ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

134 DPM – Diplomová práce

Hoření dřevotřískových desek

Burning of chipboard

Bc. Nikola Šťastná
vedoucí práce: Prof. Ing. František Wald, CSc.
2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šťastná Jméno: Nikola Osobní číslo: 438995

Zadávající katedra: K134 - Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Hoření dřevotřískových desek

Název diplomové práce anglicky: Burning of chipboard

Pokyny pro vypracování:
Shrnutí problematiky
Numerický experiment
Validace modelu
Verifikace na analytickém modelu
Studie citlivosti
Závěr

Seznam doporučené literatury:
Kanury AM. Flaming ignition of solid fuels. In The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edn. National Fire Protection Association: Quincy, MA, 1995.
Parker WJ. Wood materials. In Heat Release in Fires, Barbrauskas V, Grayson SJ (eds). Elsevier Applied Science: London and New York, 1992.
Drysdale DD. Chemistry and Physics of Fire. National Fire Protection Association: Quincy, MA, 1997.
Fredlund B. A Model for Heat and Mass Transfer in Timber Structures During Fire. Lund University: Lund, 1988.

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. František Wald, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 15. 9. 2020 Termín odevzdání diplomové práce: 4.1.2021

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

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

S P E C I F I K A C E Z A D Á N Í

Jméno diplomanta: Bc. Nikola Šťastná

Název diplomové práce: Hoření dřevotřískových desek

Základní část: - podíl: 100 %

Formulace úkolů:
Shrnutí problematiky
Numerický experiment
Validace modelu
Verifikace na analytickém modelu
Studie citlivosti
Závěry

Podpis vedoucího DP: ..... Datum: .....

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

2. Část: - podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

3. Část: - podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

4. Část: - podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

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

Čestně prohlašuji, že jsem diplomovou práce na téma: “Hoření dřevotřískových desek“ vypracovala samostatně pod odborným vedením Prof. Ing. Františka Walda, CSc. Pro vypracování této práce byla použita odborná literatura, která je uvedena v seznamu.
Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu
§60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne …….. ...……..

Nikola Šťastná

Poděkování
Moje velké poděkování patří panu prof. Ing. Františkovi Waldovi CSc. Nejen, že mi udělil cenné rady a dedikoval vlastní čas strávený u konzultací, ale také mi poskytl motivující vedení na cestě za druhou šancí k dokončení diplomové práce.
Děkuji panu Ing. Jakubovi Šejnovi, který mi poskytl veškeré potřebné podklady i literaturu. V neposlední řadě patří moje poděkování panu Ing. Vojtěchovi Šálkovi a kolegyni Bc. Michaele Táborské za poskytnuté informace.

Obsah

Abstrakt **II**

Abstract **II**

Seznam použitých symbolů a zkratek **III**

1 Úvod **1**

2 Současný stav poznání **4**
2.1 Zkoušení požárně technických charakteristik výrobků na bázi dřeva 5
2.2 Metodologie tvorby numerických modelů 10
2.3 Test UCEEB ČVUT ve FireLab 12

3 Cíle práce **15**

4 Modelování hoření dřevotřískových desek **16**
4.1 Virtuální model zkoušky v rohu místnosti 17
4.2 Studie citlivosti 21

5 Shrnutí **37**

6 Budoucí práce v problematice **45**

Literatura **50**

Abstrakt

Diplomová práce představuje analýzu výsledků a studii citlivosti vstupních dat validovaného virtuálního modelu zkoušky v rohu místnosti. Jednotlivé verze virtuálních modelů v práci obsahují simulaci tepelné degradace a hoření dřevotřískové desky. Správně nastavený model vzniku a rozvoje požáru dřevotřískové desky, pomáhá pomoci při predikci požární bezpečnosti použití a umístění materiálu. Práce obsahuje teoretickou a výpočtovou část rozvoje požáru. V rámci teorie je popsána experimentální zkouška hoření dřevotřískové desky z FireLabu na UCEEB ČVUT v Praze a sdílená data z experimentu budou přenesena do výpočtové části při tvorbě vstupních podmínek virtuálního modelu zkoušky v rohu místnosti. Ve virtuálním modelu stejně jako při reálné zkoušce je měřena teplota. Sdílená data z experimentu pak poslouží pro porovnání virtuálního modelu se zkouškou v rohu místnosti. Výpočtová část zahrnuje využití metod numerické optimalizace pro určení vstupních parametrů modelů a validaci modelů tepelného rozkladu a hoření a jejich aplikaci v dynamice hoření plynů výpočetním programem (FDS).

Klíčová slova
požární odolnost; pyrolýza; studie citlivosti; modelování

Abstract

The diploma thesis presents an analysis of the results and sesitivity study of input data in a validated virtual model of the room corner test. The virtual models in this work include simulation of thermal degradation and burning of chipboard. A properly set model of the room corner test and characteristics of a chipboard helps in predicting the fire safety of the usage and placement of this material. The work contains a theoretical and computational part of fire development. The theory describes the experiment with chipboard cladding from FireLab of UCEEB CTU in Prague and the shared data from the experiment are transferred to the computational part while creating the input conditions of the virtual test model in the corner of the room. In the virtual model as well as in the real test, the temperature is measured. The shared data from the experiment can then be used to compare the virtual model with the test in the room corner test. The computational part includes the use of numerical optimization methods for determining the input parameters of models and validation of thermal decomposition and combustion models and their application in the fluid dynamics of gases computer software program (FDS).

Keywords
fire resistence; pyrolysis; sensitivity study; simulation

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

c	[kJ·kg^{-1}· K^{-1}]	Měrná tepelná kapacita
A	[s^{-1}]	Pre-exponenciální faktor
E	[kJ·mol^{-1}]	Aktivační energie
t	[s]	Čas
H	[kJ·kg^{-1}]	Spalné teplo
R_d	[m·s^{-1}]	Difuzní odpor

Řecké symboly

λ	[W·m^{-2}·K^{-1}]	Součinitel tepelné vodivosti
ρ	[kg·m^{-3}]	Objemová hmotnost
θ	[^{o}C]	Teplota
δ	[s]	Součinitel difuze vodní páry
μ	[-]	Faktor difuzního odporu

Zkratky

MKP	Metoda konečných prvků
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
SMV	Smokeview
PO	Požární odolnost
HRR	Rychlost uvolňování tepla

1. Úvod

Při výstavbě budov se předpokládá požadovaná kvalita použitých stavebních prvků, aby provoz stavby odpovídal bezpečnostním požadavkům jejího užívání. Trh nabízí velký počet stavebních výrobků, které by měly splňovat určité požadavky na kvalitu. V Evropské unii se stanovily unifikované předpisy pro mezinárodní zkoušky kvality stavebních materiálů. Bezpečnost stavby při požáru závisí na uspokojivých požárních vlastnostech stavebních konstrukcí, které zajistí bezpečnou evakuaci a zásah hasicích jednotek po určitý časový interval.

Bezpečnost stavby se navrhuje ve fázi tvorby projektové dokumentace a je potřeba požární bezpečnost konstrukcí nejen správně navrhnout ale i předvídat jejich chování při požáru. Pro předpověď chování konstrukce při požáru jsou dispozici tři úrovně modelování experimentálního požáru ve zkušební peci a skutečného požáru v budovách pomocí softwaru.

Lze vymodelovat pouze průběh požáru dle normové teplotní křivky, kde se příliš nedbá na korelaci s průběhem reálného požáru. Normová křivka kopíruje průběh teplot ve fázi prostorového vzplanutí. [1]

Další stupeň modelu simuluje vstupní podmínky reálného požáru. Podrobně se definuje výkon hořáku, materiál sestavené pece a zkoušených vzorků a jejich tepelně-technické charakteristiky a měřicí zařízení (termočlánky, deskové snímače). [1]

Nejnáročnější stupeň simulace předpokládá zvyšování teploty ve fázi rozhořívání před prostorovým vzplanutím v závislosti s degradací prvku. Degradace prvku se modeluje pomocí metody konečných prvků.[1]

V dnešní době se kladou stále vyšší nároky na úsporu, rychlost, životnost, bezpečnost, ekonomii a ekologii výstavby. Vzniká spoustu druhů výrobků na bázi dřeva, které nedosáhly praktického využití ve stavebnictví. Použitelnost ve výstavbě je značně eliminována různorodostí složek v materiálu a jejich rozdílným chováním při určitém zatížení daného prvku. Z vědeckého hlediska je zajímavé sledovat chování materiálů na bázi dřeva při požáru. Když se zkoumání materiálů na bázi dřeva přesune z makroskopického hlediska do mikroskopického, můžeme pozorovat určité přednosti nebo naopak.

Požární vlastnosti o stavebním výrobku či konstrukci lze získat pomocí dohodnutých zkušebních metod stanovených předpisy pro požární klasifikaci. Zkoušky pro zjištění třídy reakce na oheň stavebních výrobků či zkoušky požární odolnosti konstrukcí se provádí ve zkušebních pecích. Výrobek či konstrukce se vystaví teplotnímu namáhání a klasifikuje se dle mezních stavů.[2]

Výrobky a způsoby jejich klasifikace v průběhu let podléhají změnám. Změny v zatřídění a velký počet výrobků způsobují vytíženost zkušeben, prodlevy a navýšení nákladů na realizaci jednotlivých požárních zkoušek v akreditovaných zkušebních laboratořích. Laboratoře s akreditací především ověřují, zkouší a prokazují požární odolnosti stavebních konstrukcí. Výrobci stavebních materiálů s požadovanou požární klasifikací výrobků se přiklánějí k vybudování vlastních zkušebních pecí. Nezávislost na termínech akreditovaných zkušebních laboratoří umožňuje výrobcům pravidelně ověřovat kvalitu výroby, frekventované testování, výzkum a technický vývoj nových produktů. Ve zkušebních pecích lze provádět zkoušky požární odolnosti konstrukcí dle různých křivek průběhu teplot při požáru.[2]

Dnešní doba informačních technologií stále vylepšuje způsoby analýzy prvků v souvislosti s úsporou financí a energií. Neustálý vývoj a aktualizace numerických programů umožňují dosáhnout podobnosti jejich výsledků s výsledky experimentálních zkoušek požární odolnosti konstrukcí.

Numerické modely se v požární problematice po 11. září, kde byla prověřena jejich ne-

postradatelnost, prosadily například ve Velké Británii, Portugalsku, Francii a Turecku.

Pro analýzu ve vědecké a technické oblasti se využívá metody konečných prvků. Metoda umožňuje počítat komplexní úlohy nesnadno řešitelné jinými analytickými postupy, neboť umožňuje řešit diferenciální rovnice. Komplikovaný model analyzovaný metodou se rozdělí na konečné množství prvků s jednoduchou geometrií, na kterých lze spočítat požadované veličiny. Výsledky na jednom prvku se pak stanou vstupem pro sousední prvky, a tak se dořeší hledané veličiny na celém modelu. Dle tohoto dělení se metoda nazývá metodou konečných prvků.[1]

V makroskopickém měřítku představuje dřevo materiál, který má složitou strukturu, a která je u každého druhu dřeva odlišná. Složitá struktura charakterizuje dřevo jako anizotropní materiál, tudíž při určitém zatížení se prvek ve dvou různých směrech struktury chová odlišně. Odlišná struktura ve dvou různých směrech ovlivňuje hodnoty tepelné vodivosti a propustnosti pro vodní páru. S propustností dřevěného prvku pro vodní páru úzce souvisí obsah vody, její skupenství uvnitř prvku.

Z mikroskopického hlediska se dřevo stává kompozitním materiálem, který je složen z chemických složek jako jsou hemicelulóza, celulóza, lignin a dalších anorganických látek včetně obsahu vody.

Druhů desek na bázi dřeva může být několik druhů a je těžké se v nich zorientovat. Při zadávání této diplomové práce se dospělo ke smyšlence názvu Hoření dřevotřískových desek. Aby nedošlo k nesrovnalostem ohledně názvu této práce, je zde lehce nastíněno, jak se v komerčních sférách nazývají výrobky na bázi dřeva. Pro diplomovou práci byl vybrán experiment, který uskutečnil UCEEB zkouškou v rohu místnosti ve FireLabu. Místnost byla částečně obložena OSB deskami. Pod zkratkou OSB se skrývají slova Oriented Strand Board. Ve volném překladu je zkratka označením pro desku z orientovaných třísek. V některých zdrojích lze najít nesprávný výraz pro komerční název OSB desky nazývající ji jako desku dřevoštěpkovou. Dřevní štěpky však mají mnohem větší rozměry a teprve z nich se vyrábí třísky na OSB desky. Třísky jsou o ideálních rozměrech 75 x 25 x 0,6 mm jsou v povrchových vrstvách orientovány rovnoběžně s delší hranou desky a je tím zároveň určen hlavní směr desky. V prostřední vrstvě jsou třísky v OSB deskách orientovány kolmo na hlavní osu. Orientací třísek je dosaženo vyšší tuhosti a pevnosti v hlavním směru desky.

