřezu a hloubka zuhelnatění vychází větší, tj. konzervativní. Naopak výsledné teploty i hloubky zuhelnatění u parametrického požáru s mírnějším průběhem jsou oproti normovému požáru menší. Využití efektivních vlastností bez úpravy (kalibrace) proto není považováno za bezpečné ([4], [13]). Pro teploty nad 350 °C König [13] doporučuje modifikovat tepelné vlastnosti. V této pokročilé teplotní fázi probíhají v zuhelnatělé vrstvě procesy, jako například zpětná pyrolýza, vznik trhlin a odpařování, které jsou řízeny aktuální rychlostí uvolňování tepla.

Návrh modifikace tepelné vodivosti dřeva v závislosti na součiniteli Γ a hustotě požárního zatížení q_{td} [5] je publikován ve vědeckém článku [4]. Výpočet modifikačního součinitele 2.12 je určen pro parametrický požár při teplotách nad 350 °C a pouze pro fázi ohřevu. Tato kalibrace zavádí jednoduchým způsobem součinitel pro zohlednění vlivu některých parametrů požáru.

$$k_{\lambda,mod} = k_{\Gamma,mod} k_{qtd,mod} \quad (2.12)$$

$$k_{\Gamma,mod} = 1,5\Gamma^{-0,48} \quad (2.13)$$

$$k_{qtd,mod} = \sqrt{\frac{q_{td}}{210}} \quad (2.14)$$

kde $k_{\lambda,mod}$ modifikační faktor tepelné vodivosti;

$k_{\Gamma,mod}$ modifikační faktor vlivu součinitele Γ

$k_{qtd,mod}$ modifikační faktor vlivu hustoty požárního zatížení.

2.3 Speciální modely stanovení zuhelnatělé vrstvy

Jedním z nových přístupů je numerický model PyCiF vyvinutý Robertem Pečenkem a Tomášem Hozjanem [12], [14]. PyCiF propojuje pokročilý, tzv. heat-mass model s modelem pyrolýzy. Model pyrolýzy dřeva je odvozen od pyrolýzy celulózy. Druhý submodel, tzv. heat-mass model, vychází ze zákona zachování energie a zákona zachování hmoty. Ty popisují rovnice sdílení tepla se zohledněním sorpce a rovnice transportu plynů (okolních a pyrolytických) a vlhkosti.

Pomocí modelu PyCiF je možné stanovit hloubku zuhelnatění, aniž by musela být určena poloha izotermy 300 °C. Teplota na hranici zuhelnatělé vrstvy může být naopak výstupem tohoto modelu. Dle autorů je model aplikovatelný pro normový i přirozený požár a dosahuje velké přesnosti při validaci s experimentálními výsledky. Tento pokročilý model je založen na detailním popisu fyzikálních jevů ve dřevě během požáru. Je zatím nejkompaktnějším modelem z hlediska vlivu přirozeného požáru na chování dřeva poznaným v rámci studia vlivu přirozeného požáru na zuhelnatění dřeva.

Citlivostní analýza v modelu PyCiF [14] ukazuje významnost vlivu parametrů na výslednou hloubku zuhelnatění. Velký vliv mají součinitele aktivní celulózy a zuhelnatělé vrstvy. Naopak vliv těkavých látek tak významný není. Závěry analýzy rychlého rozvoje požáru jsou oproti pomalému rozvoji odlišné. Jedná se o citlivostní analýzu pro validaci modelu, avšak pro pochopení fyzikálních jevů mohou být závěry přínosné.

Dalším modelem, který pracuje s podrobnějším popisem chování dřeva za požáru, je zónový model vyvíjený C. Wadem a kol. [15]. Jedná se o model určený ke stanovení hloubky zuhelnatění dřevěných panelů uvnitř požárního úseku. Scénářem je plně rozvinutý požár před i po vzplanutí.

Podstatou je zónový model doplněný o submodel pyrolýzy a přídavek tepelného toku od plamene na hořících dřevěných plochách. Hodnota přídavného tepelného toku vychází z koncentrace kyslíku a hmotnostních ztrát při spalování dřeva, což je důležité pro popis okrajových podmínek ve fázi chladnutí [15]. Koncentrace kyslíku má v této fázi zásadní vliv na vývoj teplot [15]. Tepelná vodivost dřeva, zuhelnatělé vrstvy i částečně zuhelnatělého dřeva je uvažována dle Janssense a Douglase (2004). V úvahu je brán vliv tepelné vodivosti zuhelnatělé vrstvy dle Parkera (1989).

Při srovnání výsledků modelu s některými experimenty přirozeného požáru jsou během fáze chladnutí teploty z modelu podhodnocovány, proto je navržena kalibrace tepelné vodivosti. Kalibrační faktor je doporučen volit 1,6 pro nezuhelnatělé složky s teplotou nad 50 °C. Přesto při požáru s trváním delším než 60 minut nebo v pokročilé fázi chladnutí může docházet k podhodnocení hloubky zuhelnatění. Rychlost fáze chladnutí je v modelu předpokládána vyšší. Hloubka zuhelnatění je stanovována na základě izotermie 300 °C. V modelu není zohledněna oxidace zuhelnatělé vrstvy a neuvažuje se s vodní párou, která se odpaří a ovlivňuje povrchy požárního úseku.

3 Chemické a fyzikální procesy ve dřevě

3.1 Teorie

Pro pochopení externích vlivů působících na chování dřeva během požáru je třeba znát základní procesy ve dřevě za zvýšených teplot. Studium nových poznatků vyžaduje alespoň základní znalost názvosloví a hlavních principů. Následující popis je převzat z kapitoly Thermal Degradation of Wood z [8] a poskytuje pouze základní představu v oboru organické a fyzikální chemie.

Dřevo má tři základní chemické složky – lignin, celulóza a hemicelulóza. Jejich degradace určuje termické chování dřeva jako celku. Již při teplotách do 100 °C dochází k první degradaci. Jedná se o nevratnou redukci pevnosti, která závisí na vlhkosti, způsobu a době vystavení ohřevu a druhu dřeva. Nedochází ke ztrátě hmotnosti.

Při teplotách nad 100 °C jsou prvně narušeny chemické vazby. Rozbití vazeb se prezentuje první ztrátou hmotnosti. Jedná se o ztrátu karbohydrátů (uhlovodíků), závislou na teplotě. Mezi 100 a 200 °C se odpařuje voda a vzniká vodní pára a nespalitelný plyn CO₂. Při delším působení vysokých teplot dochází ke zuhelnatění. Nutný je přístup kyslíku. Ten umožní oxidační exotermickou reakci s vytvářející se pórovitou zuhelnatělou vrstvou.

Mezi 200 a 300 °C pyrolyzují některé nestabilní složky dřeva a současně vzniká velké množství CO. Mezi 200 až 300 °C pyrolyzuje hemicelulóza, mezi 225 až 450 °C lignin. Pyrolýza ligninu je spojena se značnou tvorbou zuhelnatělého dřeva. Celulóza zůstává nerozložená. Se zvyšující se teplotou dehydratační reakce končí a začínají reagovat vodní páry a CO₂ v porózní zuhelnatělé vrstvě s výsledným produktem CO. Pyrolytické reakce ve dřevě jsou v tuto chvíli endotermické, teplo je spotřebováváno. Exotermická reakce probíhají na povrchu zuhelnatělé vrstvy mezi kyslíkem a těkavými látkami.

Mezi 300 a 450 °C je již nashromážděno mnoho hořlavých, těkavých látek vznikajících depolymerizací celulózy. Dochází k pyrolýze celulózy, která nejvíce přispívá do plamenného hoření. Nad 450 °C jsou zuhelnatělé zbytky degradovány oxidací CO, CO₂ a H₂O. a vzniká popel.

Rychlost degradace záleží na předchozím vysušení dřeva. Dřevo vystavené vysoké vlhkosti před zahříváním oproti předem vysušenému dřevu degraduje rychleji. Stejně tak je pyrolýza rychlejší ve vzduchu než v inertním prostředí. Hloubka zuhelnatění závisí na vlhkosti, propustnosti dřeva a celkovém chemickém složení, tj. na podílu celulózy, ligninu a hemicelulózy.

3.2 Aplikace v modelech

Vlivem tepelného rozkladu složek dřeva je uvolňováno poměrně velké množství tepla. Tento přírůstek je třeba zohlednit v modelech, aby teploty okolních plynů v simulaci nebyly podhodnoceny. Přídavné teplo ovlivňuje samotný průběh požáru a teploty plynu. Dřevěný prvek je následně vystavován vyšším teplotám, a tak vzniká koloběh, který je třeba brát v potaz.

Vzhledem ke komplexnosti procesů ve dřevě se jedná o složitou problematiku napříč obory. Pro popis pyrolýzy dřeva existují kinetické parametry aplikovatelné pro různé situace a různé druhy dřeva. Pro případ pyrolýzy za nízkých teplot se užívají jiné vztahy než pro vysokoteplotní pyrolýzu. Základním vztahem je Arrheniova rovnice, která popisuje teplotní závislost reakčních rychlostí. Slouží k výpočtu aktivační energie a rychlosti chemických reakcí a je obecně platná (nejen pro dřevo).

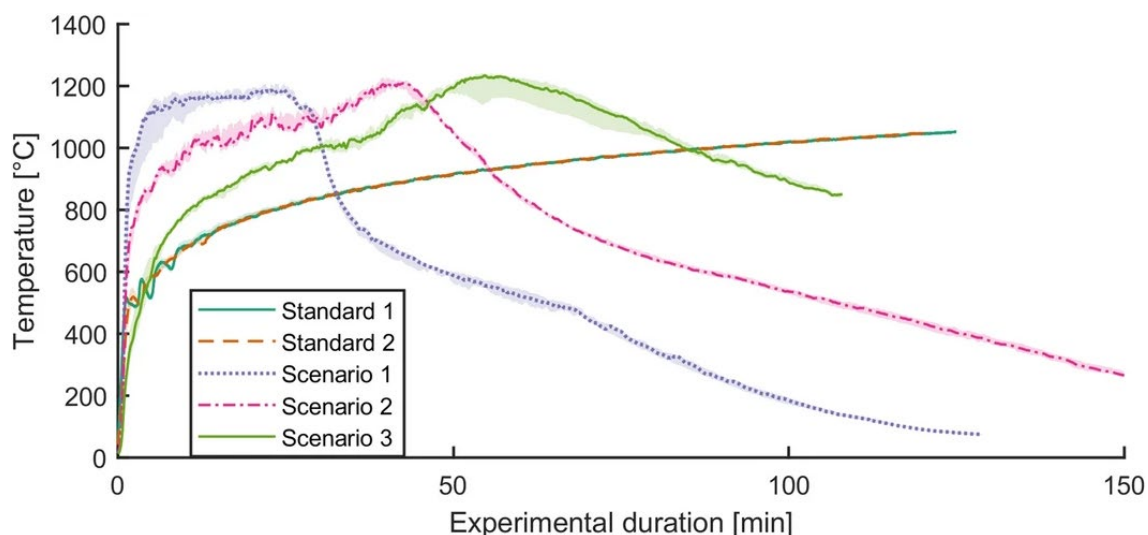
4 Vliv přirozeného požáru na zuhelnatění dřeva

Jedině experimenty a reálné požáry poskytují poznatky o skutečném chování dřeva za požáru a mohou být využity pro validaci pokročilých modelů. Vzhledem k obsáhlosti pojmu „přirozený požár“ a vzhledem k nekonečnému množství jeho variant a počtu proměnných je pro kompletní poznání chování dřeva za přirozeného požáru potřeba mnoho dat a zkušeností.

Současný stav poznání zatím neposkytuje ucelenou představu. Řeší se dílčí problematiky, zkoumají se jednotlivé fáze požáru, pomalé a rychlé fáze rozvoje ([16], [17]), požáry s fází chladnutí ([16], [17], [18], [19]) a lokální požáry (viz kapitola 6). V některých experimentech je analyzován vliv jednoho či více parametrů na hloubku zuhelnatění ([18]). Pro tuto analýzu je potřeba více zkoušek s jedním proměnným parametrem, proto jde o finančně a časově náročnou záležitost. V experimentech větších měřítek je sledována teplota a požární odolnost dřevěného prvku.

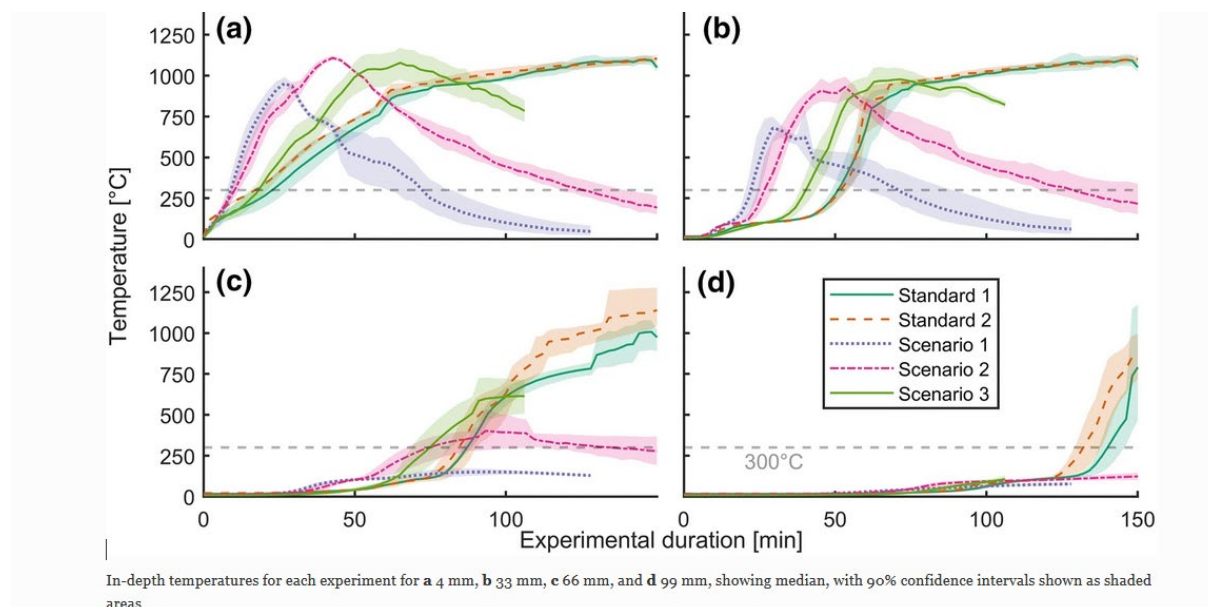
Hloubka zuhelnatění je měřena ručně, grafickým softwarem nebo jinou metodou na odzkoušených prvcích, nebo je určována z průběhu teplot pomocí izotermy 300 °C. Zkoušky středních a velkých měřítek se vzájemně obtížně porovnávají, stejně tak zkoušky s prvky z různého druhu dřeva a jiných rozměrů. Cílem této kapitoly není jen výpis poznatků, snahou je také získat ucelenější představu o možných způsobech měření, analýzy dat a mimo jiné o aktuálně probíhajících projektech a vědeckých věnujících se této problematice.

Aktuální výzkumný projekt The Épernon Fire Tests Programme se zabývá vztahem mezi normovou požární odolností a skutečným chováním za požáru. Jedním z jeho hlavních cílů je pochopit termomechanické chování hořlavých materiálů během normových a přirozených požárů. Součástí tohoto projektu jsou experimenty CLT za požáru ([16], [17]). Jedná se o experimenty velkých měřítek s CLT deskami vystavenými normovým (Standard 1,2) a přirozeným požárům s chladnoucí fází (Scenario 1,2,3; Obrázek 4-1). Všechny scénáře dosahují téměř stejných maximálních teplot plynů. Rozdílné průběhy výsledných teplot jsou způsobeny různým způsobem ventilace. Získaná experimentální data jsou zpracována různými způsoby F. Wiesnerem [16] a J.Ch. Mindegiou [17].



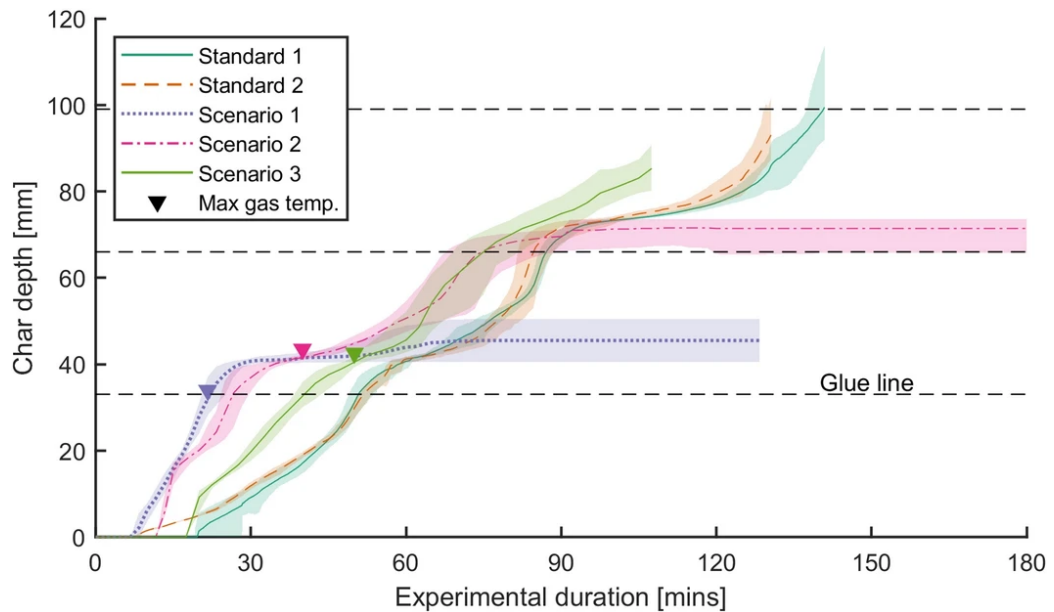
Obrázek 4-1 Teploty plynů v proběhlých experimentech[16]

F. Wiesner a kol. [16] užívá polopravděpodobnostní přístup. Hodnoty naměřené pomocí termočlánků uvnitř desek a upravené metodou „bootstrap“ jsou zobrazeny s 90 % intervalem spolehlivosti, viz Obrázek 4-1. Statistická metoda bootstrap kvantifikuje a zohledňuje nejistotu při odhadu hloubky zuhelnatělé vrstvy pomocí izotermie 300 °C.



In-depth temperatures for each experiment for a 4 mm, b 33 mm, c 66 mm, and d 99 mm, showing median, with 90% confidence intervals shown as shaded areas

Obrázek 4-2 Průběh teplot v hloubkách (a) 4 mm (b) 33 mm (c) 66 mm (d) 99 mm [16]

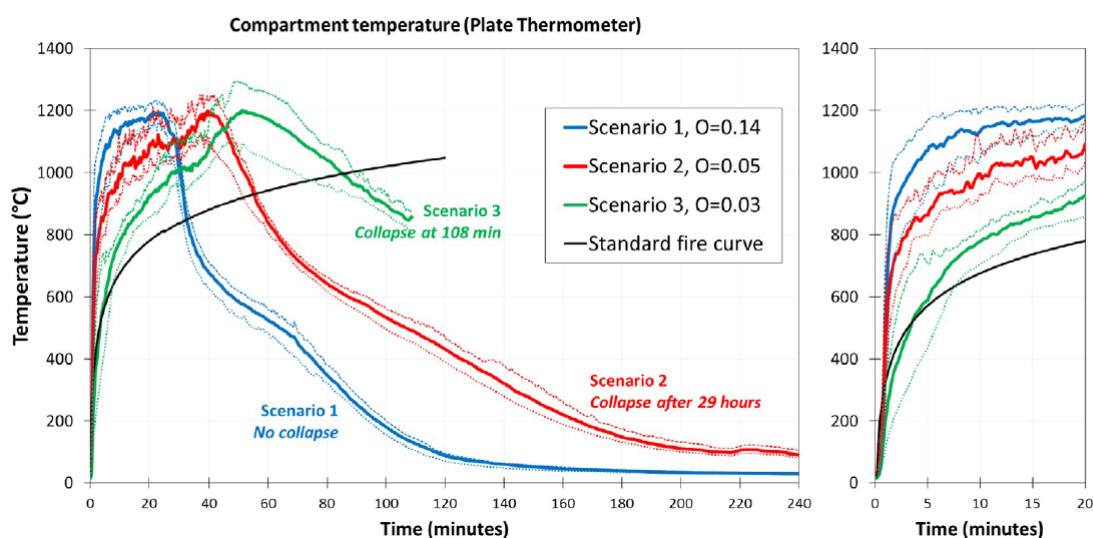


Obrázek 4-3 Odhad hloubek zuhelnatění s 90 % intervalem spolehlivosti [16]

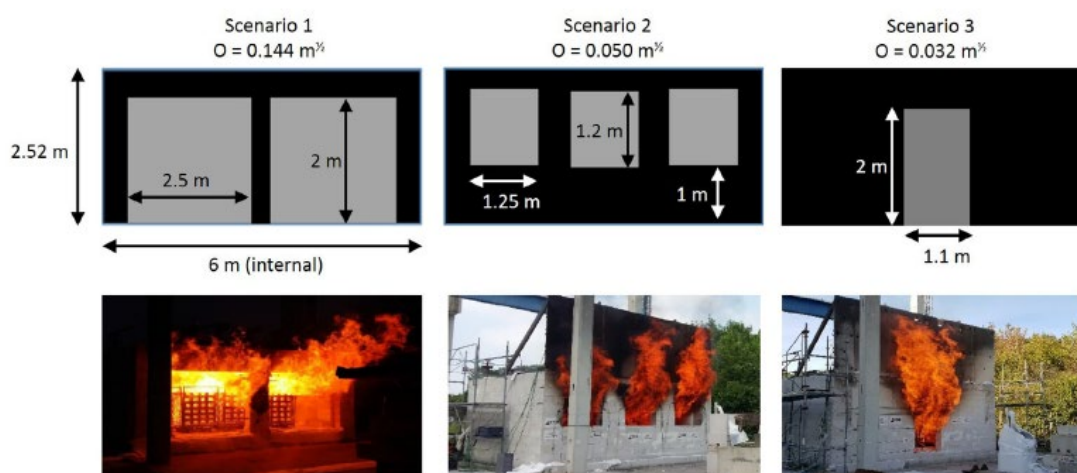
Je zjevné, že vlivem rychlého rozvoje přirozených požárů (Scenario 1-3) jsou i samotné rychlosti zuhelnatění v počáteční fázi větší (Obrázek 4-3). Zajímavý je scénář 3 (Scenario 3). Jedná se o přirozený požár s pomalým rozvojem, ke vzplanutí dochází později a fáze chladnutí je pomalá, CLT je tedy vystaveno vysokým teplotám po delší dobu. Zelená křivka hloubky zuhelnatění (Obrázek 4-3) překračuje křivky přirozených požárů, a je téměř souběžná s křivkami normových požárů. Přestože je u všech scénářů dosaženo stejných maximálních teplot plynů, vlivem pomalého rozvoje požáru, a stejně tak pomalého chladnutí, jsou teploty a odhadované hloubky zuhelnatění CLT v tomto scénáři vyšší. Je zřejmé, že během fáze chladnutí není rychlost zuhelnatění nulová.