V názvu použitý výraz dřevotříska tedy odpovídá zkoumané OSB desce. Mezi komerčně nazývanou OSB deskou a dřevotřískou je však rozdíl ve výrobě a složení. To pak může ovlivnit výsledné tepelně-technické charakteristiky. OSB deska se vyrábí lisováním, kde se dřevěné třísky spojují různými pojivy. Výrobci OSB desek používají různá pojiva, nejčastěji však polyuretanová. Dřevotřísková deska je deskový materiál vyrobený z dřevěných částic (dřevěných třísek, hoblin, pilin, apod.), spojených organickým pojivem pomocí tepla a tlaku. Z toho vyplývá, že OSB deska je vylepšenou verzí dřevotřísky a je i mechanicky odolnější. Pro představu tabulka na obrázku č. 1.1 obsahuje tepelně technické vlastnosti OSB desky a obyčejné dřevotřísky.

Vlastnost	objemová hustota ρ [kg · m^{-1}]	měrná tepelná kapacita c [kJ · kg^{-1}· K^{-1}]	faktor difuzního odporu μ [-]	součinitel tep. vodivosti λ [W· m^{-1}· K^{-1}]
Dřevotříska	800	1,5	12,5	0,11
OSB deska	600	1,7	150	0,1-0,13

Obrázek 1.1: Tepelně-technické vlastnosti dřevotřísky a OSB desky

V průběhu experimentální zkoušky výrobku očekávaně vzroste teplota, respektive množství uvolněného tepla z hořícího materiálu. Výhřevnost výrobku má bezprostřední vliv na prostředí v uzavřeném prostoru. Množství a rychlost uvolnění tepla materiálů značně přispívají ke zvýšení intenzity požáru. Stupeň hořlavosti materiálů se stanovuje na základě přírůstku uvolněného tepla v čase oproti kalibrační křivce, které zkoušený materiál produkuje, a to v závislosti na hustotě zkoušeného vzorku.[1]

Druhou fázi požáru charakterizuje rychlejší vzrůst teploty, šíření požáru v prostoru a výraznější tvorba kouře. Zde se sleduje propustnost dělícího prvku vůči kouři. Zkoušený materiál postupně odhořívá, čímž se v prostoru hromadí vyšší množství hořlavin a ty uvolňují teplo. V této fázi se realizují hořlavé materiály. Sledovanými požárně technickými vlastnostmi se stávají rychlost šíření ohně po povrchu hořlavého materiálu, hořlavost materiálu, celkové množství kouře, optická hustota a toxicita. Rozvoj požáru trvá v průměru deset minut a průměrné hodnoty teploty požáru dosahují 510°C, při počáteční teplotě 350°C – 370°C a konečné teplotě 650°C – 680°C.[2]

Požárně technické vlastnosti materiálů v druhé fázi se ostře sledují, jelikož dochází k intenzivnějšímu rozvoji požáru, a to ještě za přítomnosti osob, které jsou těmito jevy při reálném požáru bezprostředně ohroženy.

Výše zmíněná teorie hoření v uzavřeném prostoru výrazně ovlivní modelování experimentu zkoušky v rohu místnosti. Při experimentech se údaje s většími vzorky více přibližují podmínkám při skutečném požáru, a také se redukuje okrajový efekt hoření na hranách malých vzorků. Degradace vzorku a rozmanitý způsob transportu tepla při šíření plamene po povrchu tuhých materiálů značně komplikuje modelování procesu hoření.[2]

2. Současný stav poznání

Inženýrství požární ochrany je ve srovnání s ostatními odvětvími relativně mladou oblastí studia technické vědy. Z tohoto důvodu se neustále provádí výzkum s cílem lépe porozumět ohni a jeho chování. Tento výzkum zahrnuje velké i malé studie. Požární předpisy současných budov se spoléhají na současný výzkum, aby splňovaly doporučení na ochranu osob a majetku. Protože požární výzkum neustále probíhá, předpisy a standardy se neustále obměňují. Výzkum požárního inženýrství je zásadní pro rozvoj požární ochrany jako vědy a celkové bezpečnosti budov pro společnost. Aktuální studie zkoumá vzájemné působení dvou základních vlastností paliva při hoření. Tyto základní vlastnosti jsou rychlost uvolňování tepla z paliva a teplotní gradient na povrchu hořícího paliva. Tyto dvě veličiny lze zkoumat a klasifikovat pomocí zkoušek malého rozsahu.

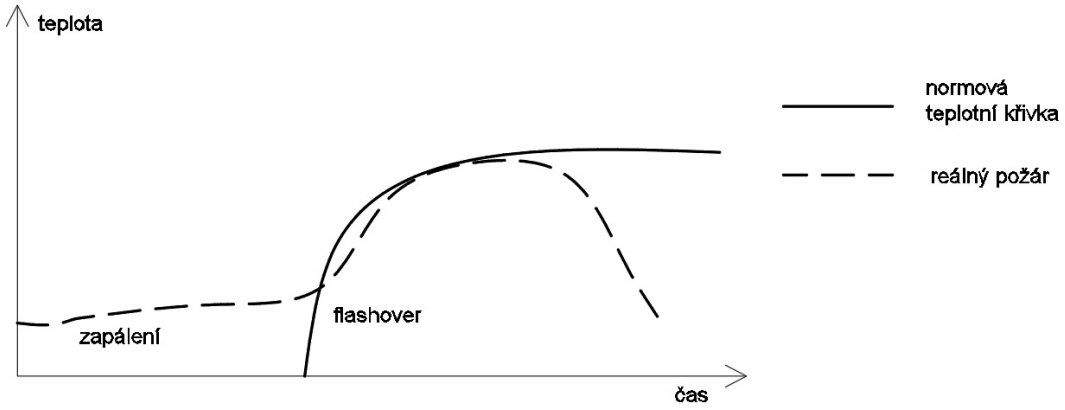
Dynamika požáru v uzavřeném prostoru

Průběh požáru v uzavřených prostorech limituje způsob uložení materiálu z hlediska přístupnosti aktivního povrchu pro procesy degradace, stupněm odizolování objektu a parametry odvětrání.

Rozhořováním malého ohniska a jeho iniciací doposud izolovaného hořícího materiálu vzniká požár. Ve stádiu stabilizace rychlosti při rozhořívání materiálu se vytvářejí podmínky pro prostorové vznícení tzv. flashover. V prostoru se nahromadí dostatečné množství hořících plynů a par vytvářejících v podstropním prostoru vrstvu, která se v určitém momentě vznítí a požár má v prostoru charakter plně rozvinutého požáru. K prostorovému vznícení dochází při teplotách 500°C až 600°C.[2] Charakteristiku přechodu rozvíjejícího se požáru do plně rozvinutého požáru udává skoková změna a plamenné hoření může v momentě vyplnit celý prostor místnosti. Rychlost hoření v této fázi požáru prudce stoupá a hořlavé materiály hoří na celém přístupném povrchu. [2]

Simulace požáru při experimentálních zkouškách prvků probíhá dle konkrétních požárních křivek (např. normová teplotní křivka). V porovnání s reálných požárem, jsou tyto předepsané křivky idealizované. Například nejvíce používaná normová křivka zanedbává prvotní průběh rozhořívání a uvolňování energie hořícího materiálu. Normová křivka představuje idealizovaný průběh požáru. Reálný požár je velmi složitý, nepředvídatelný a jeho průběh je vždy různý. Neexistuje žádná přesná matrice pro reálný požár. Nicméně normová teplotní křivka byla stanovena jako nejvhodnější reprezentace reálného požáru. Teplotní průběh znázorňuje křivka normové teplotní křivky v porovnání s reálným rozhořováním požáru na obrázku 2.1. Reálný požár znázorňuje čárkovaná křivka.

Při snaze o srovnání výsledků z experimentů dochází k nesrovnalostem ve fázi vznícení. Vznícení neboli iniciační fáze se děje náhodně. Výsledky testu se při iniciaci odlišují od údajů získaných při malorozměrových nebo velkorozměrových zkouškách, kde se při daném pokusu simuluje přítomnost rozvíjejícího se a plně rozvinutého požáru. Srovnání tvaru obou křivek na obrázku 2.1 zobrazuje podobný průběh jejich částí plně rozvinutého požáru s časovým posunem.



Obrázek 2.1: Srovnání teplotních průběhů požáru v uzavřeném prostoru. [3].

V průběhu experimentální zkoušky výrobku očekávaně vzroste teplota, respektive množství uvolněného tepla z hořícího materiálu. Výhřevnost výrobku má bezprostřední vliv na prostředí v uzavřeném (respektive polouzavřeném) prostoru. Množství a rychlost uvolnění tepla materiálů značně přispívají ke zvýšení intenzity požáru. Stupeň hořlavosti materiálů se stanovuje na základě přírůstku uvolněného tepla v čase oproti kalibrační křivce, které zkoušený materiál produkuje, a to v závislosti na hustotě zkoušeného vzorku.

Druhou fázi požáru charakterizuje rychlejší vzrůst teploty, šíření požáru v prostoru a výraznější tvorba kouře. Zde se sleduje i propustnost dělících prvků vůči kouři. Zkoušený materiál postupně odhořívá, čímž se v prostoru nahromadí vyšší množství hořlavin a ty uvolňují teplo. V této fázi se realizují hořlavé materiály.

Sledovanými požárně technickými vlastnostmi se stávají rychlost šíření ohně po povrchu hořlavých materiálů, hořlavost materiálů, celkové množství kouře, optická hustota a toxicita. Rozvoj požáru trvá v průměru deset minut a průměrné hodnoty teplot požáru dosahují 51°C, při počáteční teplotě 350°C – 370°C a konečné teplotě 650°C – 680°C. [3]

Složitost průběhu degradačních reakcí hořlavých materiálů komplikují modelovaný požár. Přesto údaje o koncentraci kyslíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a teplotě v hořícím prostoru mohou poskytnout jednoduchou charakteristiku jednotlivých fází požáru využitelných pro odhad požárního nebezpečí. Vysoká hodnota poměru oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého se projevila pouze v iniciační fázi požáru nebo při dobře odvětrávaných požárech. [2]

Požárně technické vlastnosti materiálů v druhé fázi se ostře sledují, jelikož dochází k intenzivnějšímu rozvoji požáru, a to ještě za přítomnosti osob, které jsou těmito jevy při reálném požáru bezprostředně ohroženy. [2]

2.1 Zkoušení požárně technických charakteristik výrobků na bázi dřeva

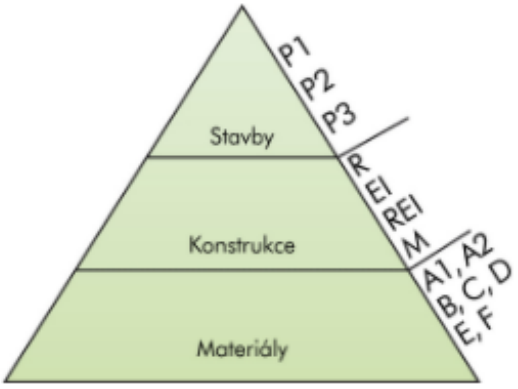
Základním předpokladem pro úspěšnou realizaci konstrukcí s bezpečnou únosností a spolehlivou použitelností je podrobná projektová dokumentace, použití materiálu s vlastnostmi odpovídajícími účelu konstrukce, kvalitní výroba konstrukčních prvků, dílců a spojů a kvalitní provedení stavby. Vady a následné poruchy mohou spočívat jak v nedokonalé projektové dokumentaci, tak v procesu výroby a montáže.