Naměřené hodnoty průhybů během experimentů zároveň dokazují, že takto tepelně namáhaný prvek má mnohem menší skutečnou požární odolnost. Jeho selhání nastalo při hloubce zuhelnatění 85 mm. Oproti tomu během normových požárů CLT desky selhaly s hloubkou zuhelnatění 99 a 93 mm. Z toho je možné usoudit, že pro nenormové požáry není samotná hloubka zuhelnatění dostatečná pro výpočet požární odolnosti prvku a nemusí být konzervativní [16]. Je třeba mít na paměti, že se jedná o zkoušky CLT a hloubky zuhelnatění nejsou fyzicky měřeny, pouze odvozeny od izotermy 300 °C.

J.CH. Mindeguia a kol. [17] poskytuje porovnání experimentů na základě součinitele otvorů, viz Obrázek 4-4 a Obrázek 4-5. Ke scénářům přirozených požárů jsou přiřazeny součinitele otvorů vypočtené ze skutečné geometrie požárního úseku.



Obrázek 4-4 Porovnání požárních scénářů 1-3 dle [17]



Obrázek 4-5 Ilustrace ke scénářům přirozeného požáru [17]

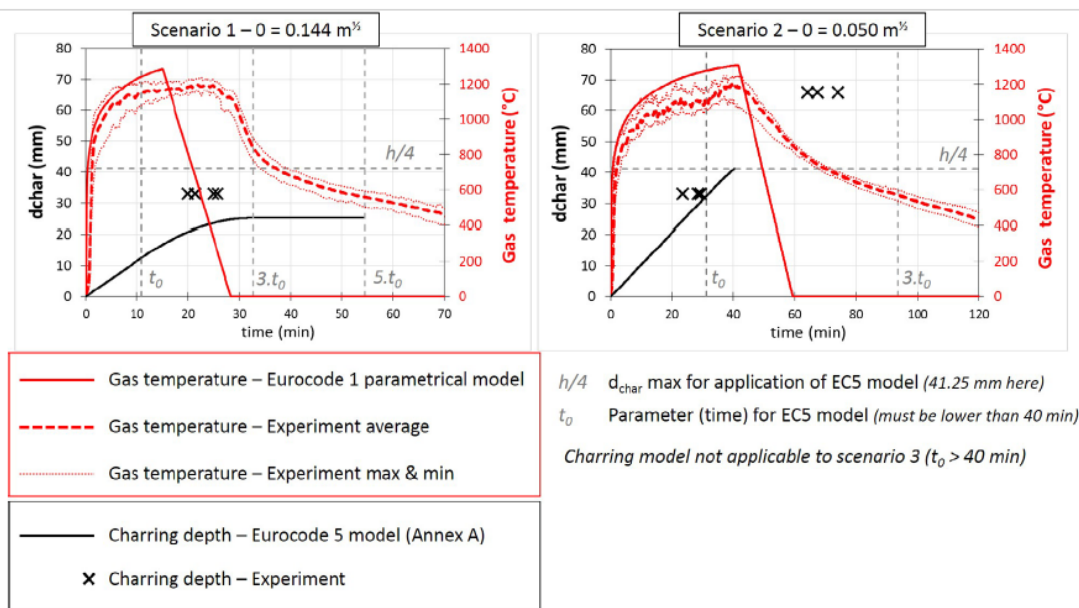
Analýza experimentálních dat J.CH. Mindeguia a kol. [17] se podrobně věnuje zuhelnatění CLT desek. Porovnává rychlosti zuhelnatění v jednotlivých lamelách a celkové hloubky zuhelnatění s empirickými výpočty a hodnotami v Eurokódu [2]. Hloubky zuhelnatění jsou určovány nepřímo pomocí izotermy 300 °C. Rychlosti zuhelnatění v jednotlivých lamelách uvádí Tabulka 4-1. Jedná se o průměrné hodnoty odvozené z naměřených teplot z termočlánků.

Tabulka 4-1 Hodnoty rychlostí zuhelnatění jednotlivých lamel CLT [17]

Charring rate (mm/min)	In the first lamella	In the second lamella	In the third lamella
Scenario 1 ($O = 0.14 \text{ m}^{1/2}$)	1.43 (min 1.29–1.65)	Charring through the lamella ^a	No charring recorded
Scenario 2 ($O = 0.05 \text{ m}^{1/2}$)	1.19 (min 1.13–max 1.4)	0.80 (min 0.72–max 0.86)	No charring recorded
Scenario 3 ($O = 0.03 \text{ m}^{1/2}$)	0.85 (min 0.76–max 0.9)	0.92 (min 0.73–max 1.17)	Charring through the lamella ^a
Standard furnace tests	0.71–0.75 mm/min		

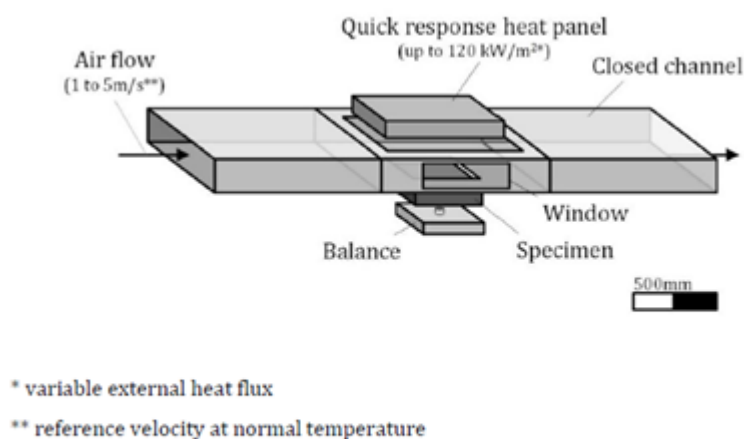
V Eurokódu [2] je uvedena hodnota rychlosti zuhelnatění pro lepené lamelové dřevo $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$. Uvedené průměrné hodnoty (Tabulka 4-1) jsou nepatrně vyšší. Mindeguia [17] dále nabízí zajímavé srovnání scénářů přirozeného požáru s parametrickými požáry o shodném součiniteli otvorů a skutečných hloubek zuhelnatění s vypočtenými hodnotami dle Přílohy A ČSN EN 1995-1-2 [2]. Jsou vybrány stejné 3 scénáře (Scenario 1, 2 a 3). Pro scénář 3 nemohla být užita parametrická křivka, jelikož není splněna podmínka pro čas $t_0 < 40 \text{ min}$.

Obrázek 4-6 ukazuje výsledky z [17]. Červeně čárkovaně jsou zprůměrované hodnoty z experimentu, tence jsou ohraničena maxima a minima experimentu. Červené plné křivky vykreslují odpovídající parametrickou teplotní křivku se stejným součinitelem otvorů. Černě jsou naznačeny hodnoty zuhelnatění. Černé křížky jsou výsledné hloubky zuhelnatění z experimentu. Černá čára představuje předpokládanou hloubku zuhelnatění.



Obrázek 4-6 Teploty plynů a hloubky zuhelnatění měřené a predikované dle parametrické křivky [17]

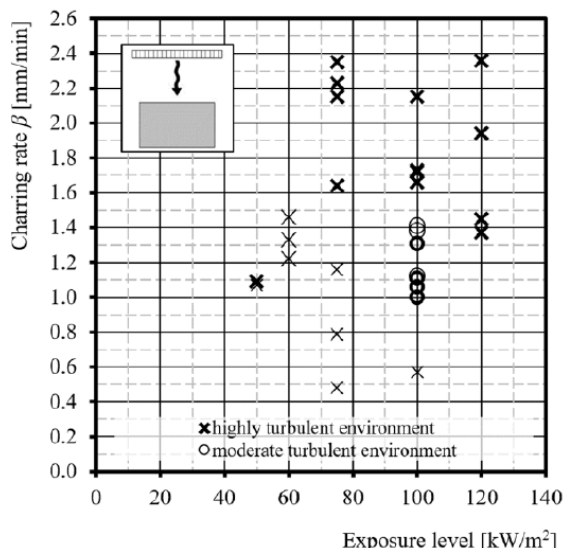
Nové poznatky a nová zkušební metoda požáru jsou publikovány J. Schmidem a kol. [18]. Zařízení FANCI (Fire Apparatus for Non-standard heating and Charring Investigation) je určeno ke zkoumání chování dřeva vystaveného přirozenému požáru. Obrázek 4-7 zobrazuje zařízení FANCI. FANCI umožňuje zkoušet vliv parametrů, jako je rychlost pohybu plynů a tepelný tok působící na vzorek. Výstupy jsou hodnoty rychlosti zuhelnatění, hmotnostní úbytek, rozložení teploty po vzorku a hustota zuhelnatělé vrstvy. Vzorky jsou z laminovaného dřeva, o ploše 250 x 250 mm. Teplota vzorku je měřena pláštěvými termočlánky. Po zkoušce je vzorek zvážen laboratorními vahami. Výsledná geometrie je oskenována pomocí 3D skeneru, před i po sejmutí zuhelnatělé vrstvy.



Obrázek 4-7 Schematický obrázek zařízení FANCI [18]

Parametrická studie v zařízení FANCI zkoumá vliv vnějšího tepelného toku na zuhelnatění dřeva. Z analýzy výsledků zkoušek ve FANCI v letech 2015 až 2020 metodou nejmenších čtverců je dokázáno, že samotný externí tepelný tok (např. z hořáku) není dostačující pro popis rychlosti zuhelnatění. K přesnějšímu popisu je možné se přiblížit korelací vnějšího tepelného toku pomocí dalších energetických příspěvků, jako je teplo od plamenného spalování těkavých plynů, teplo od bezplamenného spalování zuhelnatělé vrstvy závislého na úbytku hmotnosti vrstvy zuhelnatění a zpětné teplo unikajícího ze dřeva do komory. Spalovací proces těkavých plynů potřebuje přístup kyslíku, naopak tvorba těkavých látek je závislá pouze na teplotě.

Druhým parametrem je tok plynů. FANCI umožňuje kontrolovat rychlost plynů vtékajících do komory ventilátorem a měřit pohyb horkých plynů v komoře za pomoci měřiče dynamického tlaku a Pitotovy trubice. S vyšší rychlostí média roste i stupeň turbulence. Vznik turbulencí zapříčiňuje častější kontakt zuhelnatělé vrstvy s plyny, a tím i rychlejší zuhelnatění. Ve vysoce turbulentním prostředí ve FANCI (Obrázek 4-8) dosahují rychlosti zuhelnatění mnohem vyšších hodnot, než je obvyklé. Vyšší stupeň turbulence se vyskytuje například u lokálních požárů, kde je vlivem rozdílných teplot okolo konstrukcí proudění plynů větší. Dochází tak ke vzniku turbulentního prostředí působícího na proces zuhelnatění prvku. Viz požární experiment v kapitole 5, kde je zkoušený dřevěný prvek vystaven lokálnímu požáru.

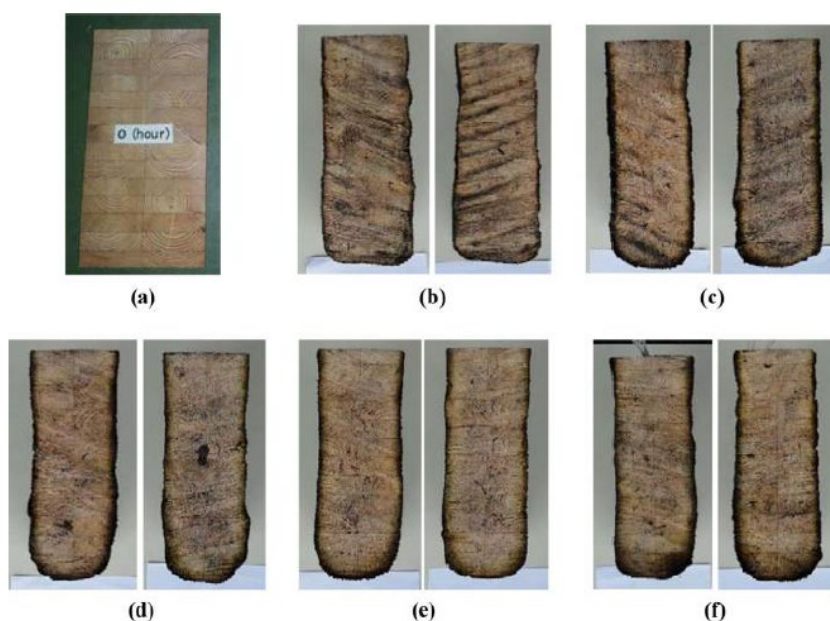


Obrázek 4-8 Výsledné rychlosti zuhelnatění ve vysoce (křížky) a středně (kroužky) turbulentním prostředí v závislosti na tepelném toku (exposure level) [18]

Dalším inovativním nápadem, jak zkoumat a porovnat vliv přirozeného a normového požáru, je vytvořit takový scénář, aby částečně splňoval vlastnosti obou dvou požárů. Experimenty H. Kinjo, T. Hirashima a kol. [19] spočívají ve spojení fáze rozvoje normové teplotní křivky a fáze chladnutí přirozeného požáru. Zkoumané vzorky jsou z lepeného lamelového dřeva z japonského modřínu, o rozměrech 210 x 420 mm, vystavené ze tří stran normovému požáru po dobu jedné hodiny. Následuje přirozený proces chladnutí.

Data publikovaná H. Kinjou a kol. [19] ukazují výsledky dvou požárních zkoušek. V prvním experimentu byl zajištěn běžný přístup vzduchu při chladnutí, v druhém byl obsah vzduchu navýšen o 30 %. Vlhkost vzorků byla okolo 11 %, hustota 530 kg/m³.

Výsledné hodnoty hloubek zuhelnatění jsou získány oddělením části o délce 680 mm od zkoušeného vzorku, a to v časech 1, 2, 3, 4 a 8 h od začátku experimentu. Hloubky zuhelnatění se pro oba experimenty téměř neliší. Vliv zvýšeného množství kyslíku není podstatný. Hloubka zuhelnatění ve směru výšky vzorku dosahuje větších hodnot než ve směru šířky. Výsledná rychlost zuhelnatění během ohřívání v rozmezí hodnot je 0,61 – 0,72 mm/min odpovídá normovým hodnotám. Během chladnutí není sledováno rozšíření vrstvy zuhelnatění kromě v místě rohů. Zvětšuje se tloušťka pyrolýzní vrstvy. V horizontálním směru je naměřena střední hodnota rychlosti zuhelnatění 0,06 mm/min v čase 1 až 2 hodiny od začátku chladnutí. Ve vertikálním směru je střední hodnota menší než 0,24 mm/min.



Obrázek 4-9 Odseparované měřené vzorky [19]

Součástí výzkumu je posouzení požární odolnosti prvků tepelně namáhaných stejným způsobem. Získané experimentální hodnoty pevností prvků vystavených pouze fázi ohřívání odpovídají hodnotám vypočteným metodou redukovaného průřezu. Hloubky zuhelnatění jsou převzaty z přechodících zkoušek. Naopak u zkoušených prvků po fázi chladnutí je skutečná hodnota jejich únosnosti na polovině predikované požární odolnosti. Pro přiblížení ke skutečné hodnotě požární odolnosti je navržena redukce pevnosti dřeva.

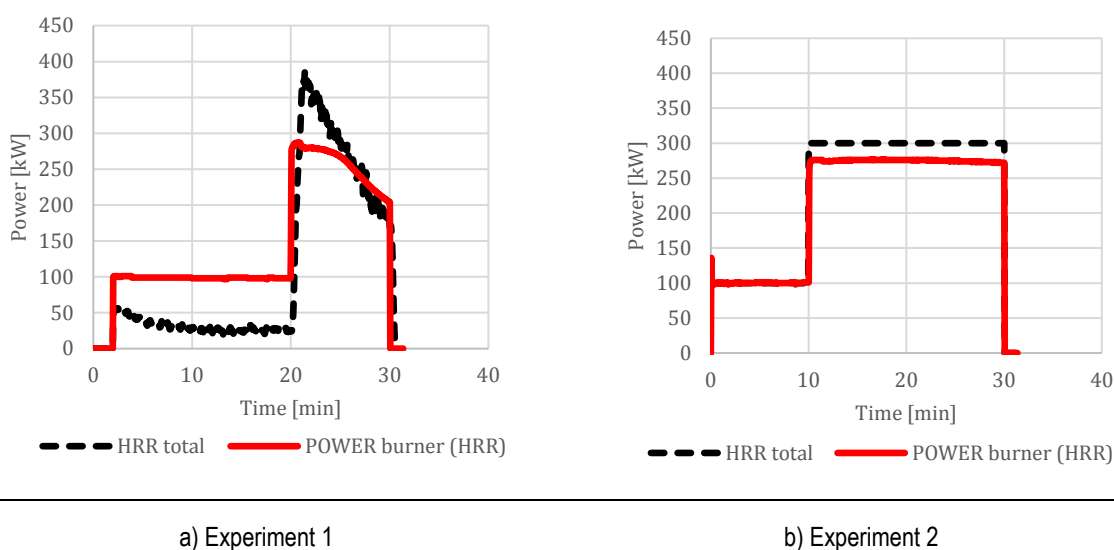
V doktorské práci K.L. Friquin [20] jsou shrnuty poznatky z požárních experimentů s CLT, které nachází svou platnost i u ostatních druhů dřeva. Rychlosti zuhelnatění se liší vždy v závislosti na zvolené teplotní křivce během experimentu. Při velké rychlosti rozvoje požáru způsobují také vyšší počáteční hodnotu rychlosti zuhelnatění. Strmá fáze chladnutí po krátké rozvojové fázi požáru má za následek, že dřevo uhelnatí kratší dobu a hloubky zuhelnatění jsou malé. Konstantní rychlosti zuhelnatění jsou dosaženy v pokročilé fázi dlouho trvajícího požáru.

5 Experiment

5.1 Popis experimentu

Součástí teoretické části práce je praktický příklad s cílem aplikovat získané poznatky z teorie. Praktickým příkladem jsou dva požární experimenty, jejichž výsledky jsou analyzovány a posuzovány na základě nastudovaných poznatků.

Požární experimenty byly provedeny v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT (UCEEB). Jednalo se celkem o dvě zkoušky v peci Room Corner Test. Prvotním záměrem bylo provést zkoušky za shodných podmínek a získat tak více dat, která budou srovnatelná, ve smyslu vzájemně nahraditelná. V prvním experimentu však nebylo dosaženo predikovaných teplot, proto byl během druhého experimentu navýšen výkon hořáku (Obrázek 5-1).



Obrázek 5-1 Výkony hořáků během experimentů

Uvnitř pece byly umístěny dva dřevěné sloupy a nosník o průřezu 150 x 150 mm a délky 2 metry (Obrázek 5-2). Hořák byl pískový propanbutanový, umístěn v rohu pece. Sloup 1 byl blíže k hořáku a byl nejvíce tepelně namáhán. Výkon hořáku byl nastaven v prvním experimentu na 100 kW po dobu 20 minut, pak 300 kW dalších 10 minut. V druhém experimentu byl výkon hořáku navýšen na 300 kW již po 10. minutě (Obrázek 5-1). Červená křivka (POWER burner) vyobrazuje tepelný výkon, který je vydán hořákem. Naopak černá čárkovaná křivka (HRR total) zohledňuje aspekty požáru, zobrazuje výkon požáru jako celku. Každá zkouška trvala celkem 30 minut. Vzorky, geometrie pece a hořáku a umístění termočlánků bylo během obou zkoušek stejné.

Termočlánky TC11-TC14, měří teploty ve výšce sloupu 1920 mm (2020 mm od podlahy). Teploty z TC15-TC18 jsou naměřeny ve výšce sloupu 700 mm (800 mm od podlahy).

Dále byla měřena teplota plynu pomocí TC stromu a termočlánků umístěných na stropu a nad hořákem. TC strom zachycuje teploty v sedmi výškách pece v rozmezí 0,67 – 2,1 m. Dále byla měřena adiabatická teplota povrchu vzorků pomocí deskových snímačů teplot. Deskové snímače byly umístěny svou měrnou plochou směrem k povrchu dřevěného prvku, který byl vystaven požáru. Na obrázku jsou značeny jako „PT“.

5.3 Průběh požáru

Průběh výkonu hořáku a vývoj teplot v Room Corner Testu simuluje rostoucí fázi přirozeného požáru. O tom, jak požár probíhal, se lze dozvědět ze snímků během experimentu a z výsledných dat. Vypovídající jsou výsledné teploty z termočlánků a řezy do ohořelých dřevěných vzorků. V první fázi se jedná o lokální požár. Sloup 1 je přímo vystaven lokálnímu požáru (Obrázek 5-4).



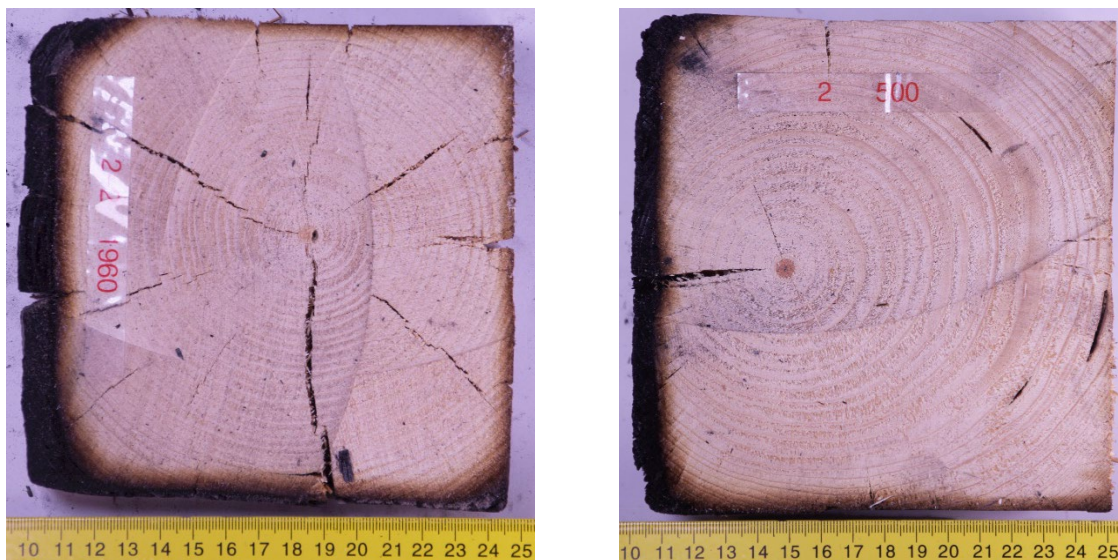
a) Fotografie průběhu experimentu



b) Průřez sloupu po požáru

Obrázek 5-4 Sloup 1 vystavený lokálnímu požáru (experiment 2)

Pro ilustraci jsou zobrazeny průřezy sloupu 2 a nosníku (Obrázek 5-5). Vybrány jsou průřezy s největší hloubkou zuhelnatění, Sloup 2 je zuhelnatělý na straně přivrácené požáru (na obrázku levá) a zbylé strany jsou ve fázi pyrolýzy. U nosníku je hloubka zuhelnatění na svislé straně větší než na vodorovné. Při požáru nosník hořel a plameny stoupaly po svislé straně vzhůru. Z řezů ohořelých vzorků lze získat představu o průběhu požáru, avšak jedná se o finální stav zuhelnatění dřeva.



a) Sloup 2

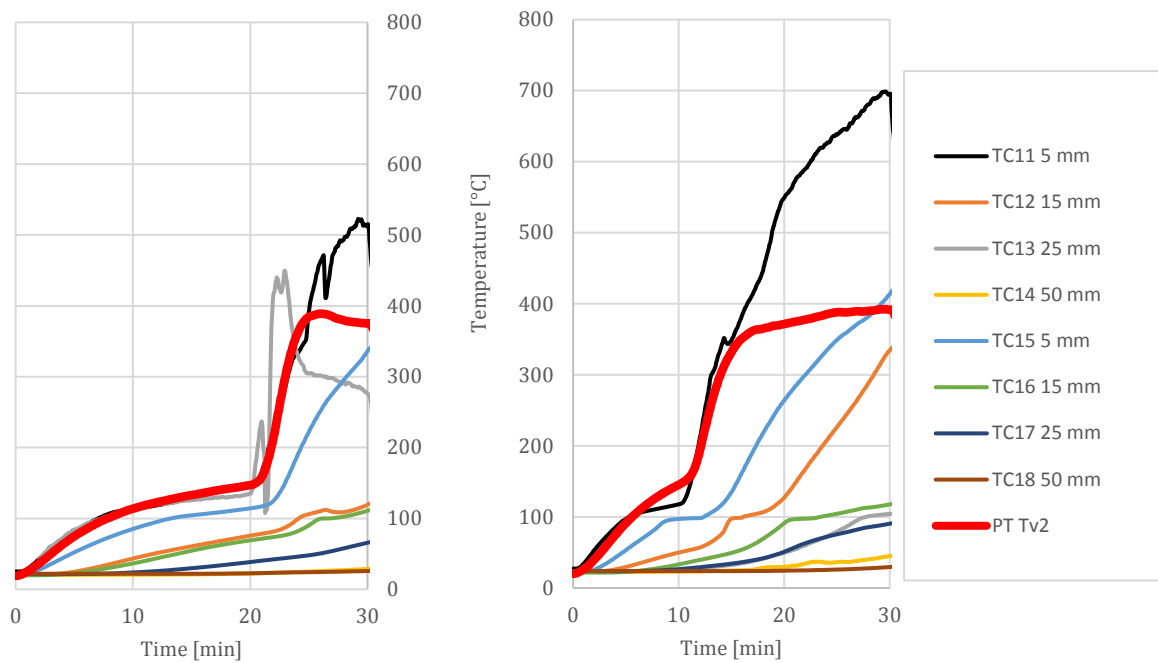
b) Nosník

Obrázek 5-5 Fotografie zuhelnatělých průřezů (experiment 2)

5.4 Sběr a analýza dat

5.4.1 Teploty

Vykreslení naměřených hodnot na sloupu 1 představuje Obrázek 5-6 (T – termočlánky v hloubce, PT – deskové snímače teploty). Teploty v druhém experimentu jsou oproti prvnímu experimentu vyšší. Rozvoj teplot během prvního experimentu je menší a největší nárůst teplot nastává až po 20. minutě po navýšení výkon hořáku. Stagnace teploty při 100 °C (Obrázek 5-6b) na černé (TC11), oranžové (TC12) a šedé křivce (TC13) představuje fázi odpařování vlhkosti ze dřeva. Tyto fáze jsou vzájemně časově posunuté cca o 20 minut vlivem postupu tepla do hloubky. Tento jev je vidět také na křivce světle modré (TC15) a zelené (TC16).



a) Experiment 1

b) Experiment 2

Obrázek 5-6 Teploty sloupu 1

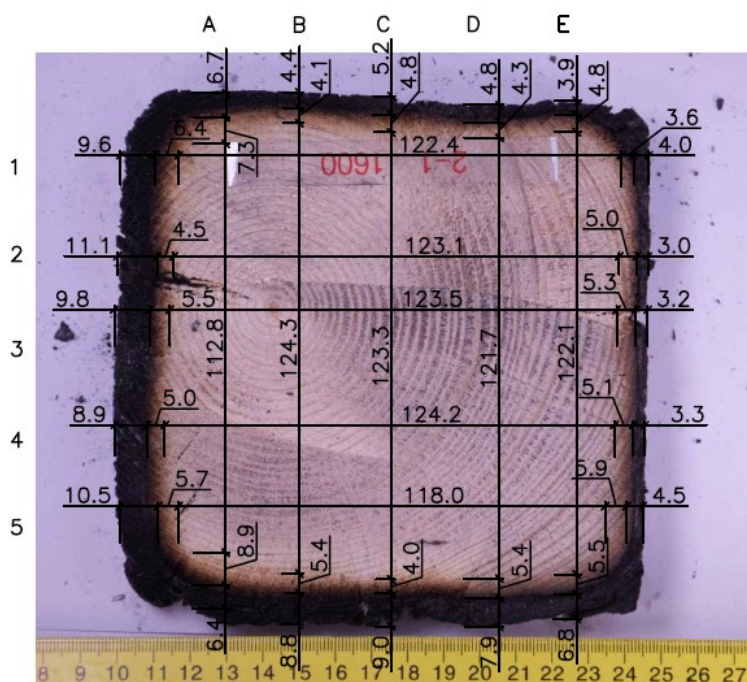
5.4.2 Hloubky zuhelnatění

Hloubky zuhelnatění byly získány z fotografií jednotlivých průřezů zkoumaných prvků. Sloupy a nosníky byly po zkouškách (po přirozeném vychladnutí) nařezány kolmo na osu. Vzdálenost a četnost řezů zkoumaných prvků se lišila dle míry zuhelnatění a vystavení požáru (sloup 1 byl rozřezán po kratších vzdálenostech než sloup 2). Během fotografování byly průřezy očíslovány a popsány, položeny do vodorovné polohy a následně vyfoceny s měřítkem (úhelník). Fotoaparát byl vycentrován. Snahou bylo pořídit snímky průřezů tak, aby byla zajištěna maximální porovnatelnost jednotlivých dimenzí. Problémem byl nekonstantní a nepravoúhlý průřez, díky němuž nebylo vždy možné zajistit stejnou polohu vzorku vůči úhelníku.

Fotografie byly nahrány v měřítku do softwaru AutoCAD a následně byly odměřovány hodnoty hloubek zuhelnatění, vrstvy pyrolýzy a redukovaného průřezu. Byl navržen rastr měřících kót po 50 mm (rastr A až E, 1 až 5; Obrázek 5-7)

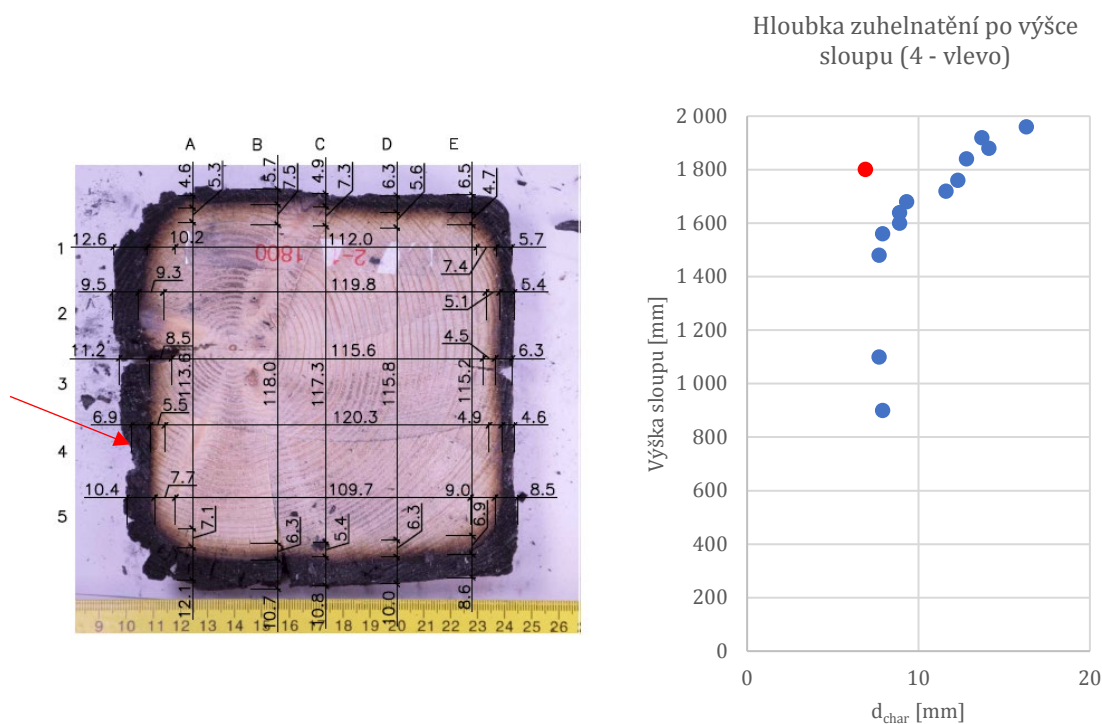
Určování hranic mezi zuhelnatělou vrstvou, pyrolýzou a surovým dřevem bylo prováděno na základě vizuálního posouzení. Rozlišit hranici mezi pyrolýzou a surovým dřevem je komplikované. Není jednoznačné, kde pyrolýza končí. Jedná se o pozvolný přechod barev a není přesně dáno, jak tmavě nebo světle hnědé dřevo je hodnoceno ještě jako část pyrolýzy. Je tedy třeba počítat s nejistotou měření.

Pro přesné změření hloubky zuhelnatění by bylo ideální odkrýt celou zuhelnatělou vrstvu a využít jednu z metod doporučených J. Schmidem a kol. [21]. Doporučené postupy využívají 3D skenování a fotografování pro vytvoření 3D modelu, který je možno změřit s využitím automatizované analýzy. Přístrojové měření oproti měření lidským okem by zajistilo objektivní výsledky, hustější síť měření a mnohem rychlejší sběr dat.



Obrázek 5-7 Měření průřezů v softwaru AutoCAD

U průřezu s pokročilým rozvojem zuhelnatění hraje velký vliv odpadávání a odhořívání zuhelnatělé vrstvy. Na mnoha místech (Obrázek 5-8a) je pak otázkou, jakým způsobem hloubku zuhelnatění měřit. V grafickém a statistickém vyhodnocení hodnoty zbývající zuhelnatělé vrstvy snižují průměrné hodnoty a zvyšují rozptýlenost hodnot (Obrázek 5-8b). Z toho důvodu bylo naměřeno mnoho hodnot ve více měřících rovinách. Další zkruslení může přinášet zaoblení rohů, které není měřeno radiálně, ale pouze v měřících osách. Proto nejsou naměřené hodnoty v osách A, F, 1, 5 srovnatelné s ostatními a je třeba je vyhodnocovat zvlášť.



a) Průřez (červeně místo zúžení)

b) Hloubka zuhelnatění (červeně hodnota z obrázku vlevo)

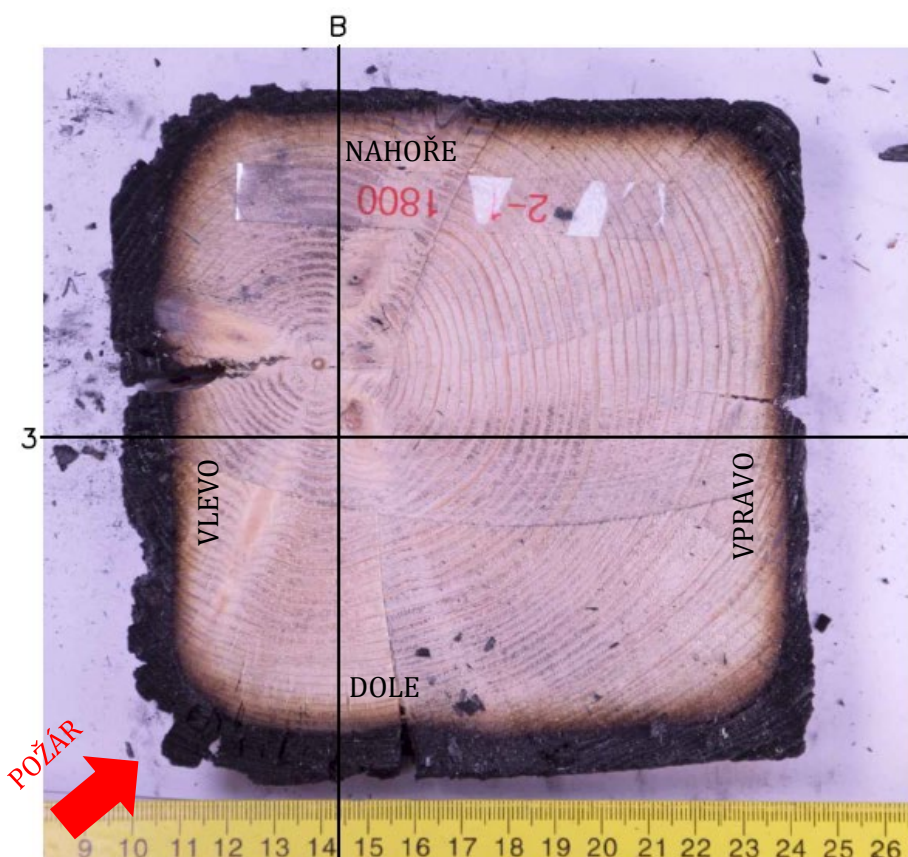
Obrázek 5-8 Zužování zuhelnatělé vrstvy

5.4.3 Analýza dat

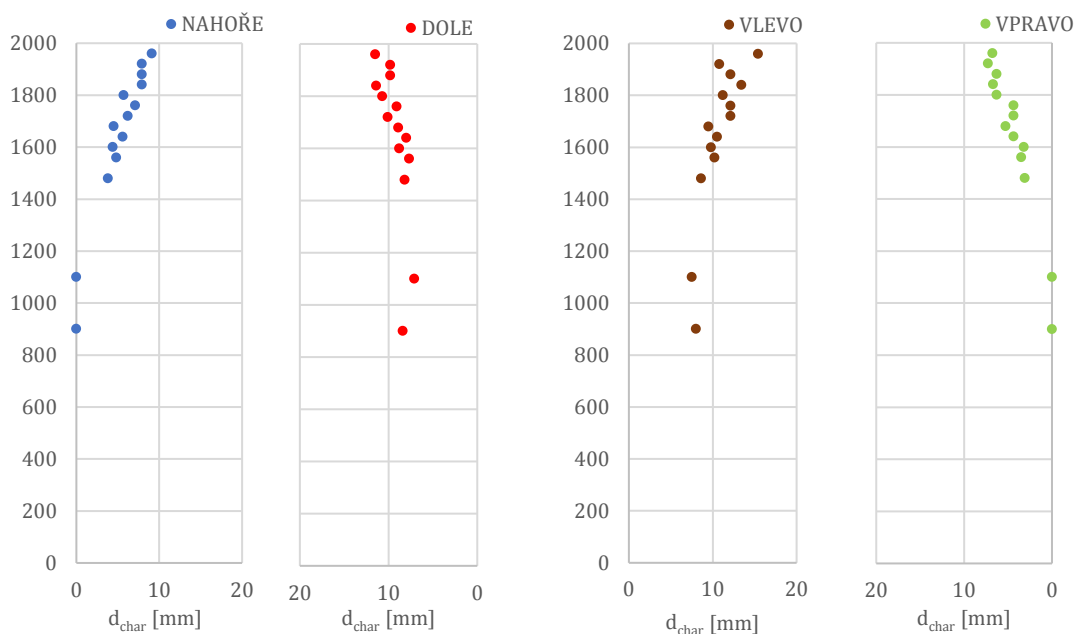
5.4.3.1 Hloubka zuhelnatění

Pro větší názornost jsou naměřené hodnoty hloubek zuhelnatění zpracovány graficky. Důležité je poznamenat, že tyto hloubky představují finální stav po 30 minutách zkoušky. Nejsou vyjádřeny v závislosti na čase. Obrázek 5-9 porovnává hloubky zuhelnatění sloupu obou experimentů. Hodnoty jsou měřeny v ose rastru 3 vlevo (Obrázek 5-7). V horní části sloupu je u druhého experimentu viditelná tendence růstu zuhelnatění po výšce. Maximální hodnota je 15 mm. Důvodem jsou vyšší teploty plynu v horní kouřové vrstvě. U první zkoušky není rozdíl (spodní a horní část sloupu) tak zřetelný, je v jednotkách milimetrů. Ve spodní části sloupu se hloubky zuhelnatění z první a druhé zkoušky liší přibližně o 2 mm.

Obrázek 5-11 poskytuje porovnání všech stran sloupu z hlediska hloubek zuhelnatění po výšce. Ve spodní části sloupu (od podlahy do 1300 mm) nejsou strany vystavené požáru zuhelnatělé. Zuhelnatění začíná až ve výšce 1300 až 1400 mm. V této výšce dochází k nárůstu zuhelnatělé vrstvy u exponovaných stran. Celkový nárůst zuhelnatělé vrstvy v této výšce je u levé strany 7,9 mm; pravé strany 7,3 mm; horní 9,1 mm a dolní 4,4 mm. Sloup byl vystaven symetricky podle úhlopříčky, proto by měl být v ideálních podmínkách tento nárůst shodný u dolní a u levé strany. Důvodem takto malého rozdílu u dolní strany je pravděpodobně volba osy rastru B. Tato osa je blíže ke zdroji požáru, tudíž zuhelnatělá vrstva v tomto místě je náchylnější k rozrušení, začíná degradovat a redukuje se její tloušťka.



Obrázek 5-10 Orientace sloupu 1 vůči požáru



a) Hloubky zuhelnatění na ose rastru B

b) Hloubky zuhelnatění na ose rastru 3

Obrázek 5-11 Porovnání d_{char} všech stran průřezu

5.4.3.2 Poloha izotermy 300 °C

Z naměřených teplot lze sledovat polohu izotermy 300 °C. Ta v případě sloupu 1 v prvním experimentu předpovídá hloubku zuhelnatění 16,5 mm ve výšce 1920 mm (poloha termočlánků). Tato hodnota je srovnatelná s výslednou hloubkou zuhelnatění naměřenou po zkoušce, a to ve výšce 1960 mm (Obrázek 5-9b). Dá se říci, že v tomto případě by izoterma 300 °C mohla odpovídat hranici zuhelnatělé vrstvy, avšak nelze opomenout, že byla posuzována pouze v čase 30 minut.

5.4.3.3 Rychlost zuhelnatění

Z maximálních hodnot hloubek zuhelnatění u sloupu 1 lze vypočítat rychlost zuhelnatění $16,3/30 = 0,54 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato hodnota může potvrdit konzervativnost normového přístupu. Jedná se však o pouhý odhad, jelikož lze předpokládat, že rychlost zuhelnatění není v případě přirozeného požáru v čase konstantní. I tak je maximální hloubka zuhelnatění 15 mm menší než hodnota predikovaná normou.

5.4.3.4 Trhliny

Experimenty dokazují vliv umístění vzorku, orientace vzhledem k hořáku a výkon hořáku (zdroj požáru) na vývoj zuhelnatění. Výslednou hloubku zuhelnatění ovlivňují i faktory jako jsou trhliny a suky. Jejich výskyt není snadné zohlednit. Vlivem trhliny je umožněn přístup kyslíku hlouběji do dřeva a tím je urychleno uhelnatění v místě trhliny, viz Obrázek 5-12.



Obrázek 5-12 Zuhelnatění v místě trhliny

6 Shrnutí poznatků vlivu průběhu požáru na zuhelnatění dřeva

6.1 Teoretické poznatky

Poznatky z teoretické a experimentální části potvrzují, že průběhu požáru má na zuhelnatění dřeva zásadní vliv. Již z empirických výpočtů hloubky zuhelnatění je zřejmá snaha zohlednit některé parametry požáru. Jelikož se jedná o jednoduché výpočty, nelze z parametrů zohlednit mnoho, avšak užití těchto metod je rychlé a ve většině případů bezpečné.

Pokročilé přístupy jsou založeny na fyzikálních principech a snaží se přiblížit realitě. Pro modelování přirozeného požáru s různými parametry je užití tohoto přístupu nezbytné. Hloubka zuhelnatění je povětšinou určována izotermou 300 °C, proto je nutné znát rozložení teplot po průřezu. Existují i jiné modely jako PyCiF, které izotermu jako kritérium nevyužívají. Pro určení teplot po průřezu je třeba zvolit vhodné tepelné vlastnosti dřeva, v některých případech (požár s chladnoucí fází) je zkalibrovat.

Při exotermické reakci hoření vzniká teplo, které v modelu vstupuje do energetických bilancí. Tepelný tok z termického rozkladu je definován v submodelech pyrolýzy pomocí kinetických součinitelů. K popisu pyrolýzy dřeva se může používat jen celulóza, která nejvíce přispívá k plamennému hoření. Přídavný tepelný tok od pyrolýzy má za následek zvýšení teplot v okolí dřeva a tím i vystavení dřeva vyšším teplotám.

6.2 Poznatky z experimentální části

Z provedených experimentů lze usoudit, že rychlost rozvoje požáru a rychlost chladnutí má velký vliv na zuhelnatění dřeva. Celý průběh požáru je závislý na množství tepla z požárního zatížení a na množství kyslíku a tyto charakteristiky požáru ovlivňují i samotné zuhelnatění. Čím větší je přístup kyslíku a stupeň turbulence v okolí dřeva, tím je rychlost zuhelnatění větší. Čím větším tepelným tokem je prvek vystaven, tím rychleji uhelnatí. Závisí také na době působení vysokých teplot (tepelného toku).

Na praktickém příkladu jsou doloženy výše zmíněné poznatky. Je sledován vliv výkonu hořáku a orientace dřevěného prvku, tzn. vliv tepelného toku, kterému je vzorek vystaven. Je třeba zmínit další dílčí vlivy, jako jsou trhliny a odpadávání zuhelnatělé vrstvy. Výsledné teploty a hloubky zuhelnatění potvrzují předpoklady uvedené v úvodní části.

6.3 Hlubší studium poznatků

Pro získání detailnější představy o problému je proveden numerický model experimentu (více v následující kapitole). Na tomto modelu je hlouběji zkoumán vliv parametrů požáru. Oproti původnímu experimentu je zde měněn zejména výkon hořáku. Výkon hořáku souvisí s vystavením prvku určitému tepelnému toku, vystavením prvku určitým teplotám, s danou teplotní křivkou požáru a jiných parametrech požáru.