Požární bezpečnost stavebních výrobků je určovaná podle tříd. Klasifikace dle tříd Euro byla zavedena na základě Rozhodnutí Komise 2000/147/ES ze dne 8. února 2000, kterým se

provádí směrnice Rady 89/106/EHS, pokud jde o klasifikaci reakce stavebních výrobků na oheň je cílem vytvořit společnou bázi umožňující srovnávaní požárních vlastnosti stavebních materiálů. Ohňové zkoušky výrobků jsou prováděny ve shodě s harmonizovanými zkušebními metodami.[4]
Zkušební metody využívané k určování třídy požární:

- Zkušební metoda uvedená v ČSN EN ISO 1182 je zkouškou nehořlavosti stavebních materiálů.
- Zkušební metoda uvedená v ČSN EN ISO 1716 je zkouškou určující tepelný potenciál stavebních materiálů.
- Zkušební metoda uvedená v ČSN EN 13823 je zkouškou stavebních výrobků (vyjma podlahových stavebních materiálů), během které je zkoumaný termický vliv jednotlivého hořícího předmětu.
- Zkušební metoda uvedená v ČSN EN ISO 11925-2 je zkouškou pro stanovení vznětlivosti materiálů, pod vlivem přímého působení plamene – část 2: zkouška jednotného zdroje plamene.
- Zkušební metoda uvedená v ČSN EN ISO 9239-1, část 1: je zkouškou určující chování při požáru, metodou, která využívá sálavý panel.[4]

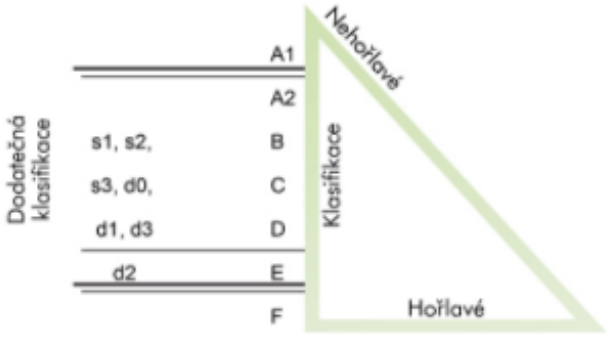
Hlavními vlastnostmi rozhodujícími o určité třídě daného produktu jsou jeho nehořlavost, vznětlivost, šíření plamene, kalorický potenciál hoření a tvorba kouře a hořících kapek. V závislosti na výsledcích zkoušek jednotlivých vlastností, je produkt zařazovaný do určité požární třídy jak je uvedeno na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Znázornění a značení klasifikace staveb, konstrukcí a materiálů[5]

Výrobky se klasifikují v souvislosti na jejich reakcích na oheň. Střechy, stěny, podlahy, stropy a také stavební systémy, včetně vzduchových kanálů a potrubí se klasifikují na základě jejich ohňové odolnosti. Systém požární klasifikace byl vypracován na základě funkcionálních požadavků. Požární vlastnosti jsou zkoumané v peci standardních rozměrů, pomocí standardizované požární teplotní křivky v závislosti na čase.[5] Zkoumané a klasifikované jsou následující vlastnosti:

- I = izolace. Doba nezbytná k tomu, aby se teplota zvedla na chladnější straně konstrukčního prvku, obvykle na 140 ^{o}C.
- E = integrita. Doba, za jakou konstrukční prvek přestane udržovat svoji integritu vůči ohni a horkým plynům v průběhu standardního požáru.
- R = únosnost. Doba, během které konstrukční prvek může vydržet zátěž během běžné fáze rozvoje požáru.
- M = mechanická funkčnost. Dovednost konstrukčního prvku odolávat mechanickým vlivům při standardním požáru.[5]



Obrázek 2.3: Třídy reakce na oheň materiálů[5]

Dřevěné konstrukce se užívají v různých podmínkách, zejména s ohledem na účel a způsob využívání objektu, jeho pozici z hlediska působení vnějších vlivů a řady dalších faktorů. Základní ustanovení týkající se zatížení, vlivů prostředí a zařazování dřevěných konstrukcí do příslušných tříd provozu jsou uvedeny v normách ČSN EN 1995-1-1: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1 (dokument používaný pro pozemní a inženýrské stavby) a norma ČSN EN 1995-2: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 2: Mosty.[6] S uvedenými standardy pro navrhování dřevěných konstrukcí souvisí soustava dalších norem, která obsahuje požadavky na vlastnosti konstrukčních materiálů, trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva, ochranu dřeva, požární odolnost dřevěných konstrukcí, provádění a kontrolu konstrukcí, případně další specifické požadavky podle typu a účelu konstrukce.[7]

Obecnou zásadou je, že dřevo respektive dílce na bázi dřeva ani konstrukční prvky nemají být vystavovány klimatickým podmínkám méně příznivějším než ty, které jsou předpokládány v dokončené konstrukci. Dřevo před použitím na stavbě má být vysušeno na vlhkost odpovídající klimatickým podmínkám v realizované konstrukci.[8] Právě tento požadavek nebývá v řadě případů dodržován a je příčinou poruch dřevěných konstrukcí. Jde zejména o výrobu, chybný postup před montáží, kdy jsou konstrukční prvky a dílce nevhodně skladovány. Konstrukce není dostatečně chráněna proti nepříznivým klimatickým vlivům. Při návrhu dřevěných konstrukcí je třeba uvažovat vliv účinků sesychání a bobtnání dřeva.[9]

- Na stavebních výrobcích provádí zejména následující zkoušky:
- Stupeň hořlavosti stavebních hmot (podle již zrušené ČSN 73 0862, která je nahrazena ZP 28/2004).
- Index šíření plamene po povrchu stavebních hmot (podle ČSN 73 0863).

- Výhřevnost hmot (podle ČSN ISO 1928 a ČSN EN ISO 1716 pro stanovení Eurotříd A1, A1fl, A2, A2fl).
- Vertikální šíření plamene po stavebních hmotách a konstrukcích (podle ISO 5658-4).
- Nehořlavost stavebních hmot (podle ČSN 73 0861, ČSN EN ISO 1182 pro stanovení Eurotříd A1, A1fl, A2, A2fl).
- Zápalnost stavebních hmot (podle ČSN EN ISO 11925-2 pro stanovení Eurotříd B, Bfl, C, C1fl, D, Dfl, E, Efl).
- Šíření plamene po podlahových krytinách při působení zdroje sálavého tepla (podle DIN 4102-14 a ČSN EN ISO 9239-1 pro stanovení Eurotříd A2fl, Bfl, Cfl, Dfl).
- Zapalitelnost čalouněného nábytku (podle ČSN EN 1026-1, ČSN EN 1026-2.
- Vznětlivost materiálů podle ČSN 64 0149.
- Body vzplanutí a hoření, teplota vznícení, stanovení třídy nebezpečnosti a skupiny vznícení podle ČSN 65 0201, ČSN 33 0371, IEC 79-4, ČSN EN 57, ČSN EN 22719, ČSN 65 6212, ČSN 65 6065, ISO 3679.[10]

Norma ČSN EN 1363-1 O základních požadavcích pro zkoušky požární odolnosti udává normativní požadavky pro určení kritérií nosností prvků. Norma říká, že cílem stanovení požární odolnosti je posoudit chování vzorku stavební konstrukce, vystaveného definovaným podmínkám ohřívání a tlaku. Metoda stanovuje způsoby kvantifikování schopnosti prvku odolat působení vysokých teplot. Jsou stanovena kritéria funkcí, pomocí nichž lze vyhodnotit nosnost, zabránění průniku ohně (celistvost) a prostup tepla (izolace).[11]

Tepelný rozklad

Pyrolýza je tepelný rozklad paliva bez přístupu oxidačního média (kyslíku, vzduchu). Vznikají pevné, kapalné a plynné produkty, jejichž vznik je ovlivněn chemickým složením paliva (biomasa, odpady) a podmínkami pyrolýzy. Pyrolytický proces je velmi důležitý, jelikož zahrnuje reakce v pevné i plynné fázi, které ovlivňují kvalitu vyrobených produktů. Palivo se vysušuje při teplotě do 200 ^{o}C, při tom dochází k odpařování vody vázané v palivu. Sušení potřebuje velké množství tepla pro zajištění optimální patnácti procentní vlhkosti paliva.[12]

V teplotním pásmu 300-500°C dochází k suché destilaci, při které dojde ke štěpení řetězců z vysokomolekulárních organických látek a přeměně na plynné a kapalné organické produkty a polokoks. Po zvýšení teploty na 500–700°C jsou produkty suché destilace dále štěpeny a transformovány z kapalných organických látek i z pevného uhlíku na plynné látky – vodík H_2, oxid uhelnatý CO, oxid uhličitý CO_2 a metan CH_4.[12]
Produkty pyrolýzy rozdělujeme podle skupenství na tuhé, kapalné a plynné.

Tuhý pyrolýzní zbytek získaný pomalou pyrolýzou se skládá z 80–85 % tuhého uhlíku (polokoks), 15–20 % prchavých látek a 0–2 % popela. Popel je závislý na obsahu popeloviny v palivu.[12]

Pyrolýzní kapalinou je myšlen pyrolýzní olej, který je dobře znám jako produkt pomalých pyrolýzních procesů. Pyrolýzní olej z biomasy je směsí tmavě hnědých, viskózních, kyselých produktů s různými vlastnostmi a může být kontaminován tuhými látkami a vodou (obsah vody 20% podle vlhkosti paliv).[12]

Plynné produkty vzniklé při rychlé pyrolýze představují přibližně 5% obsahu energie biomasy a v případě pomalé pyrolýzy 25–30%. Při teplotách nad 500°C je vyprodukováno

75–90% prchavé hořlaviny. Mezi hlavní složky (až 95%) patří oxid uhelnatý CO, oxid uhličitý CO_2, metan CH_4, vodík H_2, vodní pára H_2O.[13]

Zplyňování neboli pyrolýza je průběh několika procesů, při kterých postupně dochází k oxidaci uhlovodíků s vodní párou z hořícího výrobku biomasy de facto paliva a následně dochází k redukci na hořlavé plyny, destilační produkty a minerální zbytek.[14]
Z chemického hlediska je proces zplyňování složitý a zahrnuje mnoho kroků, mezi něž patří:

- tepelný rozklad výrobku biomasy na plyn, kondenzující páry a dřevěné uhlí tzv. pyrolýza,
- následné tepelné štěpení par na plyn a pevný uhlík,
- zplyňování pevného uhlíku vodní parou nebo oxidem uhličitým,
- částečná oxidace hořlavých plynů, vedlejších složek a pevného uhlíku.[14]

Při srovnání spalovacího procesu, kdy se chemická energie obsažena v palivu transformuje na tlakovou energii páry nebo vody, dochází při zplyňování k transformaci na jiný druh chemické energie, která se váže na plynnou fázi. Dochází k tepelné rovnováze mezi reakcemi spotřebovávajícími teplo (endotermickými) a reakcemi produkujícími teplo (exotermickými).[15]

Zplyňování využívá termochemických procesů, které se skládají z několika procesů navazujících na sebe.
Proces pyrolýzy:

- sušení paliva – ohřev paliva s odpařením vázané vody,
- pyrolýza – tepelný rozklad paliva na plynné složky, kondenzující páry, následné tepelné štěpení par na plyn a pevný uhlík,
- oxidace – částečná oxidace hořlavých plynů, složek a pevného uhlíku, pásmo oxidace se nachází v oblasti přívodu zplyňovacího média, spalovací exotermická reakce v této oblasti dodává potřebné teplo pro endotermickou reakci zplyňovacího procesu.
- redukce – zplyňování pevného uhlíku párou nebo oxidem uhličitým,Spalitelné látky ve vyráběném plynu vznikají redukcí oxidu uhličitého CO_2 na oxid uhelnatý CO (Boudouardova reakce) a vodní páry H_2O na vodík H_2 (heterogenní reakce vodního plynu). Současně může uhlík reagovat s vodíkem za vzniku metanu CH_4. Všechny tyto reakce přispívají k výrobě plynného paliva. Reakce probíhají bez přítomností kyslíku, díky tomu se teplota plynu snižuje a většina uhlíku je spálena nebo zredukována na oxid uhelnatý CO.[16]

Procesy jsou ovlivňovány zejména:

- teplotou v místnosti tudíž i výkonem hořáku,
- tlakem v místnosti,
- obsahem vlhkosti výrobku z biomasy,
- reakčním povrchem,
- dobou setrvání reakčních složek v místnosti.

[16]

Měkké dřevo hoří rychleji než dřevo tvrdé, a bývá tedy více zuhelnatělé. Starší dřevo je vysušenější, proto hoří rychleji a zuhelnatí do větší hloubky než dřevo nové. Bude-li natřeno hořlavým nátěrem nebo opatřeno hořlavou hmotou, hoří rychleji a vykazuje hlubší zuhelnatění. Jestliže je dřevo vystaveno pronikajícímu plameni nebo se nachází v místě proudícího vzduchu, zuhelnatí do větší hloubky ve srovnání s dřevěnými materiály umístěnými jinde. Vyhlazené dřevo s velkými puchýři svědčí o předchozím působení prudkého žáru. Dřevo, jehož povrch je po vypálení tmavý, svědčí o tom, že v těchto místech působil delší dobu stálý žár. [17]

Ostrá linie ohraničení bývá způsobena prudkým ohněm rozptýlené intenzity. Tento rozptýlený oheň nedovoluje prohoření a pyrolýzu dřeva. Proto bývá zuhelnatěna jen malá plocha vystavená žáru a zbývající části zůstávají nepoškozené.