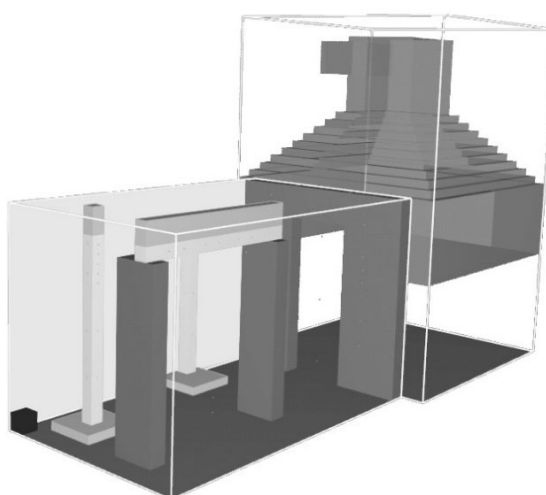
7 Model experimentu v RCT

7.1 Popis modelu

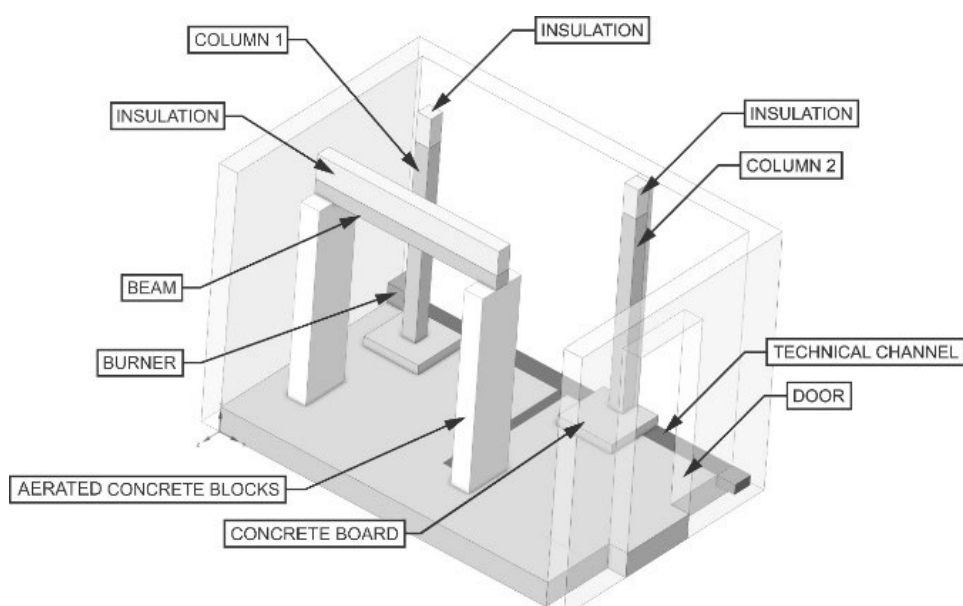
Dalším bodem této práce je vytvoření numerického modelu jednoho z provedených experimentů pro zkoumání vlivů průběhu požáru. Jedná se o numerický CFD model, který umožňuje simulovat proces hoření a pyrolýzy. Pro simulaci je vybrán program FDS. Modelován je druhý experiment s větším výkonem hořáku (dále pouze „experiment“).

7.1.1 Geometrie a materiály

Geometrie RCT je modelována tak, aby v maximální míře odpovídala skutečnosti. Modelována je samotná zkušební pec a odtahový zvon. Model je v ortogonální soustavě. Umístění ohraničujících konstrukcí, izolace konstrukcí, hořáku, zkoušených vzorků a termočlánků odpovídá experimentu (Obrázek 7-2).



Obrázek 7-1 Model RCT



Obrázek 7-2 Modelovaná geometrie a materiály

Plochy pece jsou definovány pomocí příkazů SURF. Identifikovány jsou plochy dřeva, izolace z minerální vaty a stěn z pórobetonu. Dřevěné plochy jsou popsány třemi složkami dřeva, které pyrolyzují (více v kapitole 7.1.2). Pomocí příkazu SURF je definován hořák. Výkon hořáku je nastaven podle skutečného výkonu v experimentu (Obrázek 5-1b). U hořáku také zadána hodnota HRRPUA. Jako palivo je v modelu zvolen metan. Je uvažováno dvoureakční schéma hoření. Vedle methanu je zdrojem tepla také dřevo.

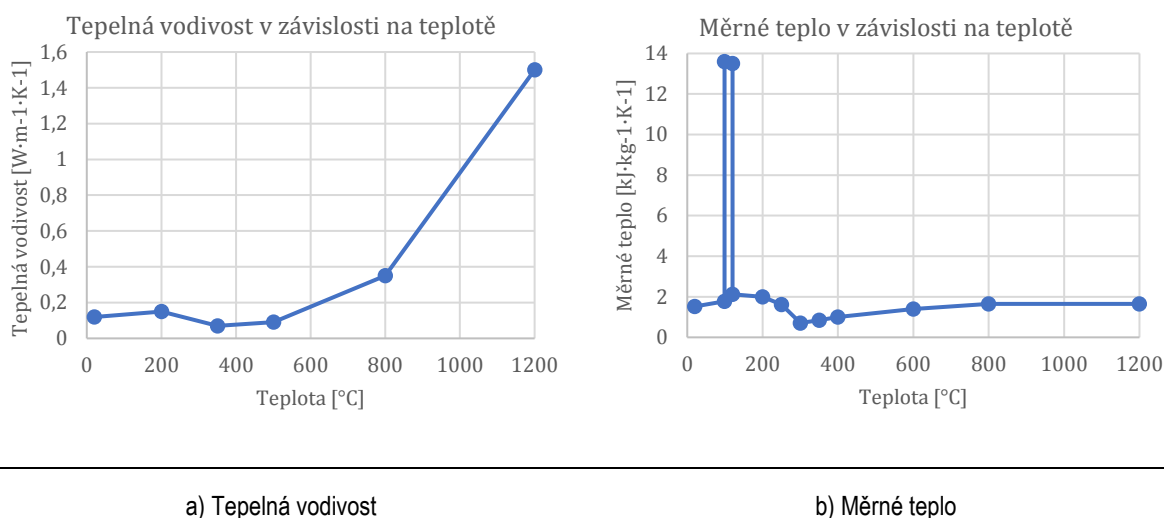
Ohraničující konstrukce a otvory jsou definovány pomocí příkazu VENT. Okolí zvonu, které sousedí s vnějším prostředím, je nastaveno jako otevřené („OPEN“). Hodnoty tepelných vlastností materiálů uvádí Tabulka 7-1. Tepelné vlastnosti jsou uvažovány konstantní po celou dobu výpočtu.

Tabulka 7-1 Tepelné vlastnosti materiálů modelu

Materiál	Měrné teplo	Vodivost	Hustota
	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[kg·m ⁻³]
Pórobeton	1	0,12	500
Beton	1,1	1,5	2300
Minerální vlna	0,5	0,035	40

7.1.2 Modelování dřevěných vzorků

Jak je již zmíněno, pozorovaná dřevěná tělesa jsou namodelována co nejpřesněji dle provedeního experimentu. Umístění a geometrie dřevěných vzorků jsou určeny velikostí výpočetní buňky, a to tak, aby výpočetní buňka lícovala s okrajem zkušebního tělesa. Materiálem zkušebních těles je jehličnaté dřevo. V modelu je složení jehličnatého dřeva definováno pomocí zastoupení chemických prvků C, H, N a O. Teplotní vlastnosti dřeva jsou definovány pro surové dřevo a pro dřevo zuhelnatělé. Tepelná vodivost a měrné teplo jsou proměnné v závislosti na teplotě a jsou uvažovány stejné pro surové i zuhelnatělé dřevo. Teplotní závislosti těchto veličin jsou převzaty z normy ČSN EN 1995-1-2 [2] (Obrázek 7-3). Hustota je uvažována konstantní a je definována pro každou složku dřeva (lignin, hemicelulóza a celulóza) a pro dřevo zuhelnatělé zvlášť.



Obrázek 7-3 Teplotní charakteristiky dřeva [2]

Reakce hoření dřeva je definována pomocí efektivní výhřevnosti, vstupujících reaktantů a produktů reakce. Do reakce vstupuje dřevo a vzduch. Produkty reakce jsou plynný CO₂, vodní pára, dusík a saze v daném poměru.

Další reakcí probíhající současně s hořením dřeva je tepelný rozklad dřeva, tj. pyrolýza. Pyrolýza dřeva je v modelu definována pomocí tzv. kinetických parametrů E_α , A_α a n_α . Kinetické parametry určují rychlost reakce pyrolýzy v závislosti na teplotě. Tento vztah popisuje Arrheniova rovnice, dle které platí

$$r_j = A_\alpha \exp\left(\frac{-E_j}{RT}\right) Y_{s,\alpha}^{n_\alpha} \quad (6.1)$$

kde r_j je rychlost reakce,

A_α pre-exponenciální faktor v s⁻¹ složky α ;

E_α aktivační energie v kJ·mol⁻¹ složky α ;

n_α řád reakce složky α ;

T teplota v K;

$Y_{s,\alpha}$ počáteční podíl složky α ;

R plynová konstanta.

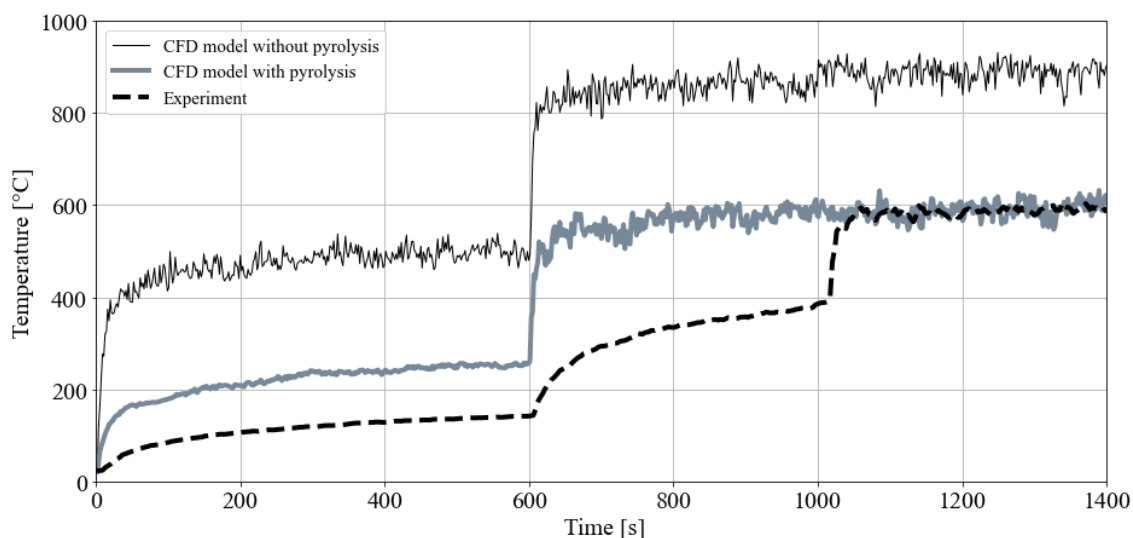
Kinetické parametry jehličnatého dřeva jsou převzaty z [22]. Je zvolen tříložkový model pyrolýzy, tzn. každá složka dřeva – lignin, hemicelulóza a celulóza – má jiné kinetické parametry. Tabulka 7-2 uvádí použité kinetické parametry jednotlivých složek dřeva v modelu.

Tabulka 7-2 Kinetické parametry zvolené pro pyrolýzní model [22]

Složky dřeva	$Y_{s,\alpha}(0)$	A_α	E_α	n_α	V_{char}
	[-]	[s ⁻¹]	[kJ·mol ⁻¹]	[-]	[-]
Hemicelulóza	0,2785	$5,426 \cdot 10^{13}$	168,1	2,5	0,0
Celulóza	0,4103	$4,239 \cdot 10^{13}$	195,1	0,62	0,043
Lignin	0,2696	$2,46 \cdot 10^{12}$	157,5	6,11	0,517
Extraktivní látky	0,0167	$4,411 \cdot 10^8$	107,1	1,0	0,0

Volba vhodných kinetických součinitelů vyžaduje zkoumání více variant (citlivostní analýzu) a možnost srovnání výsledků modelu se skutečným experimentem (validaci). Problematický je velký rozptyl hodnot kinetických součinitelů v dostupné literatuře a způsob stanovení kinetických součinitelů. Hodnoty kinetických součinitelů jsou získávány ze zkoušek malého měřítka, ve zkouškách většího měřítka mohou mít za následek nepřesné výsledky.

Na druhou stranu není doporučeno pyrolýzu zanedbat, pokud v modelu dochází k hoření dřeva. V [23] jsou porovnány teploty FDS modelu s teplotami z experimentu a modelu, ve kterém není pyrolýza zohledněna. Obrázek 7-4 ukazuje, co opomenutí pyrolýzy způsobí. Pokud je pyrolýza zanedbána, část energie se nespotřebuje na rozklad dřeva, ale způsobí růst okolních teplot. Model bez pyrolýzy předpovídá vyšší teploty.

**Obrázek 7-4** Teploty ve výšce 2400 mm nad hořákem (experiment a model s pyrolýzou a bez pyrolýzy) [23]

Pro tento FDS model je provedena citlivostní analýza modelu pyrolýzy [23]. Výše popsaný tříložkový model pyrolýzy s vybranými kinetickými součiniteli (Tabulka 7-2) je validován experimentem a vhodnost jeho použití pro tento model je potvrzena. Více o validaci v kapitole 7.2.

7.1.3 Snímače teploty a výstupy

V modelu jsou naprogramovány snímače teploty. Tyto snímače odpovídají svým umístěním skutečným termočládkům v experimentu. Teploty jsou měřeny v hloubce 5, 15, 25 a 50 mm ve zkušebních tělesech, vždy v první a druhé třetině délky vzorku (800 a 2020 mm). Snímače, které představují deskové snímače teploty, měří teplotu povrchu dřevěných vzorků na základě jejich prostorové orientace na plochu. Dále je snímána teplota plynu uvnitř pece (TC strom).

V modelu jsou nastaveny fiktivní snímače teplot a měřiče hustoty pro kontrolu správnosti výpočtu a kvůli lepší představě prostorového rozložení teploty. Na povrchu stěn pece je zaznamenávána adiabatická teplota.

V FDS modelu jsou naprogramovány snímače teplot plynu pomocí kvantit `TEMPERATURE` bez orientace. Teploty stropu nad hořákem jsou měřeny kvantitou `WALL TEMPERATURE` s orientací na plochu. Snímače teploty uvnitř dřeva jsou definovány pomocí `INSIDE WALL TEMPERATURE` s orientací ven ze dřeva. Teplota povrchu dřevěných prvků je v modelu počítána více způsoby. Skutečný deskový snímač teploty povrchu dřeva je namodelován pomocí kvantit `TEMPERATURE` s orientací na dřevěný prvek. Snímač je jeden, ve výšce sloupu 800 mm. Dále je teplota povrchu měřena pomocí `WALL TEMPERATURE` a `ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE`, obě veličiny s orientací směrem na dřevo. Tyto veličiny jsou měřeny na všech stranách sloupu ve výškách 500, 1000, 1500, 1600, 1700, 1800 a 1900 mm.

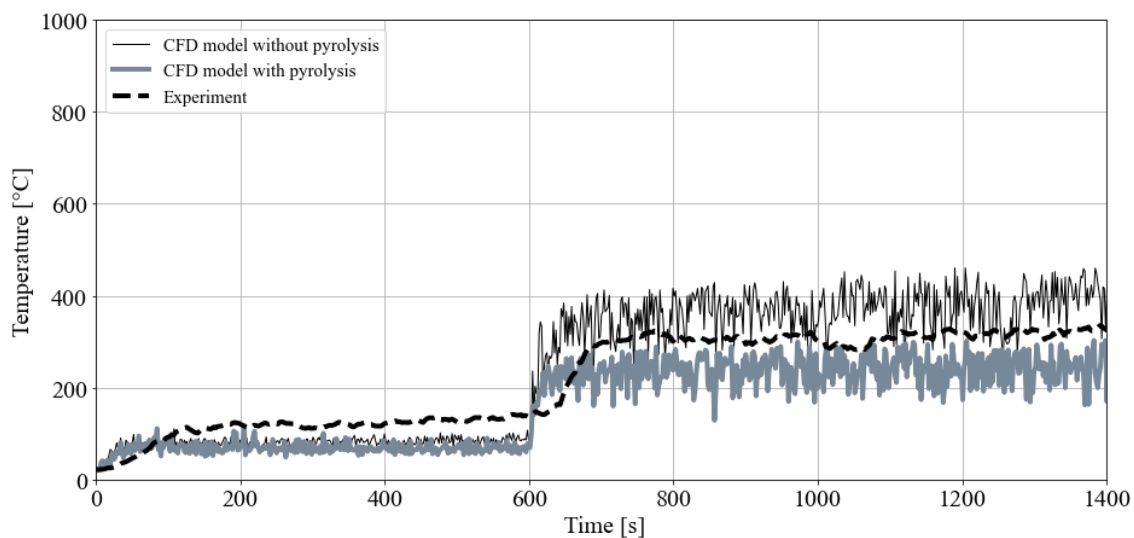
7.1.4 Výpočetní síť

Výpočetní síť je nastavena tak, aby rozměry vzorků a konstrukcí mohly být zachovány. Velikost buňky výpočetní sítě je zvolena 50 mm (rozměry vzorků jsou 150 x 150 mm). Velikost výpočetní buňky v části zvonu (odtah) je zvětšena na 100 mm pro usnadnění výpočtu. Celkový počet výpočetních buněk v tomto nastavení je 206 652. V další kapitole je síť zjemněna za účelem ověření citlivosti výsledků na velikost sítě.

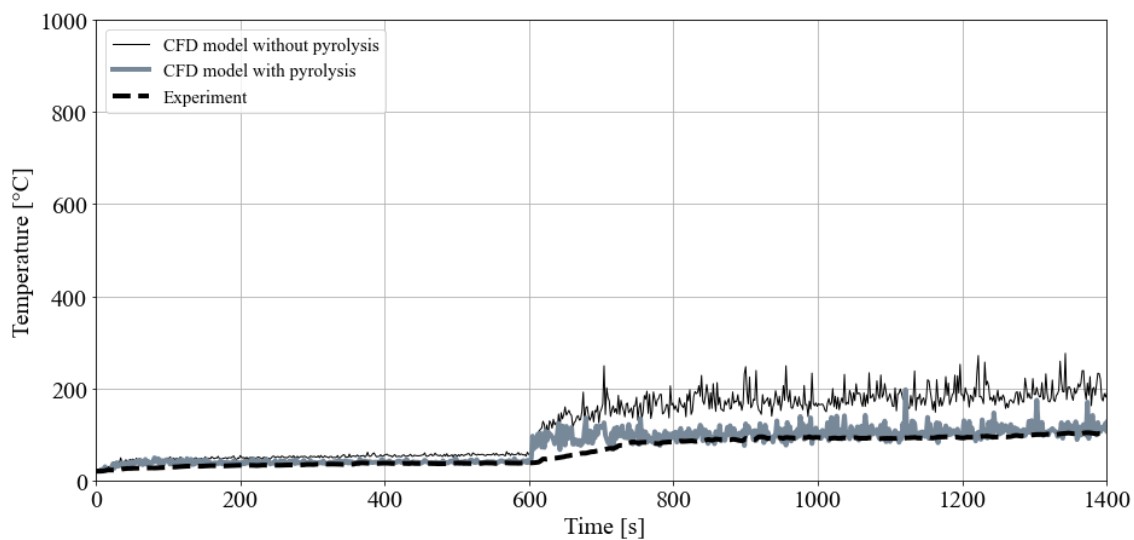
7.2 Validace modelu

Validace výpočetního modelu RCT je popsána v článku [23]. Model je validován na základě srovnání teplot získaných z modelu s teplotami z experimentu. Vzájemně jsou porovnávány časové průběhy teplot změřené na termočláncích (skutečných a namodelovaných). Validace prokazuje, že model dokáže správně předvídat časový vývoj teplot. Volba kinetických součinitelů a třísloužkové schéma pyrolýzy se zdá jako vhodná varianta.

Obrázky 7-4 až 7-6, viz také [23], porovnávají rozvoj teplot na termočláncích TC stromu z experimentu a z modelu. V modelu se jedná o veličinu `TEMPERATURE` bez orientace. Součástí tohoto porovnání je také průběh teplot modelu, ve kterém není model pyrolýzy aktivován. Tato porovnání dokazují důležitost zohlednění pyrolýzy a volby správného pyrolýzního modelu. Pod grafem je vždy uveden původ publikovaných hodnot.



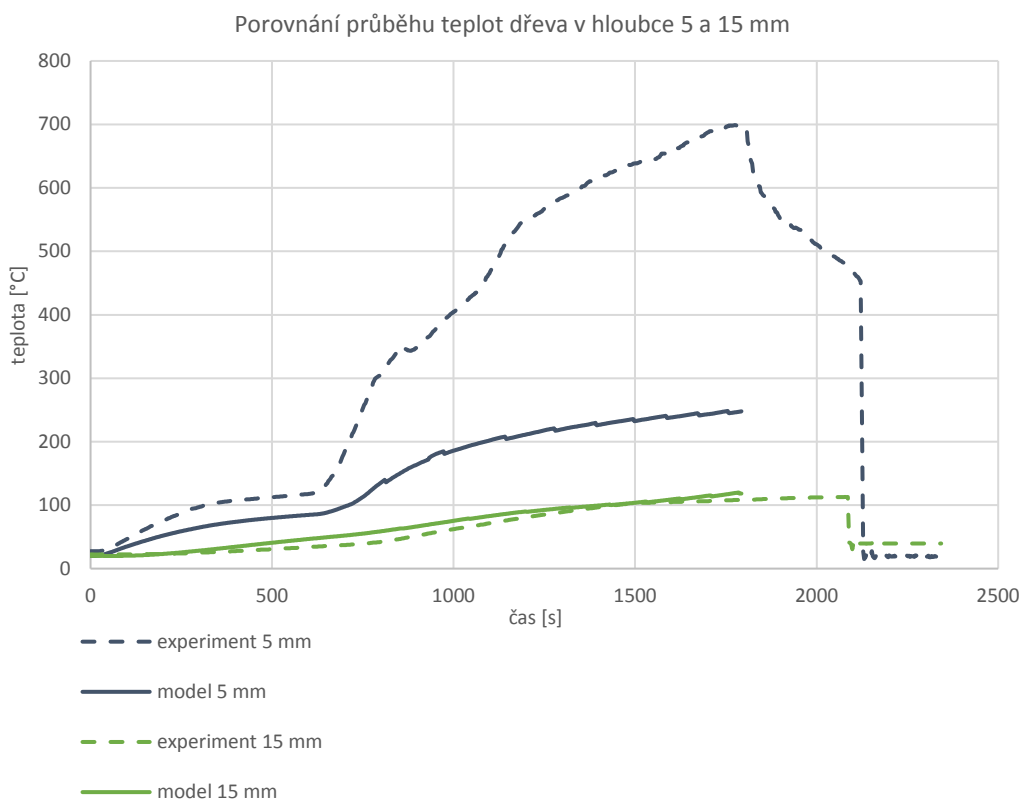
Obrázek 7-5 Teploty ve výšce 1720 mm na TC stromu (experiment a model s pyrolýzou a bez pyrolýzy) [23]



Obrázek 7-6 Teploty ve výšce 1420 mm na TC stromu (experiment a model s pyrolýzou a bez pyrolýzy) [23]

7.3 Ověření a analýza dalších výstupů modelu

Obrázky výše se týkají validace pomocí teplot plynů. Pro kompletní validaci je třeba ověřit také teploty povrchů a teploty dřeva. Obrázek 7-7 porovnává teploty uvnitř dřeva, tzv. INSIDE WALL TEMPERATURE. Jedná se o teploty v hloubce 5 mm ve výšce 2020 mm sloupu 1 na straně exponované požáru. Čárkované křivky představují průběh teplot v experimentu, plné čáry jsou z FDS modelu. Teploty uvnitř dřeva jsou v experimentu měřeny v hloubce 5, 15, 25 a 50 mm. Ve stejných hloubkách jsou namodelovány termočlánky v FDS modelu. Níže jsou uvedeny průběhy teplot v hloubkách 5 a 15 mm, jelikož teploty ve větších hloubkách nedosahují hodnot vyšších 100 °C.



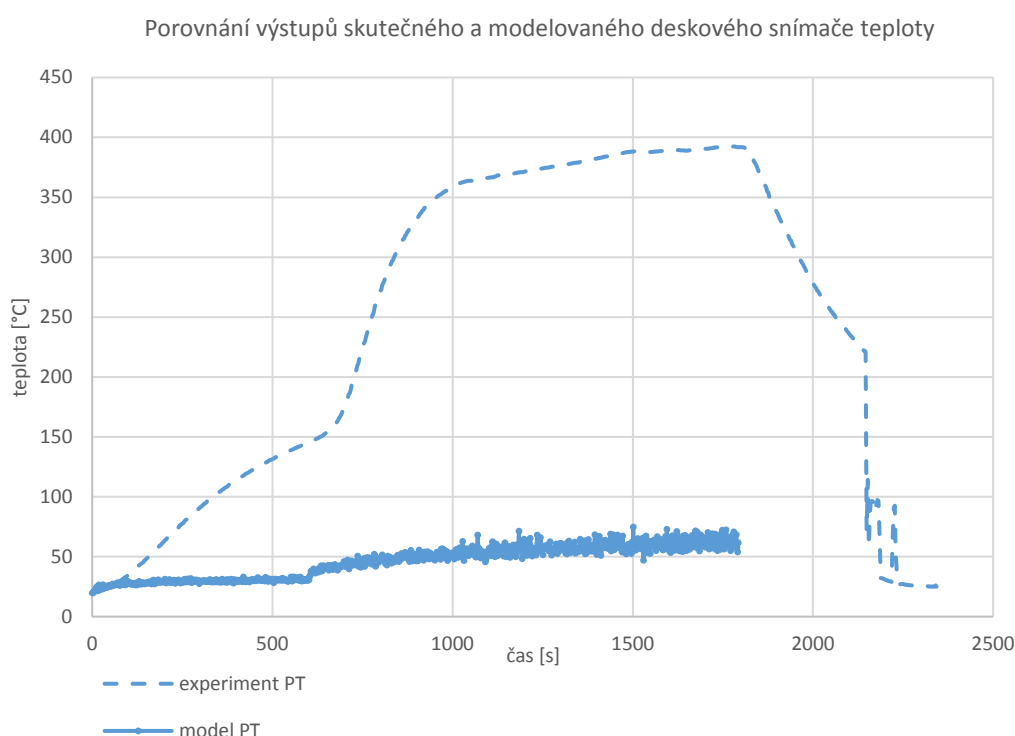
Obrázek 7-7 Teploty dřeva v hloubce 5 a 15 mm ve výšce 2020 mm (experiment a model)

Pro spolehlivou validaci je vhodnost hloubky termočlánků 5 mm diskutabilní. Krycí vrstva termočlánku 5 mm je nedostačující a nelze zaručit přesné měření během experimentu. Lze předpokládat degradaci až zuhelnatění krycí vrstvy. Tyto jevy mohou způsobit vyšší vodivost termočlánků a kabelů, a následně vyšší naměřené teploty. Z toho důvodu je třeba podrobit termočlánky v hloubce 5 mm hlubšímu zkoumání. Termočlánky v hloubce 15 mm naopak poskytují velmi přesnou předpověď a umožňují validovat model.

Obrázek 7-8 představuje srovnání teplot na deskovém snímači, skutečném a namodelovaném. Jedná se o deskový snímač měřící teplotu povrchu sloupu 1 ve výšce 800 mm. Modelový a skutečný deskový snímač má stejné umístění i orientaci a oba jsou založeny na měření teplot na základě sálavého tepelného toku. Přesto se výstupy termočlánků zásadně liší. Důvodem mohou být nižší teploty plynů v modelu, které mají vliv na teplotu dřeva. Následná vypočtená teplota na deskovém snímači teplot vychází ze složky tepelného toku radiací dopadající na dřevěný povrch, která je malá.

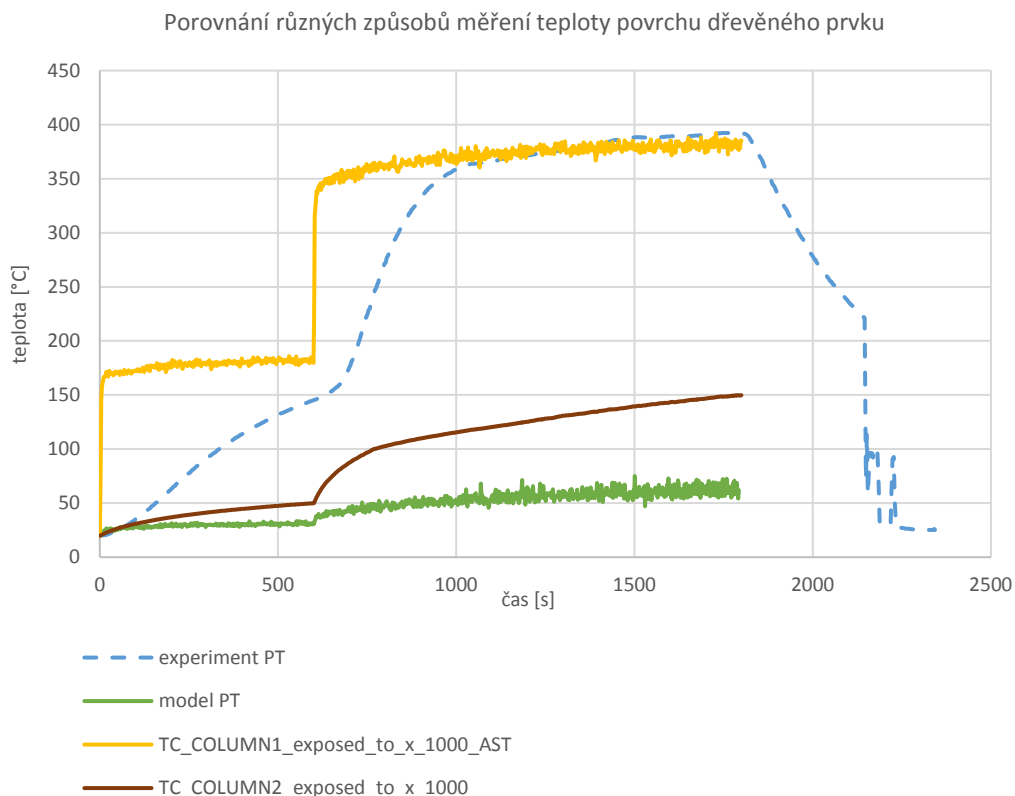
V programu FDS existuje více možností, jak teploty měřit. Program umožňuje získávat data jako WALL TEMPERATURE, TEMPERATURE, INSIDE WALL TEMPERATURE a ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE. Tyto výstupy se liší způsobem zadávání v FDS kódu. Vždy se jedná o jistý druh teploty, způsob výpočtu hodnoty je však jiný.

Ve validaci je vždy uvedeno, o jaký typ teploty se jedná. Pro validaci jsou používány teploty plynů v určité výšce nad hořákem (TEMPERATURE bez orientace) a teploty stropu nad hořákem (WALL TEMPERATURE s orientací na plochu). Dále jsou analyzovány teploty uvnitř dřeva (INSIDE WALL TEMPERATURE s orientací ven ze dřeva). Teplota povrchu dřevěných prvků je v modelu počítána více způsoby. Skutečný deskový snímač teploty povrchu dřeva je namodelován pomocí kvantity TEMPERATURE s orientací na dřevěný prvek. Snímač je jeden, ve výšce sloupu 800 mm. Dále je teplota povrchu měřena pomocí WALL TEMPERATURE a ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE, obě veličiny s orientací směrem na dřevo. Tyto veličiny jsou měřeny na všech stranách sloupu ve výškách 500, 1000, 1500, 1600, 1700, 1800 a 1900 mm.



Obrázek 7-8 Teploty na deskovém snímači ve výšce 800 mm (experiment a model)

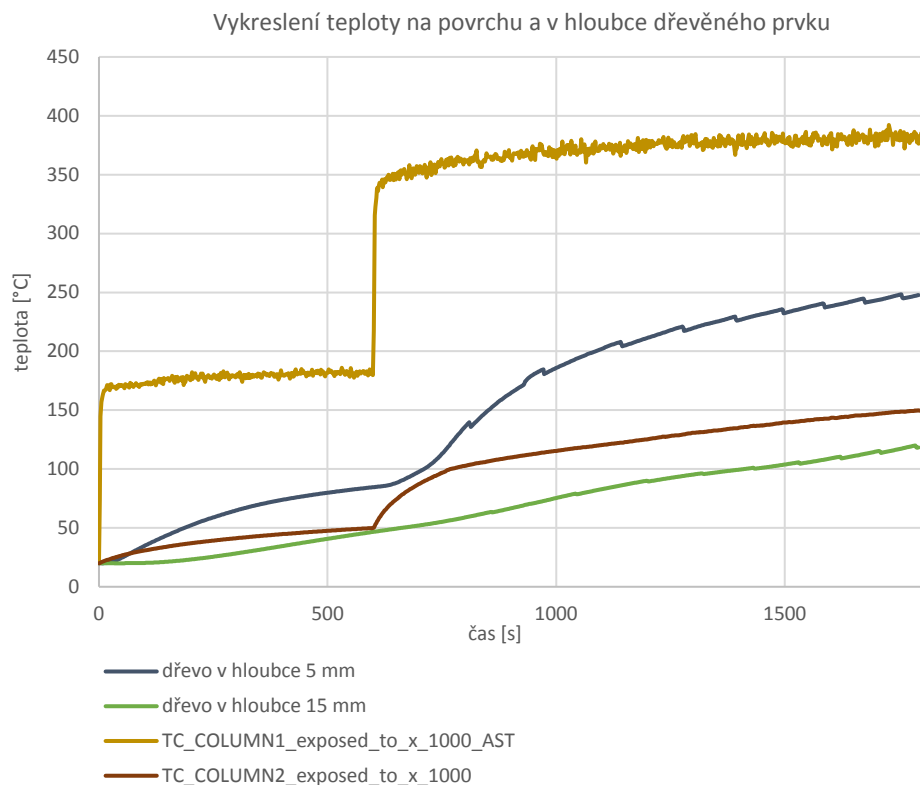
Vzhledem k tomu, že výšková poloha deskového snímače se neshoduje s výškovou polohou zbylých způsobů měření teploty povrchu, nejsou výsledné teploty plně porovnatelné. Přesto Obrázek 7-9 ukazuje vzájemné porovnání. TC_COLUMN1_exposed_to_x_1000_AST je název fiktivního termočlánku měřícího adiabatickou teplotu ve výšce 1000 mm na exponované straně. TC_COLUMN_exposed_to_x_1000 je název fiktivního termočlánku měřícího teplotu povrchu dřeva ve výšce 1000 mm na exponované straně. Experimentální a modelovaný deskový snímač (v grafu „PT“) měří teploty ve výšce 800 mm.



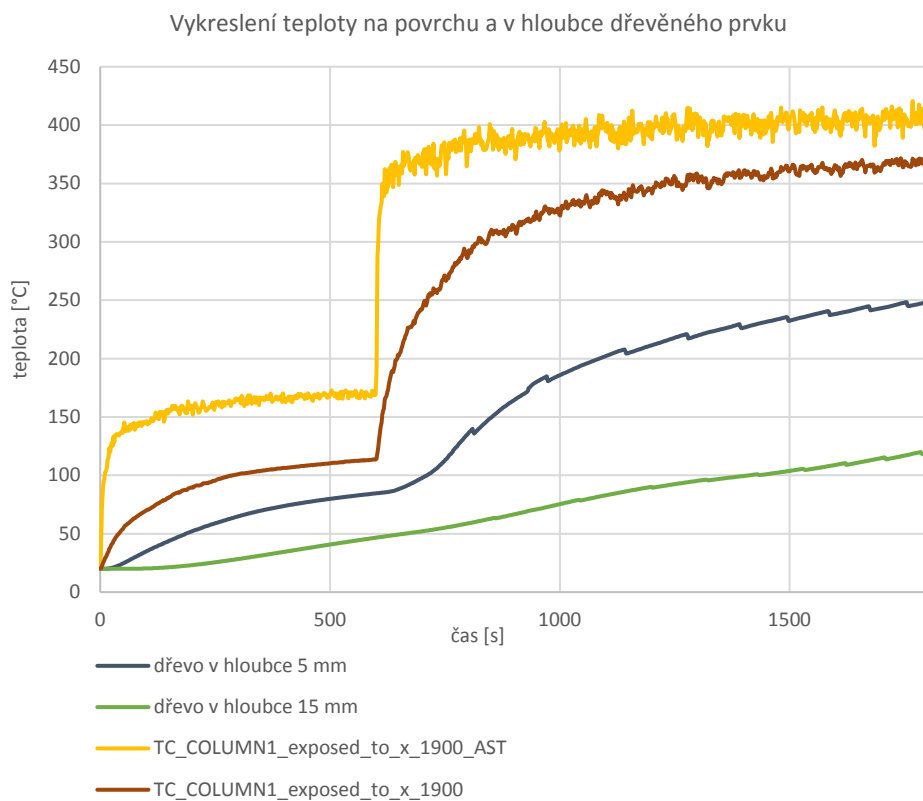
Obrázek 7-9 Teploty povrchu dřevěného prvku ve výšce 800 a 1000 mm (experiment a model)

Obrázek 7-9 dokazuje, že k experimentálním výsledkům má nejbližší virtuální snímač teploty WALL TEMPERATURE. Snímač adiabatické teploty nejlépe vystihuje maximální teplotu a je nejkonzervativnější. Naopak modelovaný deskový snímač teploty, který má představovat skutečný termočlánek a má stejné umístění, nejhůře simuluje průběh teplot.

Průběh teplot na modelovaném deskovém termočlátku měl být použit k mapování průběhů teplot po profilu dřevěného prvku. Bohužel se modelovaný deskový snímač teploty ukazuje jako nepřesný pro popis teplot povrchu. Z toho důvodu jsou pro tento účel zvoleny fiktivní termočlánky TC_COLUMN1_xx, které Obrázek 7-9 ukazuje jako nejpřesnější. Obrázek 7-11 a Obrázek 7-11 představují teploty po průřezu dřevěného prvku – teploty na povrchu a teploty v hloubce 5 a 15 mm. Hluběji ve dřevě se teploty nemění. Jedná se pouze o teploty získané z modelu. Teploty naměřené v experimentu nejsou zakresleny. Obrázek 7-11 zobrazuje změnu teplotního profilu ve výšce 800 a 1000 mm, Obrázek 7-11 ve výšce 1900 a 2020 mm. Bohužel teploty v hloubce jsou měřeny pouze ve výšce 800 a 2020 mm. Tyto hodnoty nelze brát jako plně kompatibilní s hodnotami z fiktivních termočlánků.



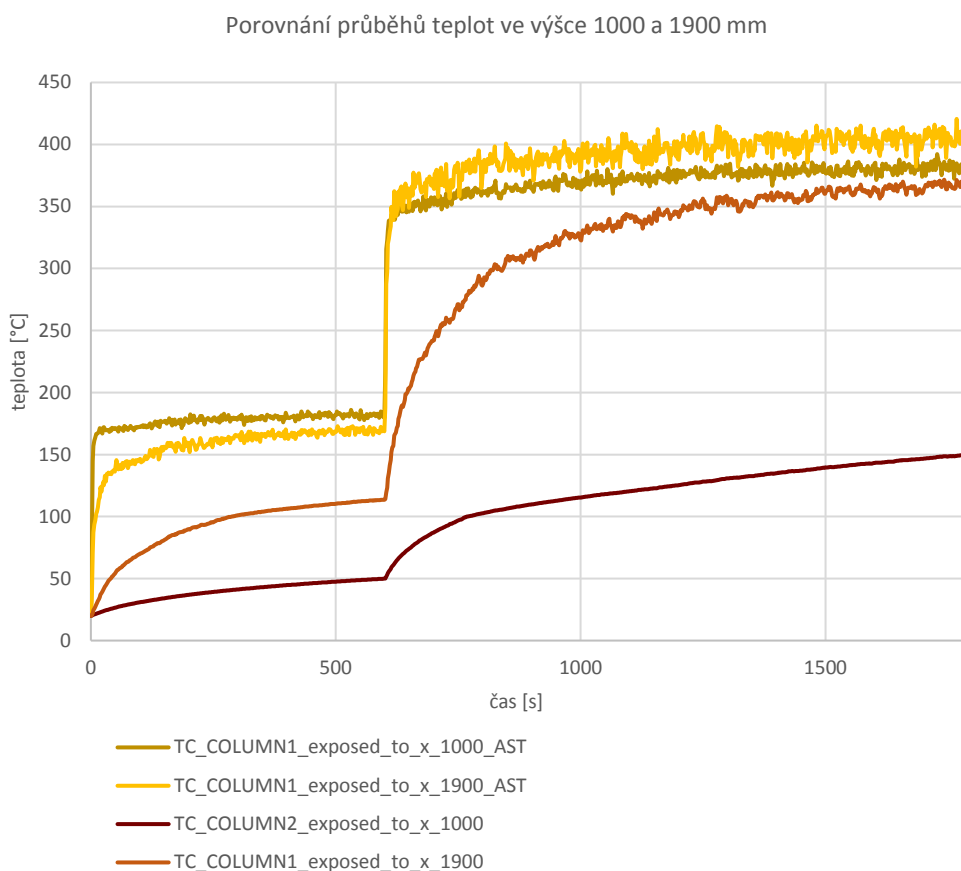
Obrázek 7-10 Teploty na povrchu a v hloubce dřevěného prvku ve výšce 800/1000 mm (model)



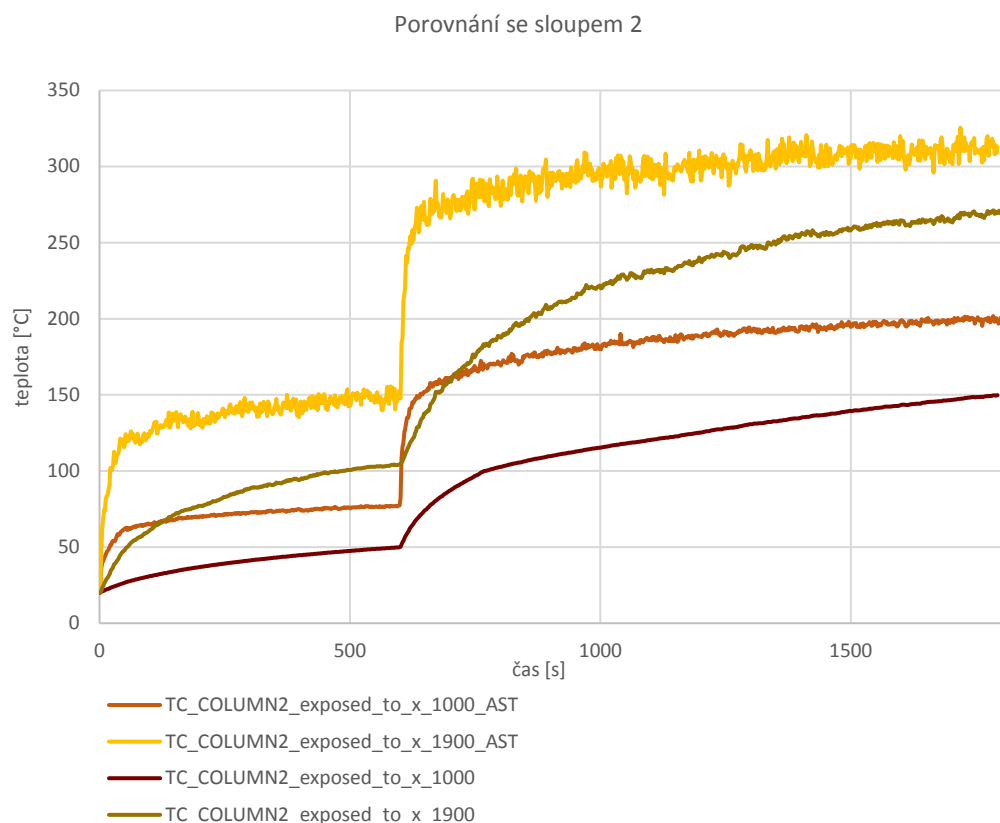
Obrázek 7-11 Teploty na povrchu a v hloubce dřevěného prvku ve výšce 1900/2020 mm (model)

Zajímavé je také srovnání teplot, které zobrazuje Obrázek 7-12. Porovnává teploty počítané fiktivními termočlánky a ukazuje rozdíl mezi teplotami ve výšce 1000 a 1900 mm. Světlejší odstín žluté a hnědé představuje teploty na horní části sloupu (1900 mm). Naopak tmavší odstíny popisují teploty ve spodní části sloupu. Je viditelné, že na počátku je povrch teplejší ve spodní části ve výšce 1000 mm. Poté, co dojde ke zvýšení výkonu, začíná vznikat horní horká vrstva, a povrch ve výšce 1900 mm se stává teplejším.

Tento jev je možné vidět pouze na sloupu 1. Nachází se v blízkosti hořáku. Ve vzdálenějších částech místnosti, kde vliv hořáku není tak patrný, bychom tento jev pravděpodobně nenašli. V peci nejdříve dochází k ohřívání stropu vlivem proudění, následně je ohřívána spodní část prostoru zářením od horní horké vrstvy. Pro doložení tohoto předpokladu je zde publikován Obrázek 7-13. V horní části sloupu (1900 mm) jsou zaznamenány vyšší teploty po celou dobu požáru. Tyto dva grafy ověřují správnost fyzikálních principů požáru v modelu.



Obrázek 7-12 Teplota povrchu dřevěného sloupu ve výšce 1000 a 1900 mm



Obrázek 7-13 Teplota povrchu dřevěného sloupu ve výšce 1000 a 1900 mm

7.3.1 Vizuální validace

Součástí ověření FDS modelu je vizuální validace. Je založena na pozorování virtuální simulace průběhu modelovaného požáru ve Smokeview a srovnání časového sledu událostí s reálným průběhem požáru v experimentu. Pozorovány jsou časy vzplanutí dřevěných vzorků na základě barevné simulace ve Smokeview, která zobrazuje rozvoj a putování požáru. Průběh reálného experimentu a jednotlivé události jsou zaznamenány a je pořízen audiovizuální záznam.