Nejistota měření požární odolnosti

Výsledky zkoušky požární odolnosti mohou být ovlivněny mnoha faktory. Faktory týkající se variability vzorku včetně materiálů, výroby a instalace nesouvisí s nejistotou měření. Některé z ostatních faktorů, jako je např. různé množství tepla dodávané různými pecemi, jsou významnější než ostatní, jako je např. přesnost kalibrace systému záznamu dat.[11]

Z důvodu velké pracnosti zkoušky je mnoho faktorů, které mají vliv na výsledek a jsou závislé na obsluze. Výcvik, zkušenost a přístup obsluhy jsou tedy zásadní pro vyloučení těchto proměnných faktorů, které mohou významně ovlivnit stupeň nejistoty měření. V současné době však není možné tyto faktory kvantifikovat a proto každý pokus o stanovení nejistoty měření, který nevezme v úvahu proměnné hodnoty závislé na obsluze, má jen omezenou hodnotu.[11]

2.2 Metodologie tvorby numerických modelů

Computational Fluid Dynamics

V oblasti požární bezpečnosti lze využití CFD obecně rozdělit do tří kategorií - požární bezpečnost staveb, vyšetřování příčin vzniku požáru a věda a výzkum. V inženýrské praxi se s CFD modely požáru setkáváme nejčastěji v oblasti požární bezpečnosti staveb jako s nástrojem pro předpověď šíření kouře a tepla od zdroje hoření v budovách či částech budov. Modely jsou využívány například pro analýzu rizika vystavení osob tepelnému působení a zplodinám hoření, pro studium interakce požáru se systémy detekce a zařízeními pro odvod kouře a tepla nebo vlivu požáru na konstrukce. Nárůst počtu těchto modelů jde ruku v ruce se dvěma faktory – s větší dostupností výkonné výpočetní techniky a s celosvětovým trendem rozvoje alternativních přístupů k zajištění požární bezpečnosti. V oblasti návrhu požárně bezpečnostních řešení staveb se pracuje převážně s CFD modely, kde je zdroj hoření specifikován jako tzv. návrhový požár, tedy plocha, ze které se uvolňuje předem definované množství tepla a produkty kouře. Volba návrhového požáru je pro danou analýzu kritická a musí vycházet z posuzovaných cílů, které chceme modelem dosáhnout, a zvolených kritérií, kterými chceme dané cíle dokázat. Jde však čistě o volbu tvůrce modelu. Kromě odchylky od reality dané použitím zjednodušených modelových představ probíhajících dějů a jejich matematickou implementací do modelu, tak k celkové chybě nebo lépe řečeno nepřesnosti numerické simulace ještě výrazně přispívá to, jakým způsobem je model nastaven uživatelem a jeho inženýrská analýza vstupních údajů a požadovaných výstupů modelu.[18]

Analýzou CFD se snažíme provést rekonstrukci průběhu rozvoje požáru a studujeme příčiny, které rozvoj a šíření požáru ovlivňovaly. Schopnosti CFD požárních modelů předpovídat rozvoj požáru jsou ale stále silně omezeny. Jejich širšímu využití brání vysoká komplexita problematiky hoření týkající se plynné i pevné fáze, velký počet materiálů, které takové modely mohou zahrnovat, a fakt, že jejich vlastnosti, vzhled a chování se při vystavení tepelnému působení mohou výrazně měnit.[19]

Simulovat proces rozvoje požáru, je úkolem CFD ve většině aplikací v oblasti vyšetřování příčin vzniku požáru. Analýzou CFD se snažíme provést rekonstrukci průběhu rozvoje požáru a studujeme příčiny, které rozvoj a šíření požáru ovlivňovaly. Schopnosti CFD požárních modelů předpovídat rozvoj požáru jsou ale stále silně omezeny. Jejich širšímu využití brání vysoká komplexita problematiky hoření týkající se plynné i pevné fáze, velký počet materiálů, které takové modely mohou zahrnovat, a fakt, že jejich vlastnosti, vzhled a chování se při vystavení tepelnému působení mohou výrazně měnit.

Jádrem každého CFD kódu je soustava parciálních diferenciálních rovnic, které vyjadřují zákon zachování hmoty, energie a hybnosti v prostoru požáru a jeho okolí – tedy v tzv. výpočetní doméně. Tyto rovnice popisují, jak se spojitě mění tok tekutin (v našem případě plynu) v čase a prostoru. Tuto soustavu rovnic nejsme schopni pro většinu praktických úloh vyřešit analyticky, a získat tak přesné řešení v každém bodě domény. Proto využíváme numerických metod, abychom našli přibližné řešení v tzv. diskrétních objemech. Každý diskrétní objem odpovídá jedné buňce výpočetní sítě, která vyplňuje výpočetní doménu. Výsledkem výpočtu je informace, jak se proměnné (teplota, koncentrace zplodin, rychlost proudění atd.) mění v prostoru a v čase. V rámci jednoho kontrolního objemu jsou ale hodnoty proměnných v daném časovém kroku konstantní. Přesnost, s jakou nalezneme přibližné řešení, je určena právě velikostí kontrolních objemů, tedy velikostí výpočetní sítě. Čím přesnější řešení a tedy prostorově detailnější informaci chceme získat, tím jemnější výpočetní síť potřebujeme. S narůstajícím počtem buněk ale neúměrně narůstá výpočetní náročnost, protože soustava parciálních diferenciálních rovnic je řešena v každém kontrolním objemu sítě.[20]

Computational Fluid Dynamics neboli numerická mechanika tekutin se zabývá pohybem kapalin a plynů. CFD je interdisciplinární výzkumná oblast, která závisí na fyzice, aplikované matematice a informatice. CFD používá počítač pro cyklické řešení matematických rovnic daného problému. Hlavními komponenty CFD modelování je analytik, který stanoví příklad k řešení; vědecké znalosti vyjádřené matematicky pomocí metod nebo modelů; zdrojový kód, který obsahuje tyto znalosti a poskytuje detailní instrukce; tyto instrukce vyhodnocuje počítačový software a provádí výpočty a cyklus uzavírá opět analytik, který prověřuje a prezentuje výsledky simulace.

Systém CFD je aplikován na celou řadu výzkumných a inženýrských problémů v mnoha oborech jako jsou aerodynamika a letecké analýzy, simulace počasí, přírodní vědy a environmentální inženýrství, návrhy a analýzy průmyslových systémů, biologické inženýrství a proudění tekutin a motorů a analýza spalování.

Základem téměř všech problému řešených pomocí CFD jsou Navier-Stokesovy rovnice. Zanedbáním tření v těchto rovnicích dostaneme zjednodušené Eulerovy rovnice. Dalším zanedbáním víření se dostaneme na rovnice potenciální energie.[21]

Během preprocessingu se definuje geometrie modelu a hranice výpočtového prostoru. Objem prostoru je rozdělen do buněk. Síť buněk může být strukturovaná či nestrukturovaná, jednotná či nejednotná, může sestávat z kombinace různých prvků (primatických, pyramidálních). Definuje se fyzika modelování, například pomocí rovnic pohybu tekutin, entalpie, radiace aj. Jsou definovány mezní podmínky. To zahrnuje specifikaci chování a vlastnosti tekutin a všech ohraničujících povrchů. U přechodných problémů jsou definovány

počáteční podmínky.[21]

V další fázi se spustí simulace a rovnice jsou řešeny iterativně pro ustálený nebo přechodný stav.[21]

Nakonec se pro analýzu a vizualizaci výsledného řešení použije postprocesor.[21]

Stabilita vybraného diskriminačního řešení musí ladně řešit nespojitá řešení, tím že se v daném výpočetním prostoru nadefinují diskrétní body, které vytvoří spojité řešení. Eulerovy rovnice a Navier-Stokesovy rovnice počítají s náhlými událostmi (např. vzplanutí tekutiny) a kontaktními povrchy.[21]

Systémem CFD lze poměrně přesně předvídat chování teploty jakékoliv pece pro zkoušky požární odolnosti. Program nám umožňuje sestavit model virtuální pece a simulovat provozní podmínky. Tak lze sledovat proudění tepla v peci a vliv proudění na zkoušku požární odolnosti prvku. Simulace částečně představují riziko, jelikož mnohdy předvídáme děj, který se doposud nevalidoval experimentem ve skutečné peci. Ve většině případů se každá pec navrhne pro konkrétní aplikaci výrobce. Ke snížení rizika se začíná modelovat s ověřenými daty shromážděných ze zkoušek existujících pecí. Data se použijí ke kalibraci různorodých simulací, čímž se zajistí výsledky simulace na nejlepší úrovni a tyto výsledné hodnoty lze použít na novém modelu pece.[22]

Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) neboli Finite Element Metod (FEM) je jednou z diskretizačním metod systému CFD. Metodou se dají vypočítat deformace a rozložení napěťového pole modelovaného prvku. Umožňuje vypočítat napětí i u tvarově složitých součástí, kde klasické prostředky pružnosti a pevnosti příliš neuspějí. Metoda konečných prvků obvykle najde uplatnění v několika odvětvích fyziky. Umí například vypočítat rozložení teplotního pole, proudění kapaliny, stabilitu konstrukcí a podobně. Metoda konečných prvků umožňuje výrobek odzkoušet bez existence prototypu, a tak odhalit jeho nedostatečně dimenzovaná místa. Počítačové ověření vlastností a únosnosti výrobku šetří finanční náklady oproti opakované výrobě prototypu nebo úpravy na hotovém výrobku. Výrazné zjednodušení práce konstruktéra s programy na principu MKP umožňuje CAD program. [23]

2.3 Test UCEEB ČVUT ve FireLab

Platformou této diplomové práce se stal experiment provedený na univerzitní půdě UCEEB ve výzkumu možností požární ochrany dřevem ocelových prvků v rámci projektu GAČR. Experiment proběhl při zkoušce v rohu místnosti. Poznatky a zpráva z experimentů posloužily pro expertízu, která se stala hlavním cílem diplomové práce. Veškeré podklady pro tvorbu numerického modelu a plného pochopení experimentu byly laskavě poskytnuty od pana Ing. Jakuba Šejny.

Před uvedením zkoušky v rohu místnosti je důležité zmínit, že řešený experiment je paralelně zpracováván kolegyní Bc. Michaelou Táborskou, která provádí analýzu experimentálních dat pomocí zónového modelu v programu ANSYS.

Požární laboratoř FireLab a jeho zkušební zařízení zkouška v rohu místnosti zvané Room Corner Test, zkráceně RCT, slouží pro velkorozměrové zkoušky rozvoje požáru pro široké spektrum materiálů. RCT umožňuje predikovat náchylnost vzorků k rozvoji požáru a flashoveru ve zkušební místnosti a kvantifikaci rychlosti uvolňování tepla v čase (angl. HRR – Heat Release Rate)včetně analýzy zplodin hoření. S využitím znalosti uvolněného tepla lze stanovit třídu reakce na oheň zkoušeného vzorku. Virtuální RCT pracující na technologii

dynamického proudění tekutin – CFD (z angl. Computational Fluid Dynamics) – umožňuje po dodání nezbytných požárně-technických charakteristik sledovaného materiálu simulovat pravděpodobné chování vzorku. [24]

Jedná se o povrchové úpravy stěn a stropů či jednotlivě hořící předměty (např. fasádní a střešní systémy, nábytek). Zkoušet se může jak v uzavřené komoře, tak v otevřeném prostoru pod odsávacím zvonem, který je napojen potrubí se zařízeními pro analýzu účinků požáru a zplodin hoření, včetně toxicity. RCT odpovídá svými vlastnostmi normě ISO 9705, respektive normě ČSN EN 14390. [24]

Paralelně se zkouškami v rohu místnosti je vyvíjen virtuální model zkoušky v rohu místnosti.[24] Virtuální model RCT v diplomové práci prezentuje analýzu dřevěného obkladu z OSB desek. Analýza probíhala způsobem několika pokusů o výpočty se záměrně různými vstupními podmínky, které by mohly ovlivnit výstupní data.

Obrázek 2.4: Zkouška v rohu místnosti s obložením z OSB

Popis řešeného testu a jeho výsledky

Experiment proběhl a vznikl na základní myšlence pozorování ochrany ocelové desky 300 x 300 x 10 mm. Ocelová deska byla zaklopena OSB deskou tloušťky 22 mm. Pod OSB deskou byla instalována deska CETRIS tloušťky 10 mm. Do rohu zkušebního prostoru byl umístěn hořák. Zkušební místnost byla vyzděna z pórobetonových tvárnic YTONG. Termočlánky byly připevněny do terčového uspořádání rovnoměrně po ploše OSB desky.

Materiály pro řešenou zkoušku v rohu místnosti byly:

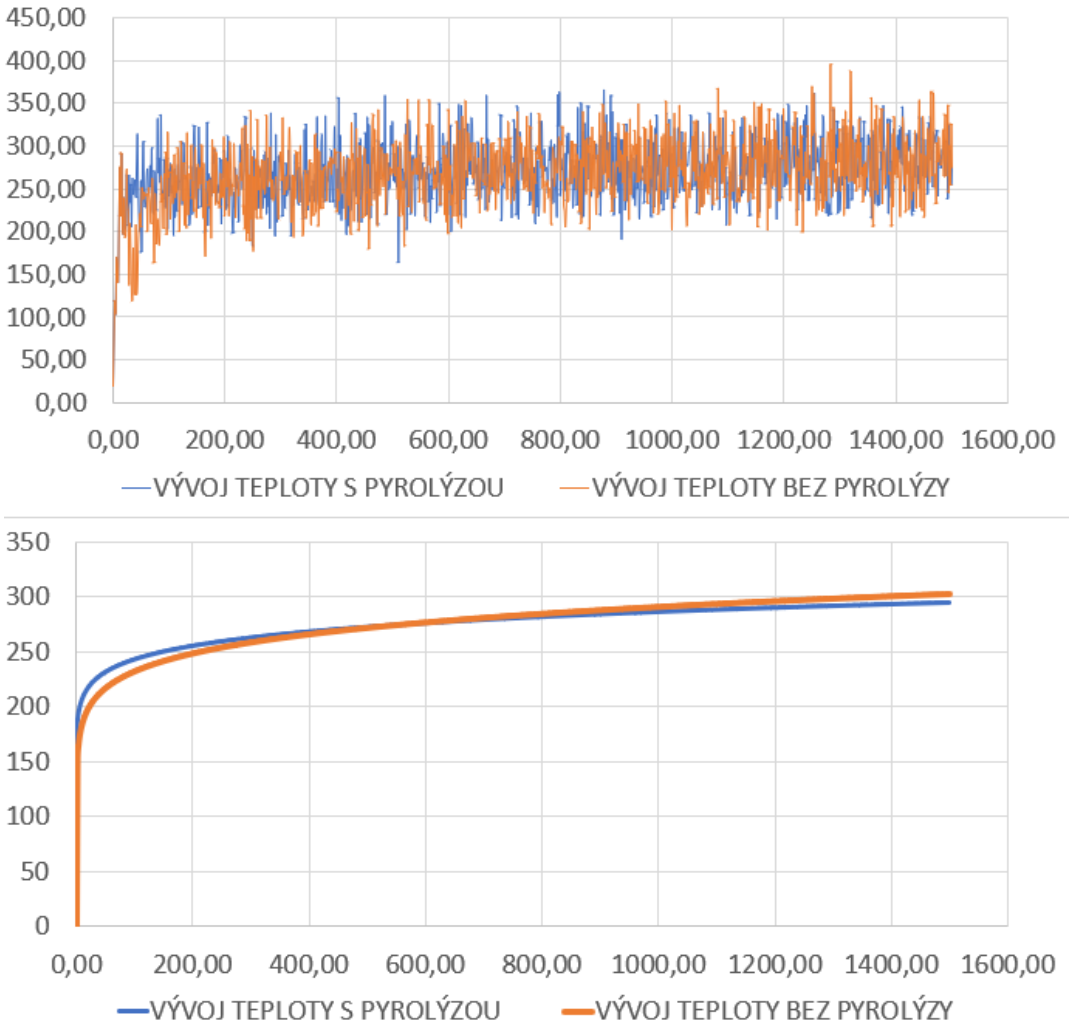
- OSB 3 Superfinish, výrobce KRONOSPAN OSB, rovná hrana, 22 x 2500 x 1250 mm
- Cementotřísková deska Cetris Basic 10 mm, výrobce CIDEM Hranice a.s.
- Termočlánky od firmy MAVIS Nový Bor s.r.o.

Tepelně technické charakteristiky budou představeny dále v kapitole představující virtuální model.

Dle zpráv z experimentů pana Ing. Jakuba Šejny bylo provedeno několik pokusů z nichž prvních pár bylo neúspěšných. Zkoušky probíhaly dle normy pro zkoušku v rohu místnosti. V průběhu zkoušek byl výkon hořáku nastaven na 30 kW a 50 kW. Pro účelu této práce byla poskytnuta data ze zkoušky v rohu místnosti s hořákem nastaveným na výkon 50 kW.

V průběhu zkoušku došlo přirozeně k odhořívání vrchní vrstvy OSB.

Hodnoty nasnímaných termočlánky pod OSB deskou byly vygenerovány do excelu. Pozorovaný prvek OSB desky byl nejvíce ohořelý 15 cm nad hořákem. Pro experiment s hořením obložení z OSB desek byl vytvořen validovaný virtuální model. Výsledky validovaného modelu zobrazuje obrázek č. 2.5.



Obrázek 2.5: Zkouška v rohu místnosti s obložením z OSB - graf průběhu rychlosti uvolňování tepla

3. Cíle práce

Hlavním cílem práce je citlivost virtuálního modelu hoření dřevotřískových desek na vstupní parametry pro predikci numerického modelu.

U dřevotřískových desek se jedná o vliv tří hlavních složek, hemicelulozy, celulozy a ligninu, u kterých se mění jejich kinetické konstanty.

Dílčím cílem je studie citlivosti velikosti sítě výpočetního prostotu na přesnost řešení. Řešení využije experimentální data z Room Corner Testu FireLab UCEEB ČVUT v Praze. Zkoušeným materiálem byla OSB deska.

Základem práce je shrnutí problematiky numerických modelů. Výpočetní modely poskytují dodatečnou důvěru ve schopnost testů na zkušebním měřítku, které mají být použity k předpovědi vlastností materiálů v testu ISO 9705. Komplexní virtuální modely vykazují potenciál v predikci realistických scénářů, které se liší od zkušební metody ISO 9705.

4. Modelování hoření dřevotřískových desek

Již je známo, že modelování spalování vícesložkových materiálů spočívá převážně k predikci rychlosti úbytku hmoty, jejímž předpokladem je přeměna hmoty do plynného stavu. Dynamické experimenty se provádí klasickou termickou analýzou, která slouží k měření a pozorování základních fyzikálních veličin měnících se v závislosti na teplotě proměnné v čase. Nejpoužívanější metodou dynamických experimentů jsou paralelní reakce, které simulují rozklad těkavých frakcí složek materiálu - pseudokomponent. Každá pseudokomponenta, jejíž těkavý podíl patří mezi parametry modelu se chová jakoby mezi nimi nedošlo k žádné interakci. V modelu bývají většinou modelovány tři pseudokomponenty - hemicelulóza, celulóza a lignin neboli třísložkový spalovací prvek. Důležitým aspektem je zadání vstupních dat pro formulaci kinetických parametrů jednotlivých složek.[25]

Třísložkový prvek s lineární nebo nelineární závislostí na koncentraci složek hemicelulózy, celulózy a lignin je k popisu dynamické termické analýzy zplyňování biomasy široce používán.[26] Tak tomu je i v této diplomové práci. Simulace procesu zplyňování nastiňuje, že se složky hemicelulóza a celulóza rozkládají nezávisle na sobě, zatímco ligninová složka se rozkládá pomalu ve velmi širokém rozmezí jak lze pozorovat na obrázku č. 4.4.

Numerické simulace založené na zjednodušených modelech zplyňování, které představují nedostatečné podmínky pro výpočet jako je hrubá výpočetní síť nebo nepřesně nastavená rychlost zahřívání jsou typickými případy počítačových termických analýz. Z tohoto důvodu se stává, že v porovnání mezi experimentálními daty a výsledky numerického modelu, dojde k teplotnímu zpoždění mezi vzorkem a blízkým okolím vzorku (obrázek č. 4.4). Příčinou je endotermicita rozkladu biomasy. Při velmi složitých výpočtech, jako je modelování zplyňování, není snadné tomuto efektu zabránit.[27]

V takovém případě lze postupovat tak, že se vytvoří několik různých virtuálních modelů, které probíhají za odlišně zadaných vstupních podmínek. Model zahrnující změnu kinetických konstant nebo tepelně technických součinitelů se ale považuje za srovnávací model velmi vzdáleně připomínající skutečnou kinetiku.[28]

Mnohem lepší způsob měření a pozorování zplyňování složek biomasy jsou modely, jejichž řešení spočívá ve zkoušení vzorku s různou rychlostí ohřevu. Samostatná analýza složek a jejich křivek v grafu, založená na analytických řešeních, obvykle vytváří sady kinetických parametrů vysoce proměnných s rychlostí ohřevu.[29] Tento výsledek lze částečně připsat nezanedbatelným účinkům transportních jevů, zejména při vyšších rychlostech ohřevu, a částečně zjednodušené metodě extrakce kinetických parametrů z měřených křivek.[30] Simultánní vyhodnocení několika termogravimetrických křivek jednotlivých složek pro různé rychlosti ohřevu ukázala, že zplyňování celulózy zůstává zhruba beze změny (například aktivační energie od 192 do 250 $kJ \cdot mol^{-1}$, které se dobře srovnají s výsledky jednotlivých křivek), ale uvádějí se vyšší aktivační energie degradace hemicelulózy (například od 154 do 200 $kJ \cdot mol^{-1}$). Pokud jde o reakci třetí pseudosložky, aktivační energie je z obou výše zmíněných křivek nejnižší (například 36 $kJ \cdot mol^{-1}$).[31] [1].

Při vysokých teplotách a při dostatečně dlouhé době setrvání vysokých teplot se aktivují sekundární reakce výparů. Sekundární reakce mění složení produktů pyrolýzy biomasy. Tyto produkty se mohou vyskytovat v pórech, zatímco procházejí primární degradací, homogenně v parní fázi a heterogenně nad zuhelnatělým povrchem. Sekundární reakce par dehtu jsou

[1] Uvedené hodnoty aktivačních energií jsou uvedené pro smrkové dřevo

klasifikovány jako homogenní a heterogenní a zahrnují procesy jako tvorba prasklin, částečná oxidace a kondenzace.[32] Složité složení dehtových produktů by vyžadovalo velké množství chemických reakcí k popisu transformací. Navzdory kvantitativnímu pochopení chemického složení dehtových produktů jsou v případě modelování těchto produktů, popisovány pouze dvě chemické reakce. Předpokládá se, že reaktivní těkavé látky vedou k tvorbě permanentních plynů[2] a žáruvzdorného kondenzovatelného materiálu. Existence sekundární reakce je odvozena z experimentálních dat výtěžků plynu, které vykazují asymptotické chování závislé na teplotě. Vyšší teploty vedou k dramatickému zvýšení asymptotických výtěžků všech produkovaných lehkých permanentních plynů. Asymptoty závislé na teplotě vyžadují existenci druhé reakce, aby bylo možné vysvětlit zmizení atomů uhlíku v plynné fázi, když je teplota plynné fáze snížena. Kinetické modely však tuto reakci obvykle zanedbávají.[34]

Kinetika sekundárních dehtových reakcí má zásadní význam při zplyňování biomasy. Množství vyrobeného dehtu a jeho složení závisí na typu zplynovače a podmínkách procesu. V zásadě lze produkční plyn s nízkým obsahem dehtu získat, pokud lze vytvořit vysokoteplotní zónu, kde jsou těkavé produkty pyrolýzy nuceny pobývat dostatečně dlouho, aby podstoupily sekundární zplyňování. Objev žáruvzdorného dehtového produktu sekundárních reakcí aktivoval výzkum v oblasti katalytické pyrolýzy pro produkty v plynné fázi. [35]

4.1 Virtuální model zkoušky v rohu místnosti

Modelování v programu FDS je umožněno prostřednictvím zdrojového kódu, do kterého jsou vepsány jednotlivé příkazy. Tato kapitola stručně popisuje obsah a rozdělení jednotlivých částí původního zdrojového kódu, který byl pro tuto práci předán jako již validovaný model RCT. Tento zdrojový kód je přiložený v práci jako Příloha č.1. Z tohoto validovaného numerického modelu se při studii citlivosti vycházelo. Model je v příloze č.1 nazván rct_50kW_burn.fds a byl vytvořen panem Ing. Jakubem Šejnou v pomocném programu Pyrosim verze 2016.1.0412.

Hlavička zdrojového kódu obsahuje název simulace a nastavení doby simulace. Virtuální model má nastavenou délku simulace na 1 500 sekund.
První část zdrojového kódu definuje výpočetní síť s počty kontrolních objemů. Principem CFD modelu je hledání přibližného řešení řídicích rovnic toku tekutin v diskrétních objemech daných výpočetní sítí. Vytvoření kvalitní výpočetní sítě je tedy základním předpokladem pro vytvoření kvalitní CFD simulace. Podle aplikace, složitosti geometrie a samozřejmě možností numerického řešiče daného výpočetního softwaru, jsou výpočetní sítě obecně tvořeny různými druhy mnohostěnů, nejčastěji šestistěny, pětistěny a čtyřstěny. V rámci jedné sítě mohou být buňky stejných nebo různých typů, ale také různých velikostí. S tím, jaké prvky může síť obsahovat, souvisí také to, jak geometricky složité výpočetní geometrie můžeme vytvářet. V každém CFD řešiči musí všechny objekty tzv. sedět na síť – musí se volit takové rozměry, aby hrany objektů odpovídaly hranám jednotlivých výpočetních buněk. Řešiče, které pracují pouze s buňkami ve tvaru kvádru, nedovolují vytvářet zakřivené a jinak geometricky složité předměty. Jsou z tohoto hlediska uživatelsky méně přívětivé. Přesto je síť tvořena pouze z kvádrů jedinou možnou sítí v praxi nejběžněji využívaném požárním CFD softwaru FDS. Software FDS používá pro numerické řešení parciálních diferenciálních rovnic tzv. metodu sítí, která je velmi robustní, ale vyžaduje právě pravidelnou síť. Druhou metodou používanou

[2]Metoda zkapalňování plynů pomocí změn teplot a tlaku selhala u vodíku, kyslíku, dusíku a oxidu uhelnatého, čímž byly prohlášeny za nezkapalnitelné - tzv. permanentní plyny. K rozřešení tohoto problému přispělo zjištění T. Andrewse (1869), že pro každý plyn existuje tzv. kritická teplota, nad níž nelze plyn zkapalnit při sebevětším tlaku.[33]

ve valné většině CFD řešičů je metoda konečných objemů.