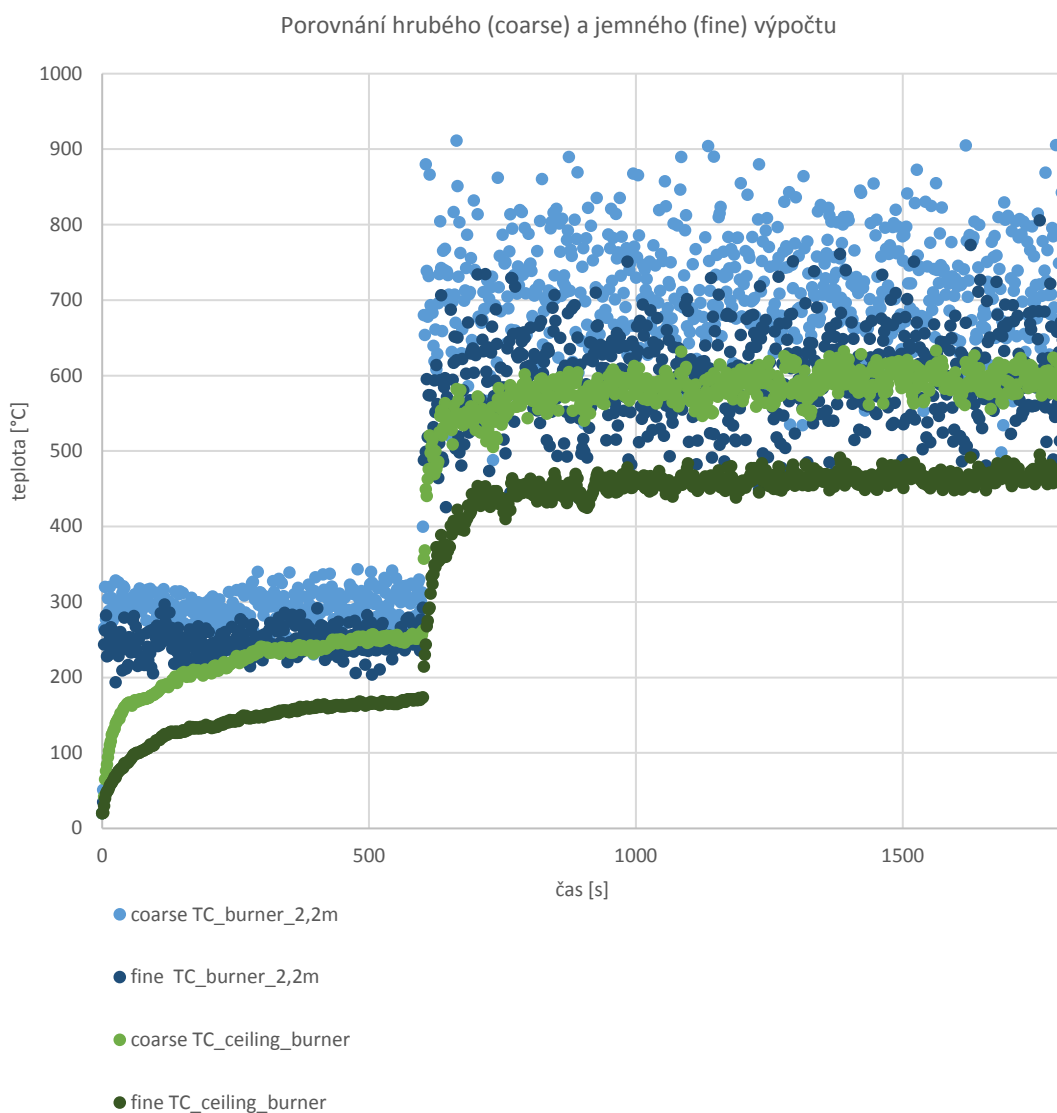
Tento způsob validace se při vyhodnocení ukázal jako velmi subjektivní. Barevné zobrazení požáru ve Smokeview není zcela jasné a hranice požáru není zřetelná. Toto platí i u záznamu z reálného experimentu. Pozorovatel zapisuje časy, které jsou určeny na základě jeho vnímání a na základě subjektivního úsudku. Kontrola času vzplanutí dřevěných prvků je zároveň komplikovaná vzhledem k omezenému množství měřících rovin (SLICE). Vzplanutí materiálu není vždy na měřící rovině zachyceno.

Bez ohledu na nedostatky a nepřesnost této metody byly časy vzplanutí u všech dřevěných prvků ověřeny. Je však třeba počítat s jistou subjektivitou této metody. Zápis z této metody není uveden.

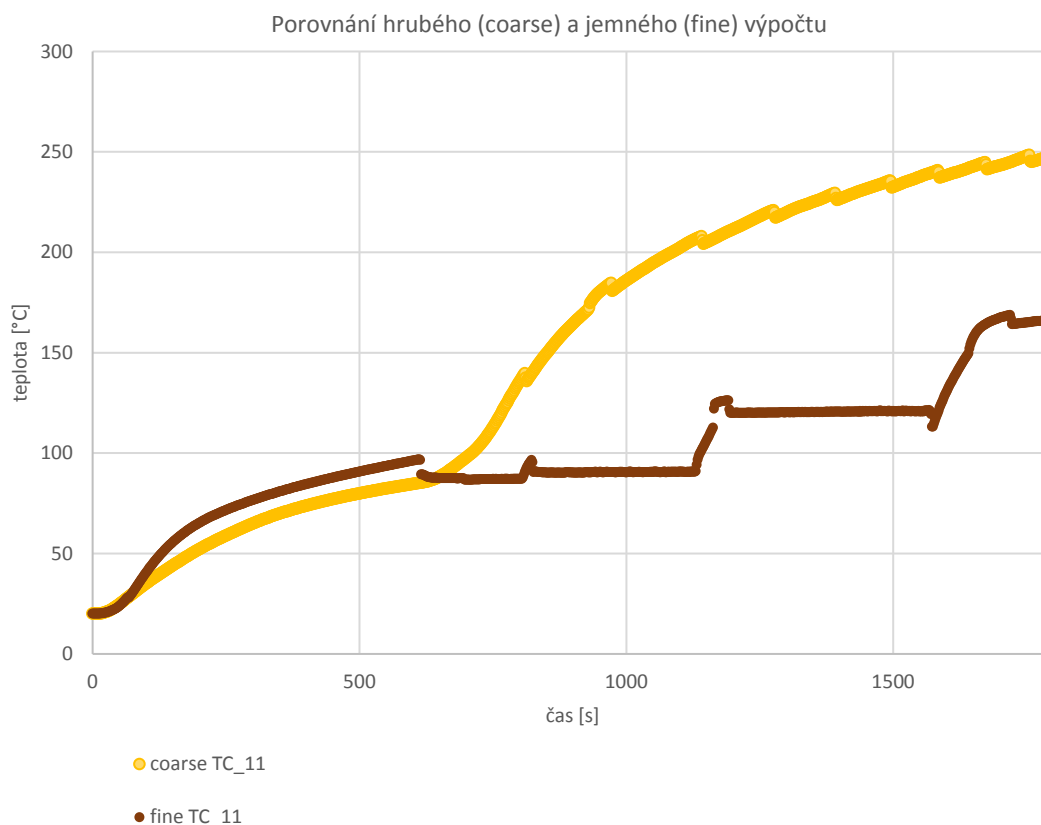
7.4 Velikost výpočetní sítě

Původní výpočetní síť FDS modelu o velikosti hrany buňky 50 mm je označena jako hrubá. Výpočet na PC s hrubou výpočetní sítí trvá přibližně 5 dní. Pro získání představy o přesnějším rozložení teplot a pro ověření správnosti hrubého výpočtu je navržena druhá, jemnější výpočetní síť. Buňka této výpočetní sítě je dvakrát menší, tzn. o velikosti hrany 25 mm. Výpočet s jemnější výpočetní sítí trval 22 dní.

7.4.1 Hrubý vs jemný výpočet



Obrázek 7-14 Teplota na třech termočláncích v hrubém a jemném modelu (coarse, fine)



Obrázek 7-15 Teplota na termočláncu ve dřevě v hrubém a jemném modelu (coarse, fine)

Obrázek 7-14 a Obrázek 7-15 popisují teploty jemného výpočtu a porovnávají je s výsledky hrubého výpočtu. Jedná se o teploty měřené na termočláncích ve výšce 2,2 m nad hořákem (TC_burner_2,2m) a na stropě nad hořákem (TC_ceiling_burner). Teploty ve dřevě zobrazuje Obrázek 7-15. Jedná se o teploty v hloubce 5 mm (TC_11). Porovnáváné termočláncí TC_burner_2,2m měří teplotu plynu pomocí kvantit TEMPERATURE. Snímač TC_ceiling_burner je definován kvantitou WALL TEMPERATURE a orientací směrem dolů (z plochy). A TC_11 je již zmíněný termočlánek uvnitř dřeva, definovaný kvantitou INSIDE WALL TEMPERATURE, orientací ze dřeva s hloubkou 5 mm.

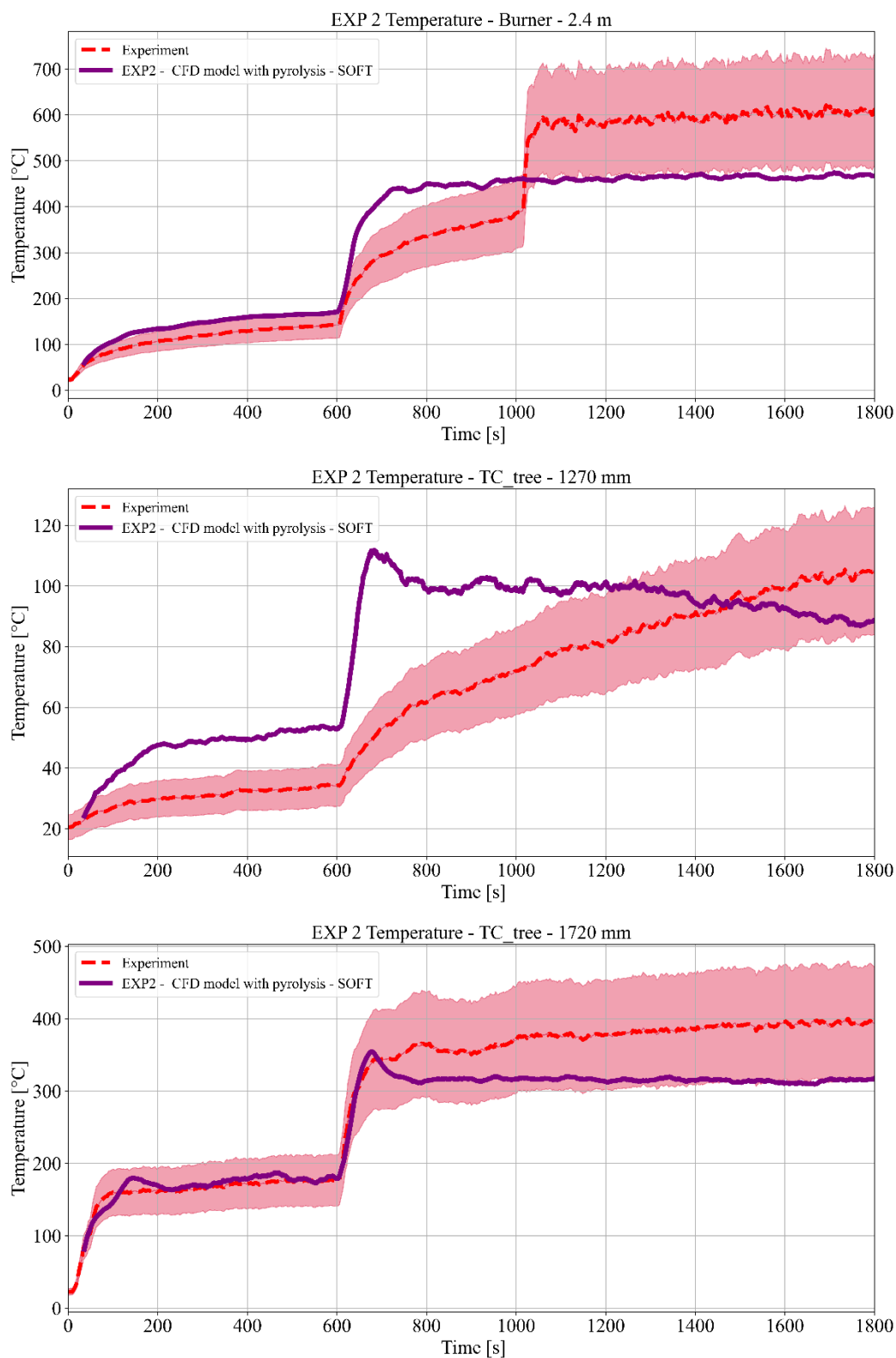
V jemném výpočtu jsou výstupem menší teploty než u hrubého výpočtu. Tento rozdíl teplot je viditelný na všech termočláncích. Dále lze vidět, že hrubý výpočet má na termočláncích nad hořákem (TC_ceiling_burner a TV_burner_2,2m) mnohem větší rozptyl hodnot oproti jemnému výpočtu. Důvodem je hrubost výpočetní sítě, a větší odchylky.

Pravděpodobně se na jemném výpočtu ukazuje nesprávnost kinetických součinitelů pyrolýzy. Jak lze vidět v kapitole 7.1.2, pyrolýza má zásadní vliv na výsledné teploty. A nejedná se pouze o samotné modelování dřevěných prvků, pyrolýza má vliv na celkové teploty v peci, jelikož dřevo představuje další významný zdroj tepelné energie. Jak již bylo řečeno, koeficienty pochází ze zkoušek malého měřítka a ve zkouškách velkého měřítka nemusí být aplikovatelné.

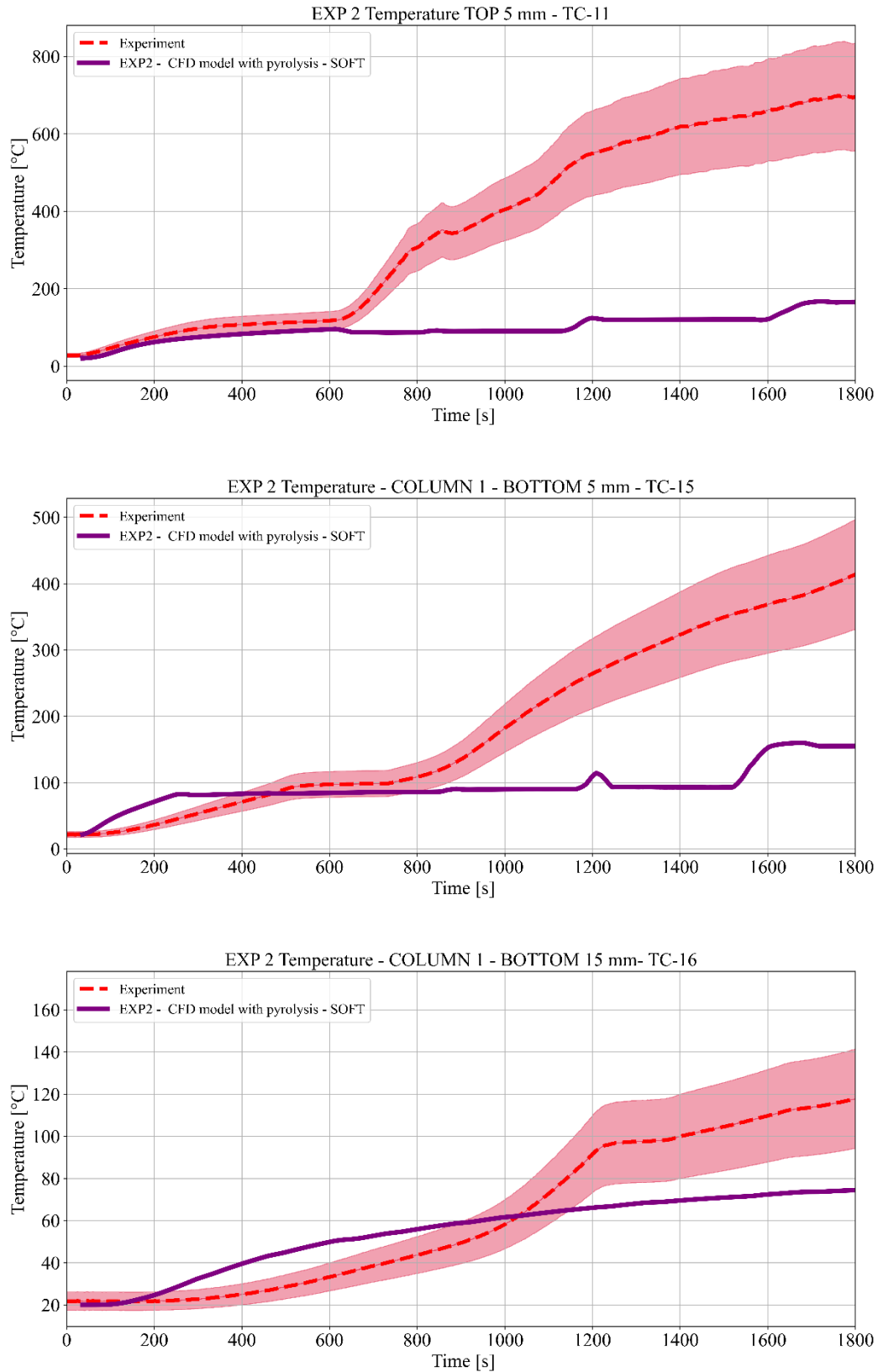
7.4.2 Jemný výpočet vs experiment

Na dalších stránkách jsou uvedeny grafy validace modelu s jemnou výpočetní sítí. Červená čárkovaná čára ukazuje průběh teplot v experimentu, fialová čára představuje model. První tři grafy (Obrázek 7-16) jsou ukázkou teplot nad hořákem a TC stromu. Měřenou veličinou je TEMPERATURE bez orientace. Na těchto grafech model celkem dobře odhaduje průběhy teplot.

Další grafy ukazují teploty ve dřevě. Zde se křivky spíše neshodují. Překvapivá shoda je na TC 16 v hloubce 15 mm na neexponované straně sloupu. Na stejném místě v hloubce 5 mm (TC 15) jsou křivky odlišné. Teploty na termočláncích ve dřevě kromě TC 16 jsou výrazně pod experimentálními hodnotami.



Obrázek 7-16 Validace modelu s jemnou výpočetní sítí (TEMPERATURE)



Obrázek 7-17 Validace modelu s jemnou výpočetní sítí (INSIDE WALL TEMPERATURE)

Vzhledem k délce výpočtu jemného modelu byly výsledky získány až po provedené citlivostní studii v kapitole 8.3.2 na konci času věnovaného diplomové práci. Přes nepřesnost odhadu jemného modelu je původní hrubý FDS model stále považován za validovaný a spolehlivý. Následující citlivostní studie je považována za směrodatnou a lze z ní vyčíst mnoho jevů nehledě na nepřesnost odhadu jemnějšího výpočtu.

8 Model citlivostní studie

8.1 Úvod

Obsahem této kapitoly je hlubší studium vytvořeného FDS modelu s hrubou výpočetní sítí. Na validovaném FDS modelu lze zkoumat vstupní hodnoty, měnit je a analyzovat výstupy. Citlivostní studie v této kapitole má za cíl zkoumat vliv parametrů požáru na výsledné teploty.

8.2 Výběr modelu

Citlivostní studie vyžaduje sérii opakování, proto výpočet nesmí být časově náročný. Výpočet validovaného modelu popsaného v kapitole 7.1 trvá 5 dní. Tento model je poměrně časově nenáročný, proto je vhodný pro citlivostní studii.

Původně byl pro studii navrhován model rohu zkušební pece RCT. Jednalo by se pouze o roh zkušební pece s hořákem a nejzajímavějším sloupem č.1. Tím by došlo ke snížení počtu výpočetních buněk. Bylo by však třeba nastavit jiné okrajové podmínky a upravit geometrii. Stejně tak je v tomto rohu předpokládána nejvyšší pravděpodobnost výskytu turbulencí, a výpočetní čas by nebyl o moc kratší. Proto bylo od tohoto návrhu upuštěno. Citlivostní studie je provedena na celém validovaném modelu.

8.3 Parametrická studie průběhu výkonu hořáku

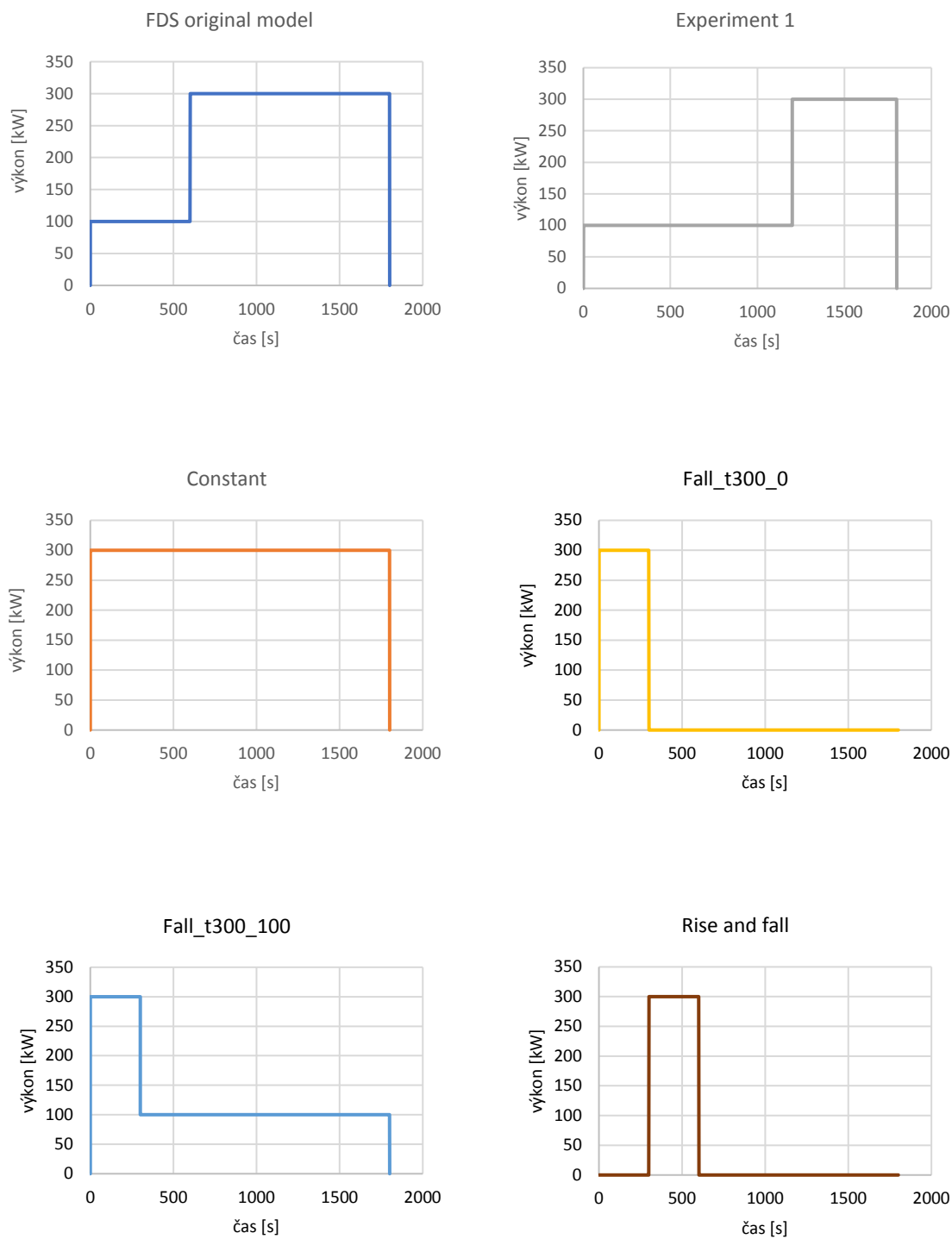
8.3.1 Parametr studie

Měněným parametrem této studie je výkon hořáku. Cílem je zvolit takový výkon proměnný v čase, aby bylo dosaženo různých požárů s odlišným průběhem. Záměrem je získat požáry s pomalým či rychlým rozvojem, požáry s krátkou a dlouhou klesající fází apod.

Je navrženo 6 variant výkonů hořáku (Obrázek 8-1). Všechny varianty mají maximální výkon 300 kW. Tato hodnota je převzata z původního FDS modelu, kde je maximální výkon 300 kW. Stejně maximální výkony umožňují, aby byla zajištěna určitá porovnatelnost výsledků.