Existují korelace, které vztahují charakteristickou velikost požáru k velikosti buňky výpočetní sítě tak, aby byl požár dostatečně dobře z hlediska prostorového měřítka numericky aproximován. Tyto korelace je ale třeba brát jako doporučení, jakýsi počáteční odhad, protože jsou odvozeny z empirických vztahů platných pro omezený rozsah podmínek. Neexistuje univerzální pravidlo pro volbu velikosti buňky sítě. Vždy je nutné provést studii citlivosti sítě neboli zda velikost sítě ovlivňuje proměnné, podle kterých se model posuzuje. Pokud se vybraná kritéria budou výrazně lišit, nelze toto řešení považovat za řešení reprezentující danou modelovou situaci a je nezbytné zvýšit rozlišení výpočetní sítě.

Druhá část zdrojového kódu obsahuje definice použitých materiálů pro konstrukci. U materiálu jsou definované tepelně technické vlastnosti. Definování konstrukcí spočívá v nastavením použitého materiálu, reálné tloušťky konstrukce a barevnosti pro zobrazení v SMV. Jsou zde nastaveny stěny, strop, podlaha a odtah pece.

Specifikace materiálu zdí pece a jeho tepelně-technické charakteristiky. Specific heat je měrná tepelná kapacita, která má v programu FDS jednotku $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Conductivity je součinitel tepelné vodivosti s jednotkou $W \cdot m^{-1} K^{-1}$. Density je objemová hustota v $kg \cdot m^{-3}$.

```
MATL ID='POROBETON',
    SPECIFIC_HEAT=1.0,
    CONDUCTIVITY=0.137,
    DENSITY=500.0/
```

Specifikace materiálu ocelové destičky pod OSB deskou. Specific heat je měrná tepelná kapacita, která má v programu FDS jednotku $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Conductivity je součinitel tepelné vodivosti s jednotkou $W \cdot m^{-1} K^{-1}$. Density je objemová hustota v $kg \cdot m^{-3}$.

```
MATL ID='OCEL',
    SPECIFIC_HEAT=1.0,
    CONDUCTIVITY=35.0,
    DENSITY=7850.0/
```

Specifikace materiálu konstrukce pece. Specific heat je měrná tepelná kapacita, která má v programu FDS jednotku $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Conductivity je součinitel tepelné vodivosti s jednotkou $W \cdot m^{-1} K^{-1}$. Density je objemová hustota v $kg \cdot m^{-3}$.

```
MATL ID='BETON',
    SPECIFIC_HEAT=1.0,
    CONDUCTIVITY=1.4,
    DENSITY=2400.0/
```

Specifikace Cetris desky pod OSB deskou. Specific heat je měrná tepelná kapacita, která má v programu FDS jednotku $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Conductivity je součinitel tepelné vodivosti s jednotkou $W \cdot m^{-1} K^{-1}$. Density je objemová hustota v $kg \cdot m^{-3}$.

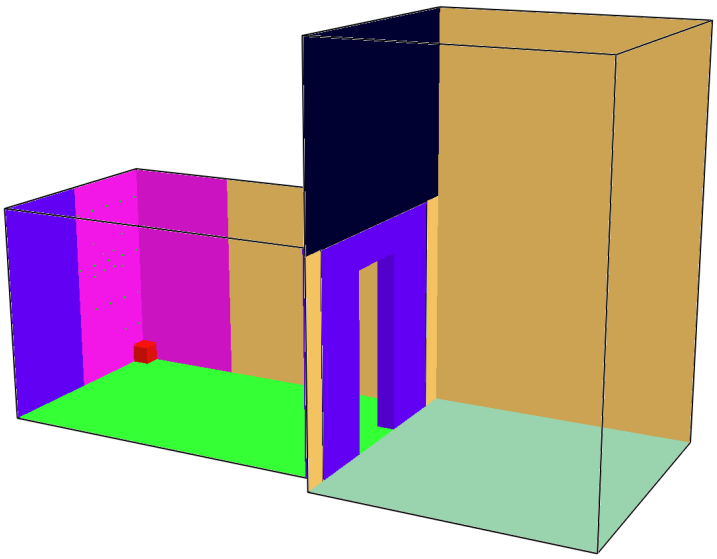
```
MATL ID='CETRIS',
    SPECIFIC_HEAT=1.0,
    CONDUCTIVITY=0.245,
    DENSITY=1350.0/
```

Třetí část zahrnuje nastavení odtahu plynu z pece.

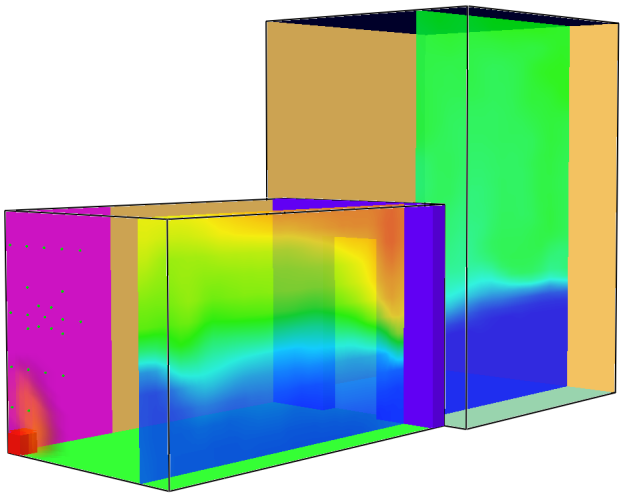
```
SURF ID='ODTAH',
    RGB=26.0,128.0,26.0,
    VOLUME_FLOW=2.0,
    RAMP_V='ODTAH_RAMP_V'/
RAMP ID='ODTAH_RAMP_V', T=0.0, F=0.0/
    RAMP ID='ODTAH_RAMP_V', T=1.0, F=0.6/
```

RAMP ID='ODTAH_RAMP_V', T=1450.0, F=0.6/
RAMP ID='ODTAH_RAMP_V', T=1500.0, F=0.0/
Čtvrtá část obsahuje nastavení reakce hoření, hořáku a křivku uvolňování energie.
REAC ID='Reaction1',
FUEL='REAC_FUEL',
FORMULA='C3H8'/
SURF ID='FIRE',
COLOR='RED',
HRRPUA=1250.0, výkon hořáku převedený na plochu ohně
RAMP_Q='FIRE_RAMP_Q',
EMISSIVITY=1.0/
RAMP ID='FIRE_RAMP_Q', T=0.0, F=1.0/
RAMP ID='FIRE_RAMP_Q', T=1200.0, F=1.0/

Poslední část zahrnuje nastavení jednotlivých termočlánků a jejich vlastností. Kromě deskových snímačů teploty jsou zde nastaveny i barevné ISO plochy pro vizualizaci teploty a zobrazení teploty v řezech přes barevná teplotní pole. Teplotu snímá 23 termočlánků.
DEVC ID='TC-05_P', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.0,1.875,1.3, ORIENTATION=0.0,1.0,0.0/
Následují obrázky vyobrazují model zkoušky v rohu místnosti ve virtuálním modelu.



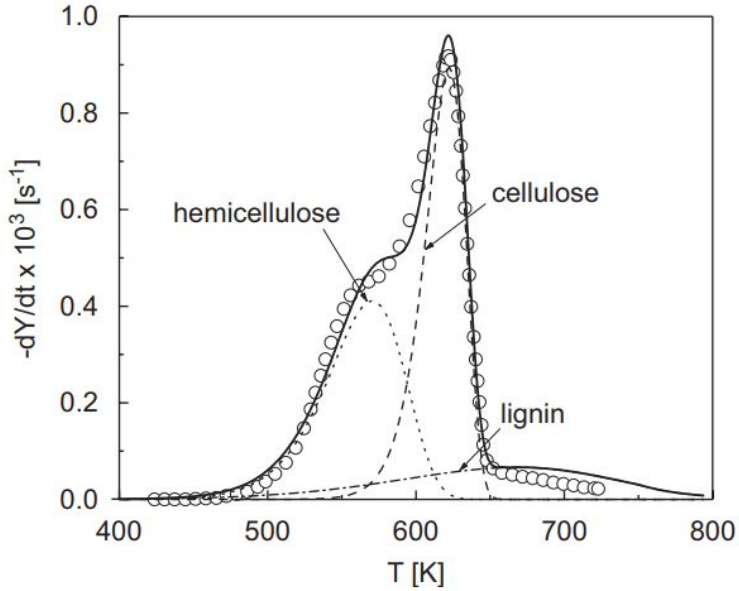
Obrázek 4.1: Model zkoušky v rohu místnosti



Obrázek 4.2: Model zkoušky v rohu místnosti s isoplochou teploty

C	Kinetic constants: A (s^{-1}), E (kJ/mol)		
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
k_1	$2.80 \times 10^{19} \exp(-242.4/RT)$	$2.10 \times 10^{16} \exp(-186.7/RT)$	$9.60 \times 10^{8} \exp(-107.6/RT)$
k_2	$3.28 \times 10^{14} \exp(-196.5/RT)$	$8.75 \times 10^{15} \exp(-202.4/RT)$	$1.50 \times 10^{9} \exp(-143.8/RT)$
k_3	$1.30 \times 10^{10} \exp(-150.5/RT)$	$2.60 \times 10^{11} \exp(-145.7/RT)$	$7.70 \times 10^{6} \exp(-111.4/RT)$
v_c	0.35	0.60	0.75

Obrázek 4.3: Tabulkové kinetické hodnoty tří hlavních složek dřeva [27]



Obrázek 4.4: Průběhy hlavních tří složek dřeva v závislosti na teplotě v čase [27]

4.2 Studie citlivosti

V této kapitole bude předmětem pozorování srovnání grafů průběhu rychlosti uvolňování tepla a průběhu teplot snímaných rozmístěnými termočlánky. Modely průběhů obou veličin byly opakovaně propočítány v každém řešeném případě, aby vyšly najevo odchylky opakovaných výpočtů. V kapitole shrnutí budou zobrazeny všechny modelu pospolu a hodnoty teplot budou porovnány. Zjistilo se, že opakovaným výpočtem každého modelu, nedošlo k výpočtu jiných hodnot v případě teplot ani rychlosti uvolňování tepla. Pro řešení byl využit program FDS verze 6.7.5, ke kterému byla připravena sada vstupních dat v příloze 1 až 8.

Vstupní výpočet byl proveden na numerickém modelu, který byl validován na experimentu. Výpočet posloužil jako odrazový můstek pro analýzu citlivosti. Následně byla v modelu s různými vstupy studován vliv na hrubší a jemnější síť.

Data z experimentu byla převedena a postupně v každé verzi numerického modelu upravena. Zkoumaným výrobkem byla OSB deska, která v experimentu sloužila jako obložení stěny složené z Cetris desky a pórobetonové stěny z YTONGU. Teploty v experimentu byly snímány pod OSB deskou nainstalovanými termočlánky.

V analýze citlivosti byly studovány tepelně-technické charakteristiky materiálů, složení zkoušeného materiálu, síť výpočetního prostotu a fyzikální děje v numerickém modelu. Vstupní podmínky byly zadány a byly počítány s kontrolními objemy 0,1 x 0,2 x 0,2 metru, 0,1 x 0,1 x 0,1 metru a v nejemnější síti 0,1 x 0,05 x 0,05 metru.

Výsledné hodnoty teplot všech provedených modelů budou porovnány metodou Monte Carlo. Metoda Monte Carlo má široké využití od simulací experimentů. Bude vypočítán aritmetický průměr, směrodatná odchylka a rozptyl dat.

SMĚRODATNÁ ODCHYLKA

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}$$

ROZPTYL

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$$

VARIAČNÍ KOEFICIENT

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}}$$

Obrázek 4.5: Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky, rozptylu a variačního koeficientu

M1 - Model zkoušky v rohu místnosti s hrubou sítí bez pyrolýzy

Analýza započíná jednoduchým výpočtem již validovaného modelu, který byl poskytnut panem Ing. Jakubem Šejnou. Model obsahuje definici materiálových charakteristik. Byl to první zkušební výpočet, proto byla výpočetní síť nastavena na velikost výpočetního objemu dvakrát větším (0,1 x 0,2 x 0,2 metru) než v následujících výpočtech (0,1 x 0,1 x 0,1 metru) z časových důvodů a studie citlivosti výpočetní sítě. Dvakrát hrubší síť pak také poskytne náhled na studii citlivosti výpočetní sítě.

Hořák je nastaven na výkon 50 kW ve všech virtuálních modelech, tak jak tomu bylo při reálné zkoušce. Tepelně technické charakteristiky materiálů zůstávají nezměněny. Uvedené kinetické konstanty A, E jsou pro daný model s hrubou sítí (0,1 x 0,2 x 0,2 metru) pro materiál OSB desky zprůměrované z výše uvedených hodnot v tabulce na obrázku č. 4.3. V parametru SURF zatím není v modelu M1 zadán příkaz k odhořívání.

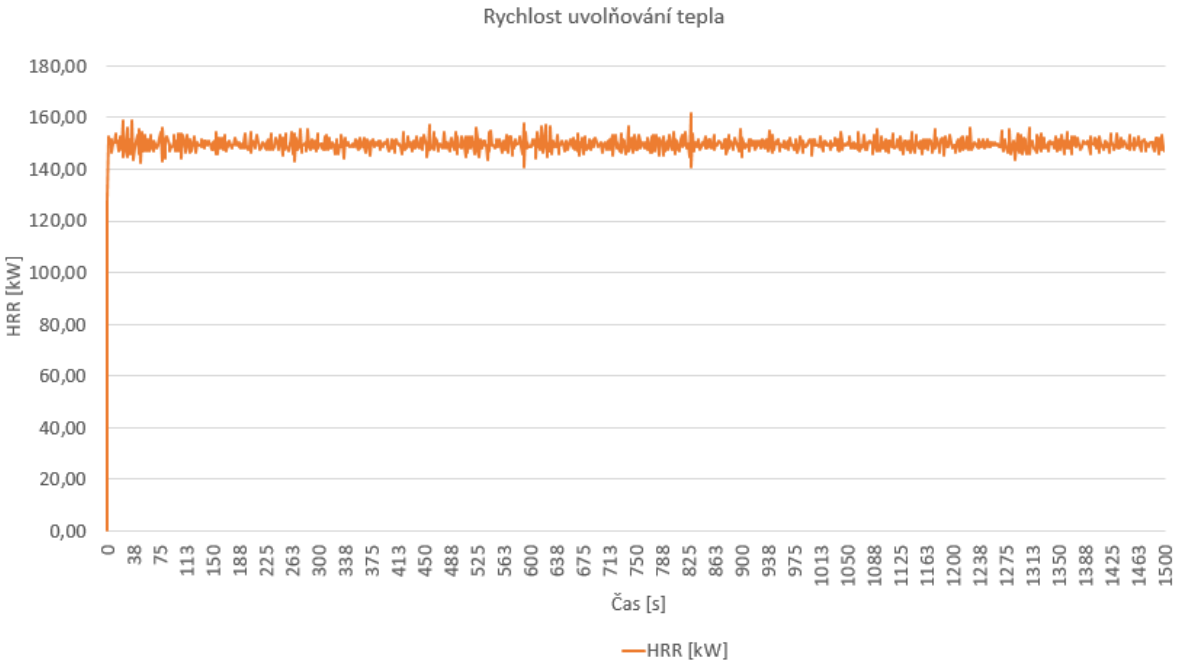
Příkaz MESH obsahuje informace o rozsahu a velikosti buňky. Velikost buňky v RCT je 0,1 x 0,2 x 0,2. To znamená, že v prostoru místnosti je na délku 3,9 metru ve směru osy X rozmístěno 39 buněk. Ve směru osy Y je na délku 2,4 metru rozmístěno 5 buněk.

MESH ID=’rct’, IJK=39,12,12, XB=0.0,3.9,0.0,2.4,0.0,2.4/
MESH ID=’zvon’, IJK=15,30,45, XB=3.9,6.9,-0.3,2.7,0.0,4.5/

Kinetické součinitele pro materiál OSB desky byly zadány jako zprůměrované hodnoty hemicelulózy, celulózy a ligninu .

Výpočtová síť v prostoru s odtahem nebyla v průběhu modelování měněna. Měření teploty termočlánky probíhá pouze na jedné stěně a to v prostoru místnosti. Z toho důvodu se měnila výpočtová síť pouze v místnosti s obložením z OSB desek.

MATL ID=’OSB’,
SPECIFIC_HEAT=1.0,
CONDUCTIVITY=0.1,
DENSITY=700.0,
HEAT_OF_COMBUSTION=0.0,
N_REACTIONS=1,
N_S=2.1,
A=1.56E14,
E=1.71333E6/
SURF ID=’STENA_OSB’,
RGB=255.0,24.0,243.0,
BACKING=’VOID’,
MATL_ID(1,1)=’POROBETON’,
MATL_ID(2,1)=’CETRIS’,
MATL_ID(3,1)=’OSB’,
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(3,1)=1.0,
THICKNESS(1:3)=0.3,0.01,0.022/

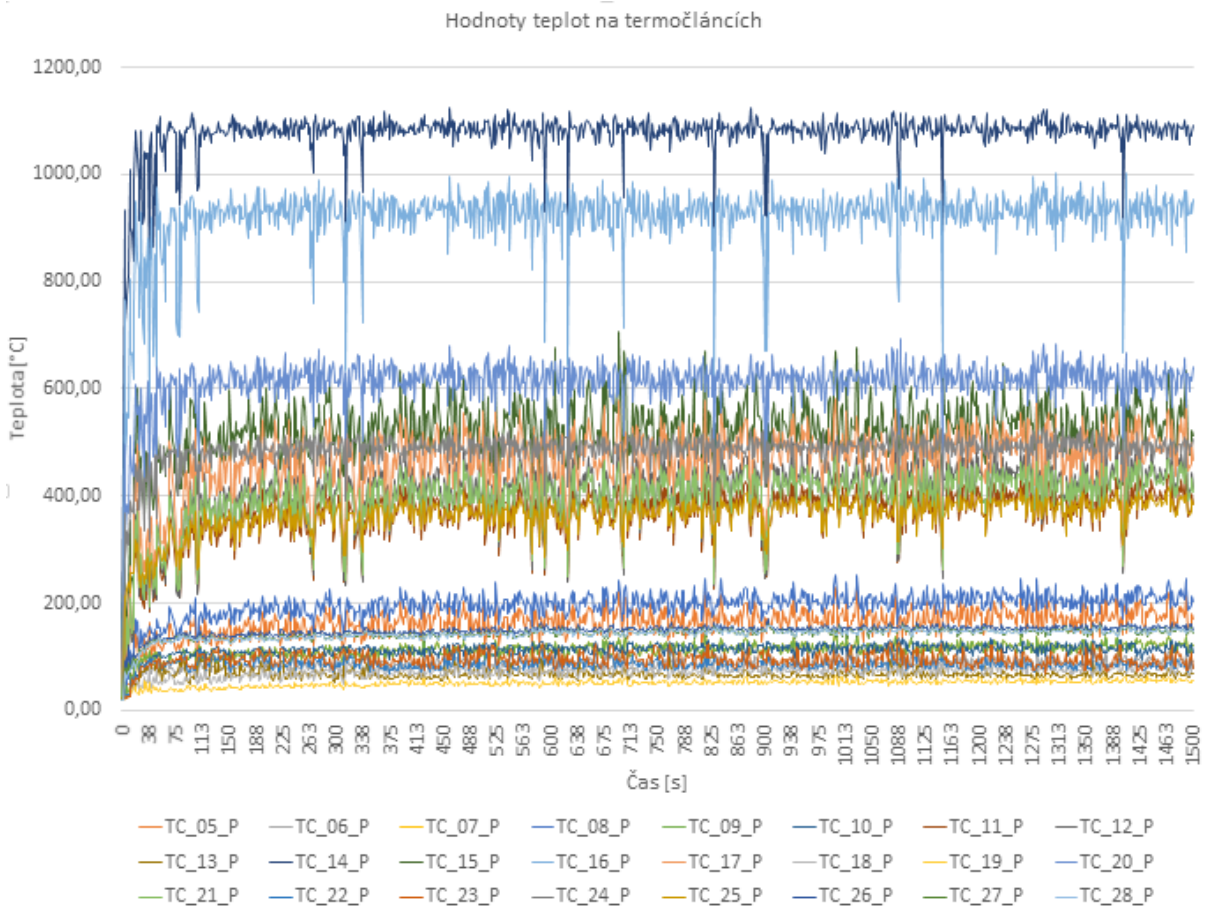


Obrázek 4.6: Průběh rychlosti uvolňování tepla M1

Byl proveden výpočet modelu M1 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,2 x

0,2 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 5 616 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel na grafu č.4.6. Výpočet proběhl s nízkým počtem výpočetních kroků (v řádu tisíců kroků zhruba 8000 kroků) v celkovém čase 3 hodiny.

Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla na obrázku č.4.6 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č.4.7. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 161,72 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 149,47 kW.



Obrázek 4.7: Průběh teplot na termočláncích M1

Byl proveden výpočet modelu M1 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,2 x 0,2 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 5 616 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel.

Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu na obrázku č. 4.7 pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 325,1 ^{o}C.

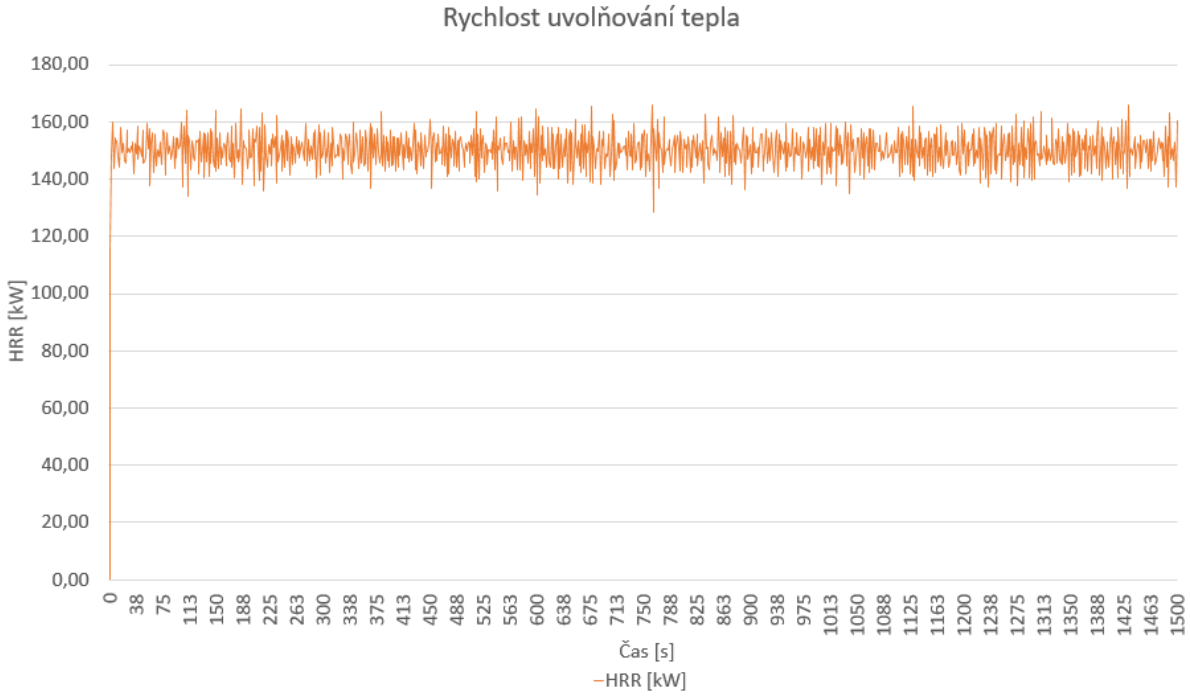
Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 306,5 ^{o}C.

M2 - Model zkoušky v rohu místnosti s jemnou sítí bez pyrolýzy

Byl proveden výpočet modelu M2 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla obrázek č. 4.8 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.9. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 165,94 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 150,33 kW. MESH ID='rct', IJK=39,24,24, XB=0.0,3.9,0.0,2.4,0.0,2.4/
MESH ID='zvon', IJK=15,30,45, XB=3.9,6.9,-0.3,2.7,0.0,4.5/
Byl proveden výpočet modelu M2 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,2 x 0,2 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 5 616 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel na grafu č. 4.8. Výpočet proběhl s vyšším počtem (v řádu desetitisíců zhruba 20 000 kroků) výpočetních kroků v celkovém čase 8 hodin.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 161,72 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 149,47 kW.