Následující grafy představují navržené výkony proměnné v čase (Obrázek 8-1). První varianta je převzata z původního validovaného FDS modelu (graf FDS Original). Druhý model výkonu je nastaven podle experimentu 1 (více o experimentu v kapitole 5.1). Tyto dva výkony tvoří požáry s rostoucí fází. Třetí model je výkon o konstantních 300 kW (Constant). Další dva modely simulují požár s klesající fází poklesem výkonu na 0 kW nebo 100 kW (Fall_t300_0 a Fall_t600_100). Poslední, šestý model simuluje požár s rostoucí i klesající fází skokovým růstem a poklesem výkonu (Rise and fall).

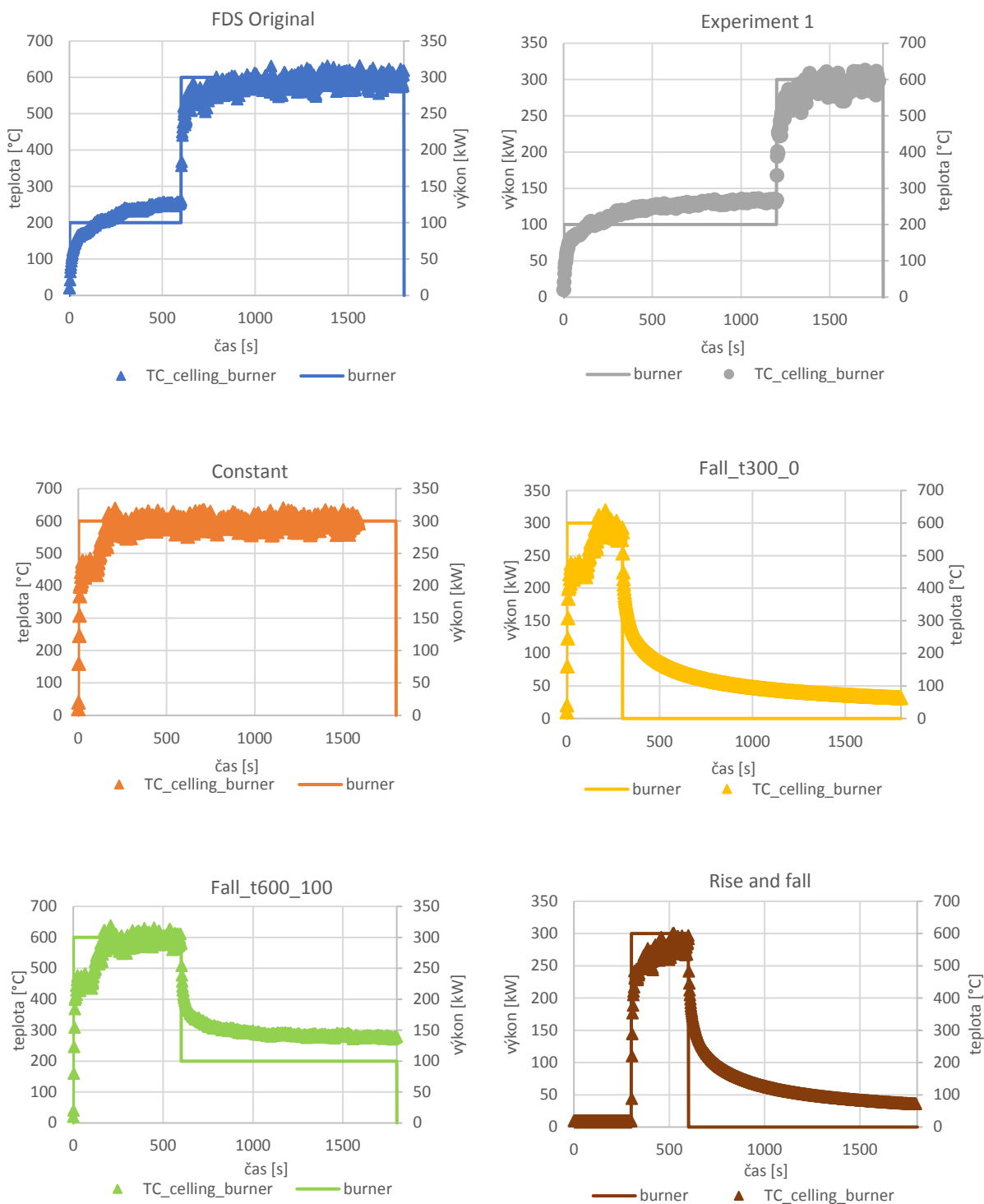
Pro rozšíření studie je navrhováno měnit maximální výkon a délku jeho trvání. Ve výše popsaných variantách výkonu se objevují pouze skokové nárůsty a poklesy výkonů. Do budoucna by bylo zajímavé sledovat vliv lineárního růstu či poklesu výkonu. Postupný růst a sestup by v některých případech lépe napodobil průběh reálného požáru. Časová náročnost výpočtů a omezená kapacita však zatím rozšíření neumožňují.



Obrázek 8-1 Varianty výkonů

8.3.2 Výstupy výpočtů a analýza

Výstupem šesti FDS modelů jsou vypočítané teploty. Publikovány a analyzovány jsou teploty na virtuálních termočláncích. Měřeny jsou teploty na stropě nad hořákem (Obrázek 8-2) a teploty uvnitř dřeva na exponované straně sloupu (Obrázek 8-3 až Obrázek 8-6). Vybrané termočlánky se nachází blízko hořáku a vliv výkonu hořáku je zde viditelný.



Obrázek 8-2 Výkon hořáku a teploty stropu nad hořákem

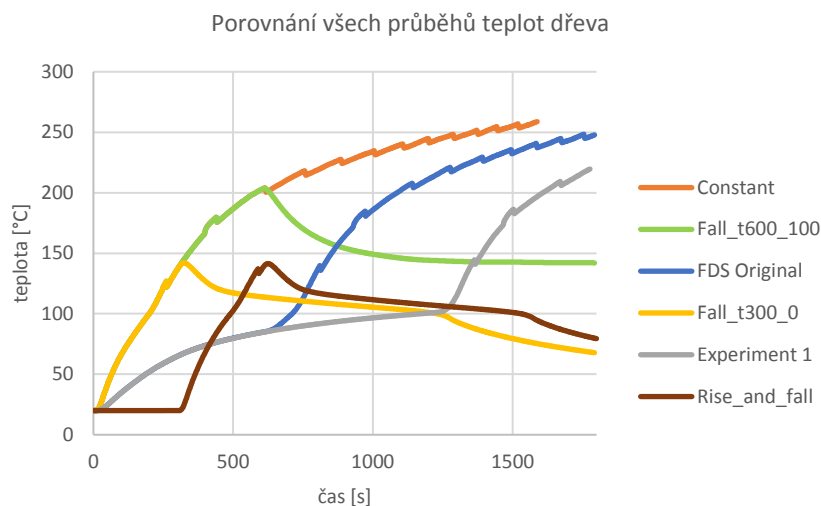
Obrázek 8-2 zobrazuje všech 6 variant modelů citlivostní studie a ukazuje souvislost mezi navrženým výkonem a výslednými teplotami. Jedná se o teploty stropu přímo nad hořákem (TC_ceiling_burner).

Závislost výkonu hořáku a vykreslených teplot je zjevná. Křivky teplot viditelně kopírují průběhy výkonu hořáků. Stejný maximální výkon u všech šesti variant má za výsledek podobné maximální teploty, tj. okolo 600 °C. Teploty přímo nad hořákem nejlépe odráží vliv výkonu hořáku. V tomto místě zatím nedochází k významným turbulencím a teplota je ovlivněna zářením hořáku a prouděním teplého vzduchu, jehož trajektorie od hořáku není významně narušena.

Na teplotách původního FDS modelu a modelu 1. experimentu lze vidět časový rozdíl 10 minut vlivem odlišného času zvýšení výkonu hořáku na 300 kW. Počáteční rozvoj teplot během prvních 10 minut je u obou modelů stejný. Následné maximální teploty mají různé trvání a mají vliv na samotné prohřátí dřeva, kterému je věnována další kapitola.

U modelů s klesající fází (Fall_t_300_0 a Fall_t_600_100) lze pozorovat podobný průběh klesání teplot. Liší se teplotou, na které se model ustálí v závěrečné fázi. V případě konstantních 100 kW dojde k ustálení na 279 °C. V případě nulového výkonu křivka stále klesá, dokud nedosáhne ustáleného stavu s okolním prostředím.

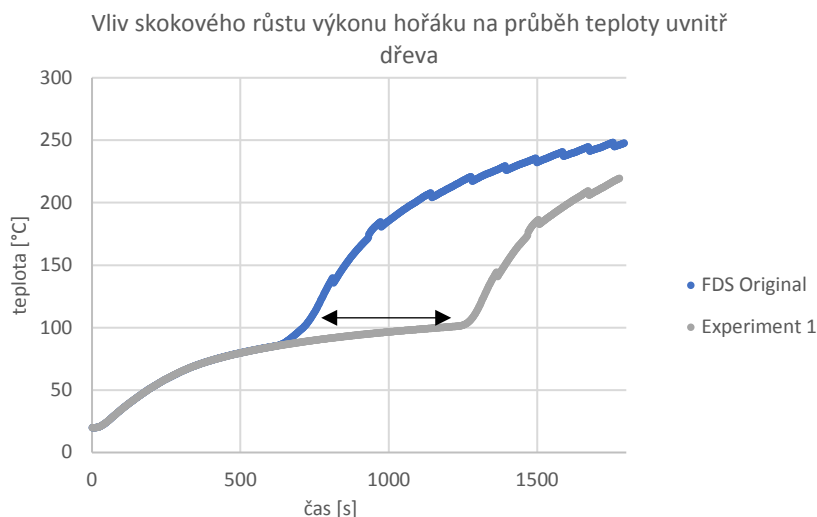
Důležitým výstupem pro tuto práci je teplota uvnitř dřeva. V programu FDS je tato veličina definována jako INSIDE WALL TEMPERATURE a je určena hloubkou a orientací měření. Může být měřena i mimo hranici výpočetních buněk. To znamená, že hloubka měření může být menší než velikost výpočetní buňky, tj. 50 mm. Následující studie uvádí výsledné teploty dřeva v hloubce 5 mm. Teplota je vždy měřena na sloupu 1 ve výšce 2020 mm na straně vystavené požáru. Modelovaný termočlánek je označen TC 11. Průběh teplot ve dřevě je srovnáván mezi jednotlivými variantami a je sledován vliv výkonu hořáku na daný průběh. Současně jsou na grafech pozorovány vlivy okolního prostředí a fyzikální principy požáru. Pro porovnání je použit termočlánek TC 11, jelikož jako jediný vykazoval výraznější změnu (vzrůst) teplot.



Obrázek 8-3 Teploty dřeva v hloubce 5 mm (všechny modely)

Jak ukazuje Obrázek 8-3, teploty ve dřevě v hloubce 5 mm jsou značně ovlivněny výkonem hořáku. Nejedná se o maximální výkon hořáku. Maximální výkon hořáku je u všech variant modelu stejný. Zásadní je průběh výkonu hořáku během výpočtu. Vliv má také doba trvání maximálního výkonu. Níže jsou uvedena srovnání jednotlivých variant a průběhů teplot dřeva v hloubce 5 mm.

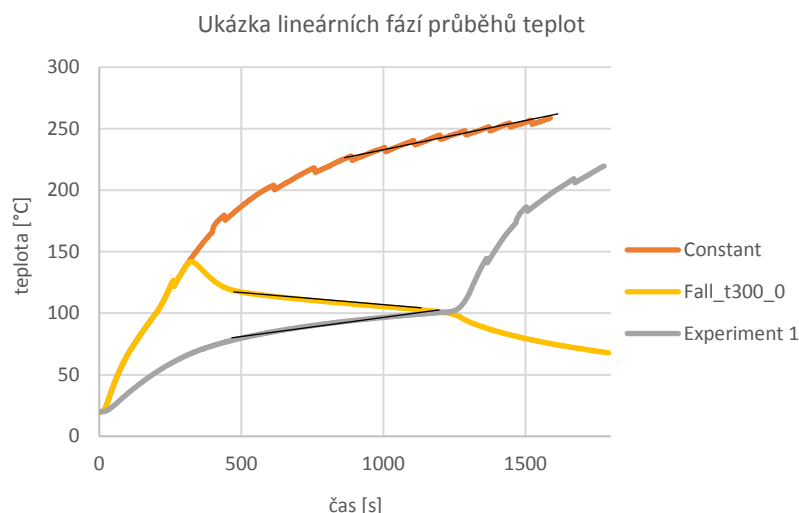
Obrázek 8-4 demonstruje teploty ve dřevě dvou podobných modelů, FDS Original a modelu Experiment 1. Jedná se o modely požárů s rostoucí fází. Rostoucí fáze je způsobena růstem výkonu hořáku. Skokový růst výkonu hořáku je na teplotách uvnitř dřeva vidět jako pozvolnější přechod. Tento jev je způsoben přestupem tepla do dřeva a prouděním kolem sloupu. Stále lze rozeznat časové posunutí 10 minut mezi šedou a modrou křivkou (časový rozdíl navýšení výkonu).



Obrázek 8-4 Teplota dřeva v hloubce 5 mm (model FDS Original a Experiment 1)

Obrázek 8-4 a Obrázek 8-5 ukazují důležitost samotné hodnoty aktuálního výkonu a vlivu ochlazení okolí. V případě konstantních 100 kW (šedá křivka) je v čase 500 s nárůst teplot viditelně zpomalen. Důvodem může být menší vliv hořáku oproti okolním faktorům. Dochází k postupnému tvoření rovnováhy s okolním prostředím. Současně okolo 100 °C dochází k odpařování vody ze dřeva, tudíž energie je místo ohřívání dřeva spotřebována na vypařování. Teploty tak narůstají pomaleji nebo nerostou vůbec. Tento jev je možné pozorovat i u modré křivky (Obrázek 8-4), kde je vlivem odpařování při 100 °C pozorován oblejší zlom během nárůstu výkonu, než je tomu u šedé křivky.

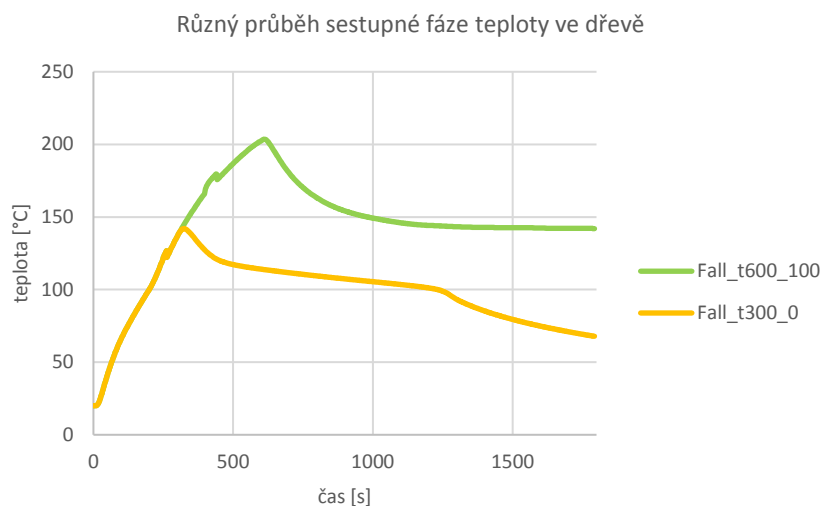
V případě výkonu konstantních 300 kW Constant, který je zobrazován oranžovou křivkou (Obrázek 8-5), nedochází k žádnému významnému zpomalování růstu teplot. Je otázka, v jaký čas a zda by k ustálení došlo. Je zde viditelná přeměna růstu teplot v lineární závislost na čase. Závěrem může být, že lineární funkce teploty nastává po delším trvání konstantního výkonu hořáku. U šedé křivky nastává v čase 500 s a u oranžové přibližně od času 1000 s. U oranžové křivky je vidět větší sklon lineární funkce, pravděpodobně vlivem větší hodnoty výkonu.



Obrázek 8-5 Teplota dřeva v hloubce 5 mm (model Experiment 1, Constant a Fall_t300_0)

Obrázek 8-5 také ukazuje teplotu uvnitř dřeva v modelu s klesající fází Fall_t300_0 (žlutá křivka). Po poklesu výkonu (čas 300 s) je viditelný prudký sestup teplot ve dřevě asi po dobu 100 s. Následně je sestup zpomalen. Tento jev je srovnatelný se zpomalením ohřívání na šedé křivce (Experiment 1). Je pravděpodobné, že u obou modelů se v tuto dobu ze dřeva odpařuje chemicky vázaná voda. K tomuto jevu dochází okolo teploty 100 °C. Na ose 100 °C se obě křivky sejdou. Pak dochází k dalšímu ochlazení (u šedé křivky ohřátí) podle aktuálního výkonu hořáku. Po odpaření vody žlutá křivka výrazně poklesne, přestože nedochází k žádné změně výkonu.

Obrázek 8-6 srovnává dva modely, konkrétně dva modely s klesající fází. Klesající fáze je modelována pomocí primárně vysokého výkonu a následného snížení výkonu na nulu nebo na 1/3 výkonu. Na teplotách ve dřevě je sledován rozdíl chování. Výkon hořáku je u modelu Fall_t300_0 snížen již v čase 300 s, brzy poté v čase 324 s klesají i teploty ve dřevě. Naopak v modelu Fall_t600_100 klesá výkon z 300 kW na 100 kW až v čase 600 s na. Průběh teplot kopíruje křivku modelu Constant (Obrázek 8-3). K poklesu teplot dřeva modelu Fall_t600_100 dojde v čase 612 s.



Obrázek 8-6 Teplota dřeva v hloubce 5 mm (model Fall_t600_100 a Fall_t300_0)

Dále můžeme sledovat různý průběh chladnutí dřeva. Hodnota, o který výkon poklesne v daný okamžik, má vliv na tvar křivky chladnutí. Pokles výkonu o 200 kW (Fall_t600_100) způsobí ve dřevě v hloubce 5 mm pokles teploty cca 60 °C během 900 s. Pokles výkonu o celých 300 kW (Fall_t300_0) na hodnotu 0 kW způsobí, že teplota ve dřevě nakonec poklesne až na rovnovážných 20 °C. Pokles však bude zdoluhavý a neporovnatelný s Fall_t600_100, jelikož je třeba vzít v úvahu dobu ovlivněnou vypařováním. Vypařování vody je proces, který zpomalí změnu teploty nastane okolo teploty 100 °C. V případě Fall_t300_0 vypařování ovlivňuje pokles po dobu minimálně 700 s a během toho teplota poklesne pouze o 20 °C.

8.3.3 Zuhelnatění dřeva

Hlavním záměrem práce je zkoumání vlivu parametrů na zuhelnatění dřeva. V tomto případě se jedná o zkoumání jednoho parametru – výkonu hořáku. Vliv je následně studován na teplotách. Výstupem FDS modelů nejsou hloubky zuhelnatění, nýbrž teploty uvnitř dřeva. Původním záměrem bylo mapovat teploty ve dřevě a na jejich základě určit polohu izotermy 300 °C. Ani v jednom z navržených modelů není této nebo vyšší teploty uvnitř dřeva dosaženo.

Výsledky z experimentu a fotografického měření zuhelnatělé vrstvy se s tímto závěrem neshodují. Pokud se podíváme do kapitoly 5.4.3, je zjevné, že docházelo ke zuhelnatění a skutečná (výsledná) hloubka zuhelnatělé vrstvy dosahovala hodnot větších než 5 mm. V některých řezech sloupu byla hloubka zuhelnatění větší než 15 mm. Tudíž by dle předpokladu mělo být v hloubce větší 5 mm dosaženo vyšších teplot. A v hloubce 15 mm by mělo docházet k tepelné změně.

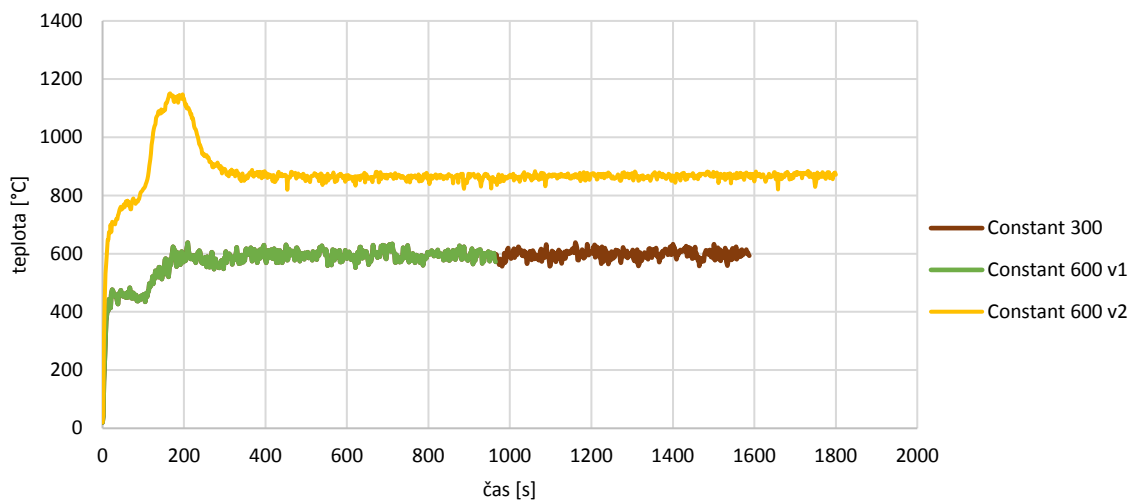
Důvody mohou být různé. V modelu naměříme nižší teploty než v experimentu. Skutečné termočlánky v experimentu v hloubce 5 mm mohou být ovlivněny degradací, tloušťka dřeva 5 mm není dostatečně krycí. Výsledné teploty uvnitř dřevěných prvků mohou být v experimentu naměřeny vyšší. Třetím možným důvodem je nesprávný předpoklad izotermy 300 °C jakožto hranice zuhelnatění. Tento fakt je vyvrácen i jiným autory, jak je uvedeno v teoretické části práce. Izoterma 300 °C by měla být užívána pro určování polohy čáry zuhelnatění pouze v normových požárech.

8.4 Parametrická studie maximálního výkonu

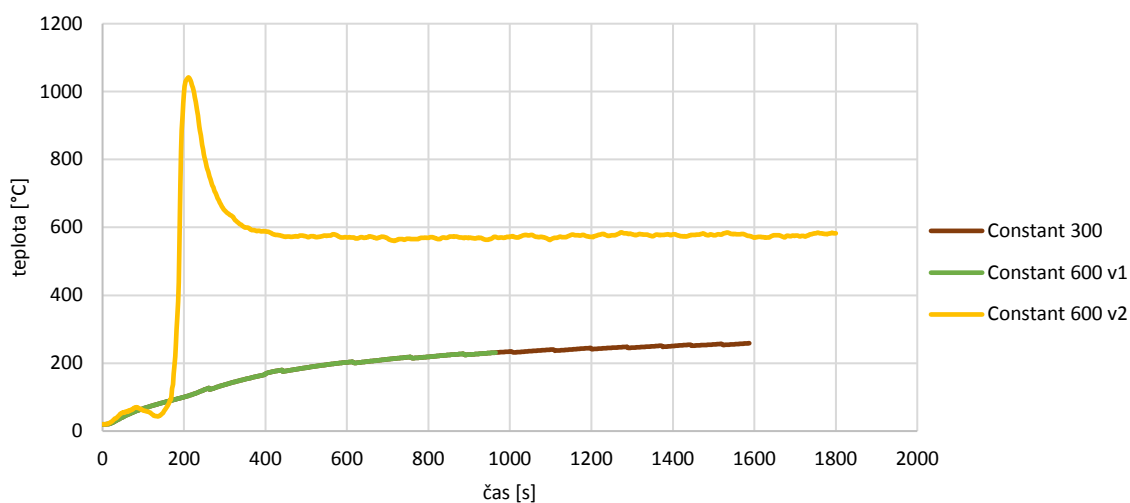
Abychom mohli získat větší teploty a informace o chování dřeva za vyšších teplot, je provedena studie maximálního výkonu. Původně zvolený maximální výkon 300 kW je navýšen na 600 a 1200 kW. Tento výkon je v RCT peci ve skutečnosti nereálný. Jde pouze o analýzu numerického modelu za cílem získání vyšších teplot.

Výchozí je model Constant o konstantním výkonu 300 kW. Druhým modelem je Constant 600 v1. Je vytvořen pozměněním hodnoty HRRPUA. V FDS je hodnota HRRPUA navýšena na dvojnásobek. Dále je vytvořena varianta Constant 600 v2. Maximální výkon je změněn pomocí funkce výkonu RAMP_Q, která je definována v závislosti na čase. Hodnota HRRPUA není měněna. Níže jsou vidět výsledné teploty. Teploty pochází ze stejných termočlánků jako v předchozí studii.

Porovnání modelů s různým nastavením maximálního výkonu

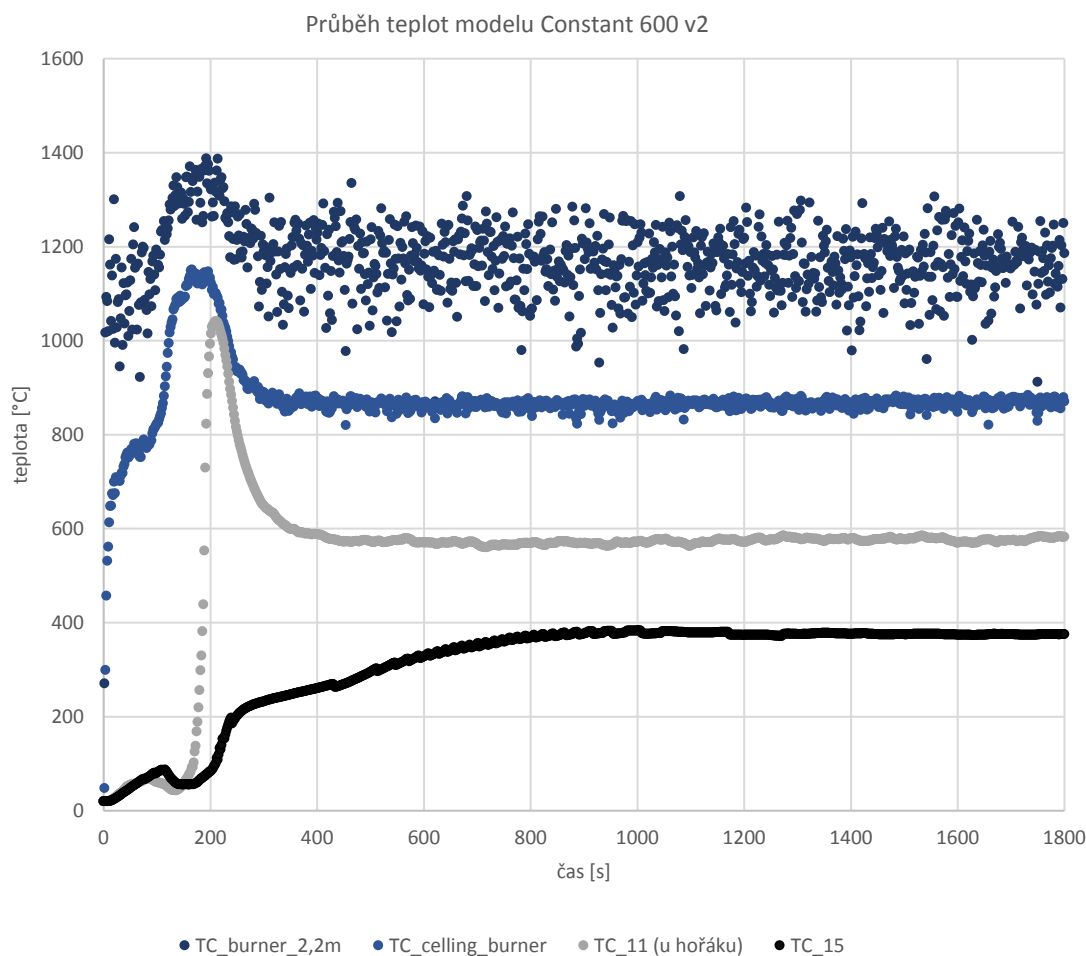
**Obrázek 8-7** Teplota stropu nad hořákem (model Constant 300, 600 v1 a v2)

Porovnání modelů s různým nastavením maximálního výkonu

**Obrázek 8-8** Teplota dřeva v hloubce 5 mm (model Constant 300, 600 v1 a v2)

Z obrázků můžeme vidět, že varianta Constant 600 v1 se od Constant 300 neliší. Jedná se o nevhodný způsob změny maximálního výkonu. Přestože je výkon navýšen, nejsou tomu uzpůsobeny jiné veličiny, jako je množství kyslíku. Nemůže být dosaženo vyšších teplot.

Naopak varianta Constant 600 v2 se zdá jako vhodný způsob naprogramování vyššího výkonu. Teploty na stropě v čase 180-200 s dosahují téměř dvojnásobných hodnot oproti Constant 300. Na obou průbězích je znát prvotní růst teplot s typickým „zubem“ a následné ustálení teplot. U modelu Constant 600 v2 na rozdíl od Constant 300 k poklesu z maximálních teplot.

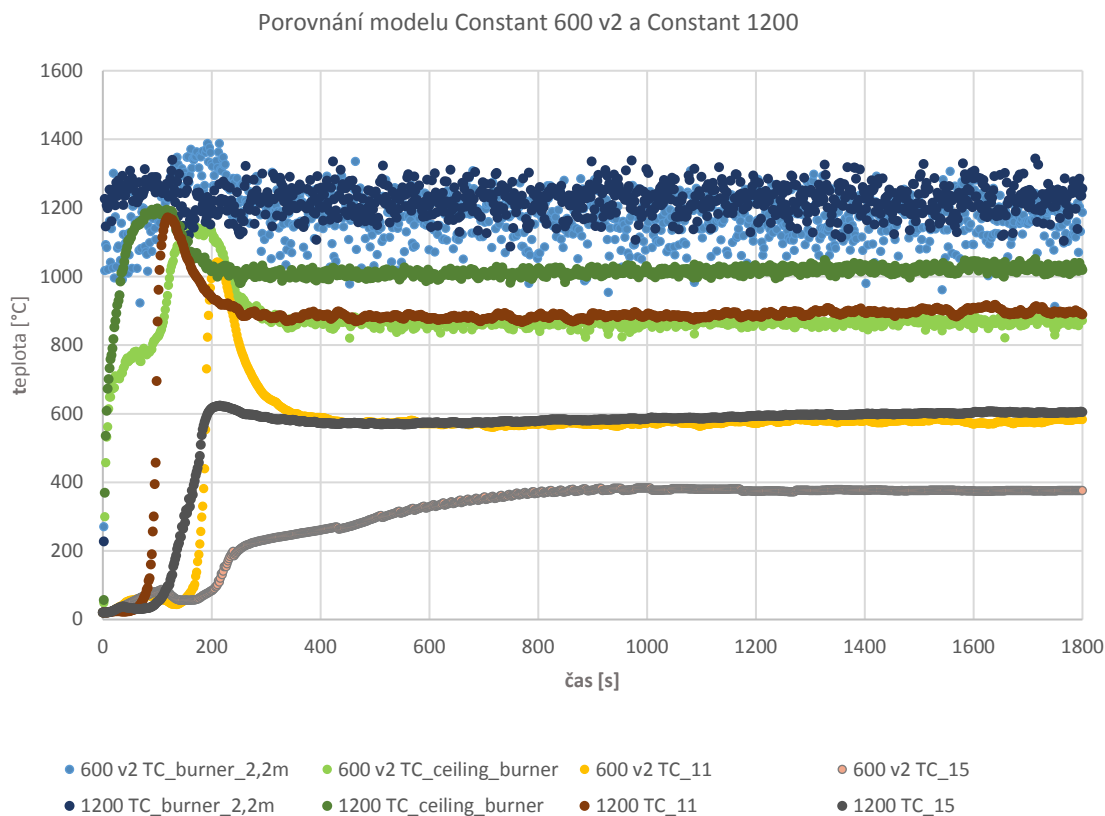


Obrázek 8-9 Teplota plynu a stropu nad hořákem, teplota dřeva v hloubce 5 a 15 mm (Constant 600 v2)

Model Constant 600 v2 je podroben analýze. Obrázek 8-9 představuje teploty naměřené na 4 termočláncích (2 termočlánci v peci, 2 termočlánci ve dřevě). Termočlánek TC_burner_2,2 m poskytuje informace o teplotách vznikajících ve výšce 2,2 m nad hořákem. Termočlánek TC_ceilng_burner prezentuje teploty stropu nad hořákem, tj. ve výšce 2,4 m. Další dva termočlánci jsou umístěné ve sloupu 1, konkrétně v hloubce 5 mm. Rozdílem je jejich umístění vůči hořáku. TC_11 je na straně blíže k hořáku a TC_15 se nachází na straně odvrácené.

Unikátní je vývoj teplot na termočlánci TC_15. U předchozích FDS modelů není na termočlánci TC_15 vidět významný růst teplot. Tento model má všeobecně vyšší hodnoty teplot. Názorně ukazuje rozdíl mezi vývojem teplot v termočlánci TC_11 a termočlánci TC_15, tedy na straně exponované a na straně neexponované požáru. Je zde vidět vzájemné posunutí propadu teplot v prvních 200 sekundách. V obou případech se teploty blíží 100 °C. Následně vlivem zpomalení růstu teplot okolních plynů (viditelné též na teplotách stropu) a současného vypařování vody ze dřeva dochází k poklesu teploty.

Pro úplnost je proveden výpočet modelu s čtyřnásobným konstantním výkonem 1200 kW. Model Constant v2 dosahuje sám o sobě vysokých teplot. Nový model Constant 1200 nemůže dosáhnout o tolik vyšších teplot oproti u modelu Constant v2. Pravděpodobně je znovu dosažena kapacita pro RCT pec. Teploty jsou již dost vysoké, dochází k flashoveru. Výkon 1200 kW je už tak obrovský, že toto srovnání slouží spíše k pochopení funkcionalit v modelu než zkoumání reálných požárů. Přesto lze na srovnání níže vypořadovat mnoho již zmíněných jevů.

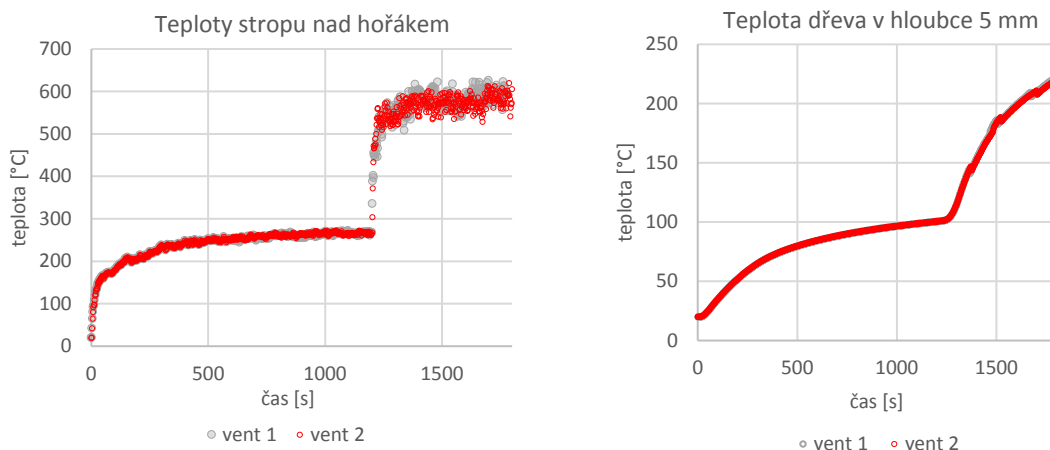


Obrázek 8-10 Teplota plynu a stropu nad hořákem, teplota dřeva v hloubce 5 a 15 mm (Constant 600 v2 a 1200)

8.5 Parametrická studie nastavení ventilace

Součástí práce je drobná analýza parametru ventilace (odtahu). Je provedena na modelu Experiment 1. Parametr je na modelu zkoumán za účelem srovnání se skutečným experimentem 1. Skutečné experimenty 1 a 2 se liší právě nejen výkonem, ale také nastavením ventilace. Více o experimentech v kapitole 5.1.

Jsou uvažovány 2 varianty ventilátoru. V první variantě je po celou dobu ventilátor nastaven na 30 %, stejně jako u ostatních modelů (Constant, atd.). V druhé variantě je primárně nastaven odtaž na 30 % a v 20. minutě se zvýší na 60 %. Druhá varianta odpovídá reálnému nastavení odtaž při experimentu č. 1. Výkon hořáku je nastaven na 100 kW po dobu 20 minut a následně skokově zvýšen na 300 kW (Obrázek 8-1). Tato studie je provedena za účelem následného porovnání s reálným experimentem č. 1.



a) Porovnání teplot nad hořákem

b) Porovnání teplot uvnitř dřeva

Obrázek 8-11 Porovnání teplot z modelu Experiment 1 při dvou variantách ventilace

Obrázek 8-11 ukazuje srovnání výstupů teplot první a druhé varianty (vent 1 a vent 2) modelu. Vypočtené teploty nad hořákem, i ve dřevě, jsou u obou variant téměř stejné. Pro získání větších rozdílů je žádoucí zvětšit či zmenšit samotný odtahový otvor nebo změnit maximální průtok vzduchu. Změna nastavení ventilátoru o 30 % nemá na vývoj teploty za požáru téměř žádný vliv.

9 Závěr

Parametrické studie ukazují evidentní vliv výkonu na teploty ve dřevě. Z provedených studií a analýz je zjevné, že zkoumaný parametr, tj. výkon hořáku, má podstatný vliv na rozvoj teplot v peci i v dřevěných prvcích. Jedná se o dílčí faktory – průběh výkonu v čase, o změnu výkonu, trvání a velikost maximálního výkonu.

Je ale mnoho dalších vlivů, které nelze zanedbat. Například odpařování. To souvisí s vlastnostmi dřeva, vlhkostí apod. Dále můžeme z grafů vidět, že dřevo má určitou tepelnou setrvačnost. Tepelná setrvačnost je určována tepelnými vlastnostmi materiálu. Dřevo na základě setrvačnosti reaguje rychle nebo pomalu na okolní teplotní změny způsobené například změnou výkonu. Tepelné vlastnosti sice známe, avšak jsou opravdu aplikovatelné pro tento model? Více o aplikovatelnosti tepelných vlastností dřeva numerických v modelech v teoretické části práce.

Mnoho bylo také řečeno o kinetických součinitelích. Kinetické součinitele mají přímý vliv na teploty a vystavení dřeva dalšímu tepelnému zatížení. Jak je již zmíněno, v numerickém modelu může mít jejich volba zásadní vliv na výsledné teploty.

Na základě předchozích odstavců můžeme říct, že vliv na výsledné teploty v peci má mnoho faktorů. I když zkoumáme jeden faktor, v tomto případě výkon hořáku, nemůžeme zanedbat ostatní faktory. Zejména pokud souvisí s chováním dřeva (pyrolýza a odpařování). Přestože se jedná o studie jednoho parametru, nelze zaručit, že se ostatní parametry nezmění. Například, pokud měníme výkon, změní se okolní teploty. V tu chvíli se může ze dřeva začít uvolňovat energie nebo naopak je spotřebována, podle toho, v jakém teplotním rozmezí se dřevo nachází. A to se stane pouhou změnou výkonu. Pokud se navíc podíváme do reality, požáry nejsou řízeny výkonem, ale požárním zatížením v prostoru, výhřevností hořícího materiálu, aktivitou zdroje při požáru apod. Tyto studie jsou teprve na počátku a zkoumání vlivu výkonu požáru je do budoucna třeba přibližovat realitě.

Pokud zkoumáme faktory a jejich vliv na zuhelnatění dřeva, numerické modelování není dostačující. Model by musel přesně předvídat teploty ve dřevě, což vzhledem k nahodilosti jevů během požárů je téměř nemožné. Musíme spoléhat na předpoklad, že hloubka zuhelnatění je určována izotermou. Nejlépe hloubku zuhelnatění získáme z experimentů.

Cílem této diplomové práce je rozšířit poznatky o chování dřeva za požáru. Problematika dřeva je komplexní, a i v předchozích kapitolách narážíme na mnoho nejistot ohledně jeho chování. Znalost chování dřeva je pro tvorbu numerických modelů nezbytná. Zároveň je třeba uvažovat nad způsobem zjednodušení vstupních hodnot do modelů.

Diplomová práce poskytuje pohled, jak lze při numerickém modelování uvažovat. Může být užitečná pro navazující práce či pro další uživatele FDS. Představuje způsoby zamyšlení a analýzy, které přestože se týkají průběhů teplot v peci a ve dřevě, jsou prováděny s cílem co nejlépe poznat fungování a principy zuhelnatění dřeva.

Literatura

- [1] HOPKIN, Danny, Joachim SCHMID a KATHINKA LEIKANGER FRIQUIN. TIMBER STRUCTURES SUBJECT TO NON-STANDARD FIRE EXPOSURE – ADVANCES & CHALLENGES [online]. 2016 [vid. 2022-05-12]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.22877.82406
- [2] *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*
- [3] CACHIM, Paulo B. a Jean-Marc FRANSEN. Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. *Fire and Materials* [online]. 2009, **33**(3), 129–143. ISSN 03080501, 10991018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.985
- [4] HOPKIN, D.J., J. EL-RIMAWI, V. SILBERSCHMIDT a T. LENNON. An effective thermal property framework for softwood in parametric design fires: Comparison of the Eurocode 5 parametric charring approach and advanced calculation models. *Construction and Building Materials* [online]. 2011, **25**(5), 2584–2595. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.002
- [5] *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*
- [6] INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. *Fire-resistance tests – elements of building construction – part 1: general requirements*. 1999
- [7] WOLFENDEN, A, Tz HARMATHY, Ma SULTAN a Jw MACLAURIN. Comparison of Severity of Exposure in ASTM E 119 and ISO 834 Fire Resistance Tests. *Journal of Testing and Evaluation* [online]. 1987, **15**(6), 371. ISSN 00903973. Dostupné z: doi:10.1520/JTE11036J
- [8] FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. Madison: United States Department of Agriculture, 2010.
- [9] BUCHANAN, Andrew H. a Anthony K. ABU. *Structural Design for Fire Safety* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2016 [vid. 2022-05-20]. ISBN 978-1-118-70040-2. Dostupné z: doi:10.1002/9781118700402
- [10] LIZHONG, Yang, Zhou YUPENG, Wang YAFEI a Guo ZAIFU. Predicting charring rate of woods exposed to time-increasing and constant heat fluxes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2008, **81**(1), 1–6. ISSN 01652370. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaap.2007.06.006
- [11] ZUZANA KAMENICKÁ a JAROSLAV SANDANUS. Methods for determining the charring rate of timber and their mutual comparison. *Wood Research*. 2018, **2018**(63(4)), 8 stránek. ISSN 1336-4561.
- [12] PEČENKO, Robert a Tomáš HOZJAN. A novel approach to determine charring of wood in natural fire implemented in a coupled heat-mass-pyrolysis model. *Holzforschung* [online]. 2021, **75**(2), 148–158. ISSN 1437-434X, 0018-3830. Dostupné z: doi:10.1515/hf-2020-0081
- [13] KÖNIG, Jürgen. Effective thermal actions and thermal properties of timber members in natural fires. *Fire and Materials* [online]. 2006, **30**(1), 51–63. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.898

-
- [14] ROBERT PEČENKO a TOMAŽ HOZJAN. Sensitivity analysis of a PyCiF model. In: . Ljubljana, Slovenia: University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia, 2021.
- [15] WADE, Colleen, Danny HOPKIN, Michael SPEARPOINT a Charles FLEISCHMANN. Calibration of a coupled post-flashover fire and pyrolysis model for determining char depth in mass timber enclosures. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Structures in Fire (SiF2020)* [online]. Online: The University of Queensland, 2020 [vid. 2022-03-08]. ISBN 978-1-74272-343-3. Dostupné z: doi:10.14264/20b5cf6
- [16] WIESNER, Felix, Alastair BARTLETT, Siyimane MOHAINE, Fabienne ROBERT, Robert MCNAMEE, Jean-Christophe MINDEGUIA a Luke BISBY. Structural Capacity of One-Way Spanning Large-Scale Cross-Laminated Timber Slabs in Standard and Natural Fires. *Fire Technology* [online]. 2021, 57(1), 291–311. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-020-01003-y
- [17] MINDEGUIA, Jean-Christophe, Siyimane MOHAINE, Luke BISBY, Fabienne ROBERT, Robert MCNAMEE a Alastair BARTLETT. Thermo-mechanical behaviour of cross-laminated timber slabs under standard and natural fires. *Fire and Materials* [online]. 2021, 45(7), 866–884. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.2938
- [18] SCHMID, Joachim, Antonio TOTARO a Andrea FRANGI. The behaviour of timber in fire including the decay phase - charring rates, char recession and smouldering. In: *11th International Conference on Structures in Fire (SiF2020): Proceedings of the 11th International Conference on Structures in Fire (SiF2020)* [online]. Online: The University of Queensland, 2020 [vid. 2022-02-24]. ISBN 978-1-74272-343-3. Dostupné z: doi:10.14264/96c0db4
- [19] KINJO, H., T. HIRASHIMA, S. YUSA, T. HORIO a T. MATSUMOTO. Fire performance, including the cooling phase, of structural glued laminated timber beams. *Journal of Structural Fire Engineering* [online]. 2016, 7(4), 349–364. ISSN 2040-2317. Dostupné z: doi:10.1108/JSFE-12-2016-024
- [20] KATHINKA LEIKANGER FRIQUIN. *Charring rates of heavy timber structures for Fire Safety Design*. Trondheim, 2010. Thesis for degree of philosophiae doctor. Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Civil and Transport Engineering.
- [21] JOACHIM SCHMID, MICHAEL KLIPPEL, a MARTIN VIERTEL. Charring of timber - Determination of the residual virgin cross section and charring rates. In: *WCTE 2020*. 2020.
- [22] RINTA-PAAVOLA, Aleksi a Simo HOSTIKKA. A model for the pyrolysis of two Nordic structural timbers. *Fire and Materials* [online]. 2022, 46(1), 55–68. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.2947
- [23] ŠEJNA, Jakub, Kamila CÁBOVÁ, Robert PEČENKO, Tomaž HOZJAN, Marie KŘIŠŤANOVÁ, a WALD, FRANTIŠEK. VALIDATION OF A VIRTUAL ROOM CORNER FIRE TEST WITH SPRUCE MEMBERS AND THE DEVELOPMENT OF THE CHAR LAYER. In: *SiF: Proceedings of the 12th International Conference on Structures in Fire*. nedatováno.