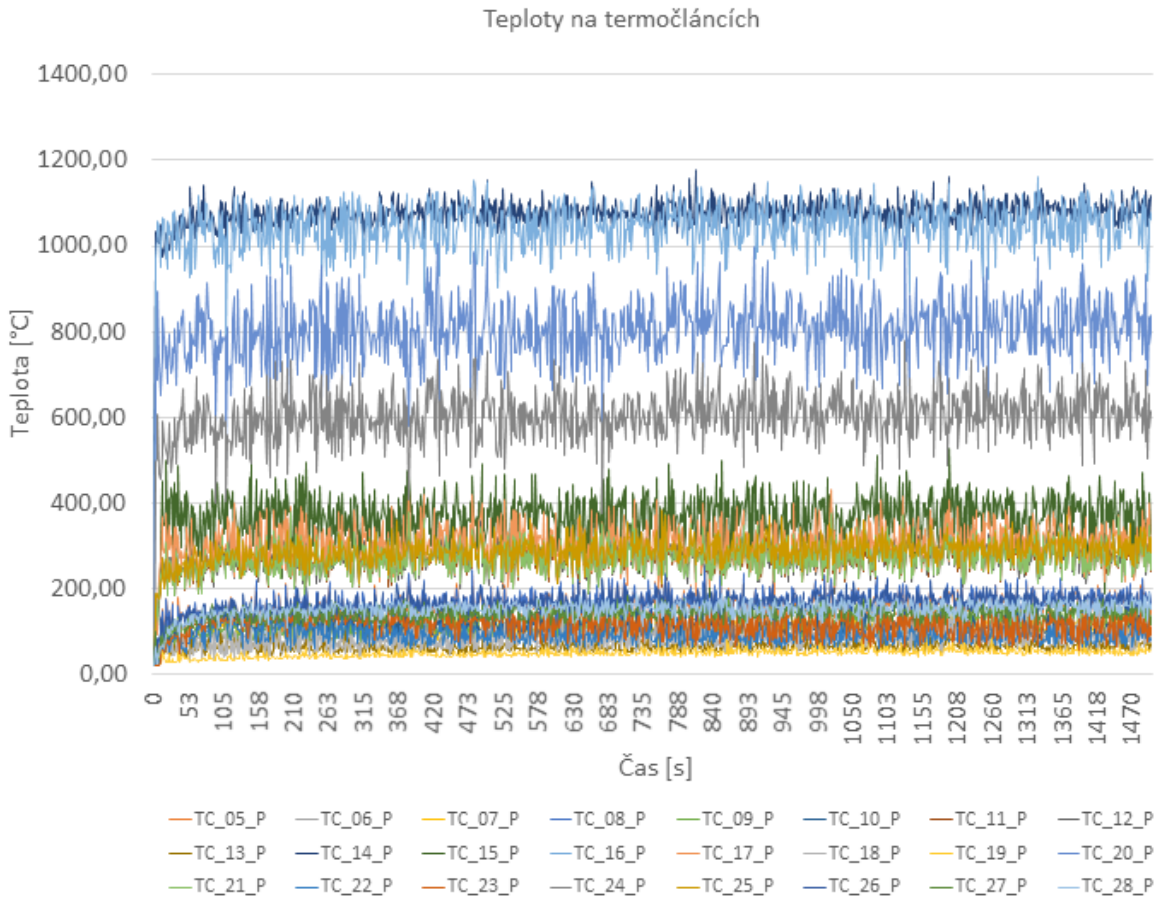


Obrázek 4.8: Průběh rychlosti uvolňování tepla M2

Byl proveden výpočet modelu M2 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel v grafu na obrázku č. 4.9.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB

deskou. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 322,8 °C.
Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 °C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 291,4 °C.



Obrázek 4.9: Průběh teplot na termočláncích M2

M3 - Model zkoušky v rohu místnosti s jemnou sítí s pyrolýzou

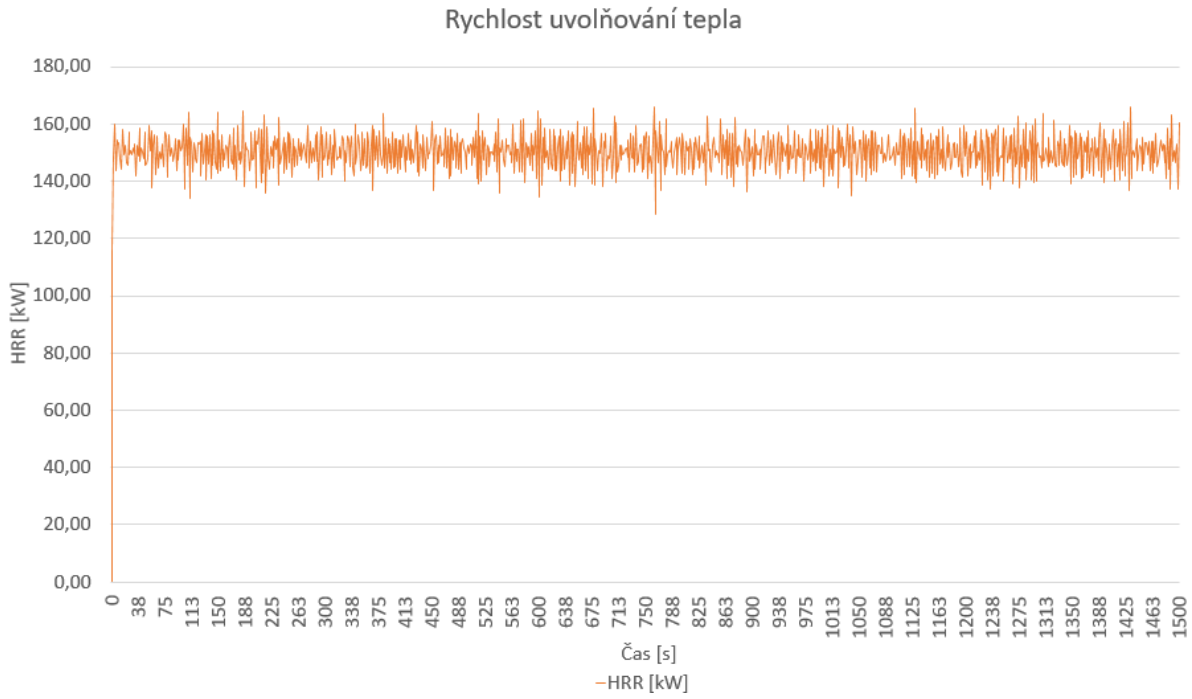
Do modelu byl přidán pokyn pro odhořívání BURN_AWAY = .TRUE. V tomto modelu způsobí to, že v řádku SURFu STENA_OSB začně probíhat odhořívání modelovaného povrchu SURFU STENA_OSB. Tato stěna složená z vrstev začne mizet buňku po buňce. Nevzniká přitom však žádný produkt odhořívání.

```
MESH ID='rct', IJK=39,24,24, XB=0.0,3.9,0.0,2.4,0.0,2.4/
MESH ID='zvon', IJK=15,30,45, XB=3.9,6.9,-0.3,2.7,0.0,4.5/
SURF ID='STENA_OSB',
    RGB=255.0,24.0,243.0,
    BACKING='VOID',
    BURN_AWAY='.TRUE.'
    MATL_ID(1,1)='POROBETON',
    MATL_ID(2,1)='CETRIS',
    MATL_ID(3,1)='OSB',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
```

MATL_MASS_FRACTION(3,1)=1.0,
THICKNESS(1:3)=0.3,0.01,0.022/

Byl proveden výpočet modelu M3 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla na obrázku č. 4.10 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.11. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 165,94 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 150,33 kW.

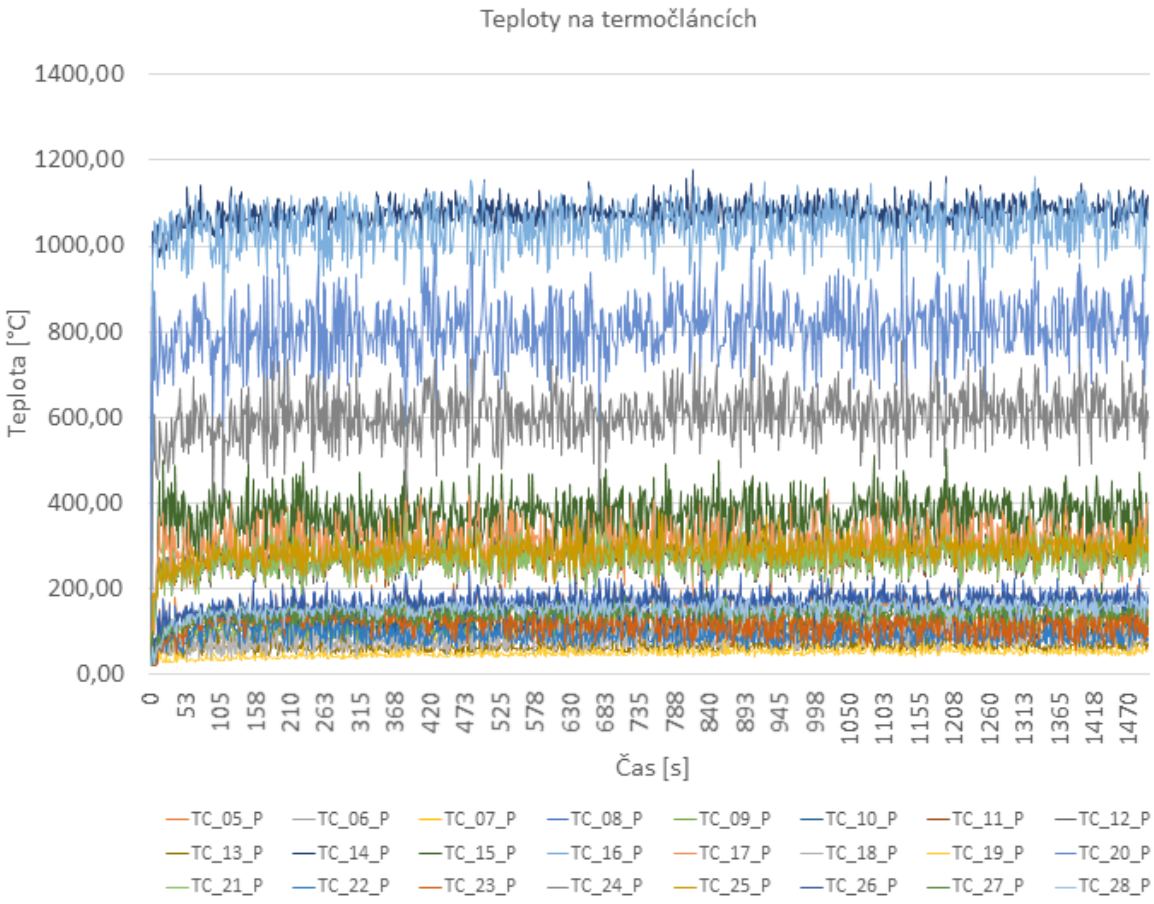


Obrázek 4.10: Průběh rychlosti uvolňování tepla M3

Byl proveden výpočet modelu M3 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.11. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 322,8 ^{o}C.

Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 291,4 ^{o}C.



Obrázek 4.11: Průběh teplot na termočláncích M3

M4 - Model zkoušky v rohu místnosti s počátkem pyrolýzy v 300°C

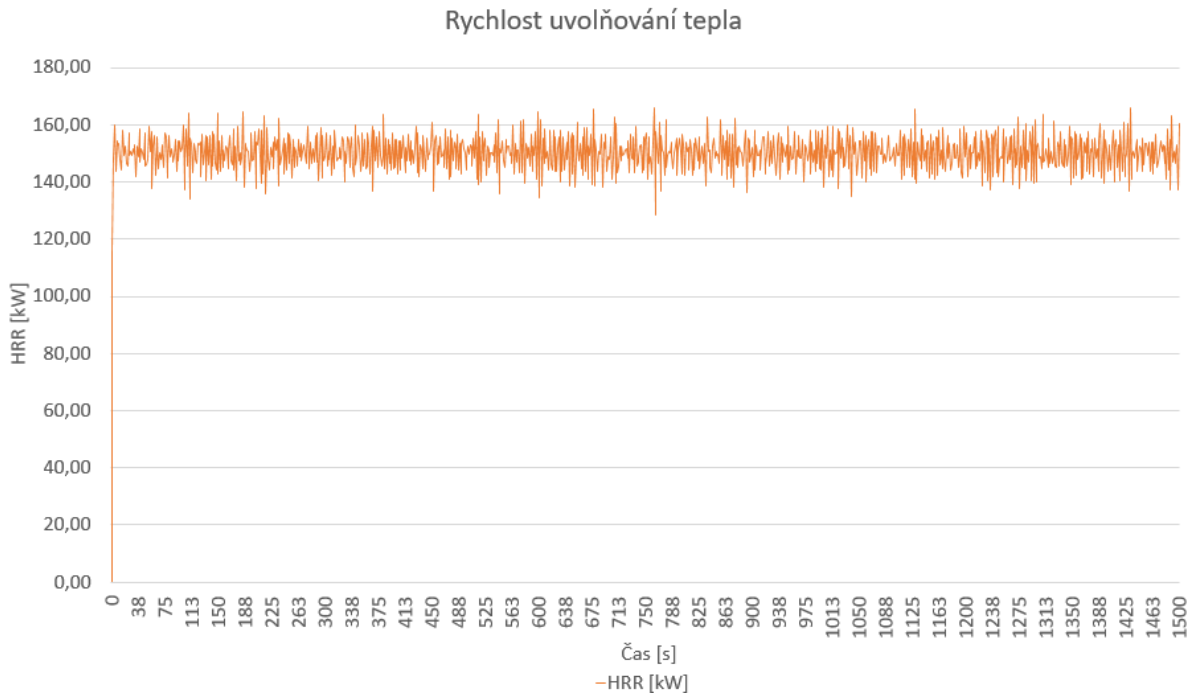
Model M4 je nastaven podobně jako model M3, jen je k němu přidán pokyn počátku odhořívání v momentě, kdy teplota na jednom z termočlánků v jeden moment dosáhne 300°C. Bylo totiž experimentálně zjištěno, že k pyrolýze dřevotřískové desky dochází při teplotě přibližně 300°C. To znamená, že z mizení buněk stěny dochází pouze při zadané teplotě 300°C.
Tento pokyn byl ve výpočetním modelu zadán pomocí REFERENCE_TEMPERATURE=300. S použitím tohoto příkazu nesmí být zadány hodnoty kinetických součinitelů. REFERENCE_TEMPERATURE se používá v případě, kdy nejsou kinetické součinitele známy.

```
MESH ID='rct', IJK=39,24,24, XB=0.0,3.9,0.0,2.4,0.0,2.4/
MESH ID='zvon', IJK=15,30,45, XB=3.9,6.9,-0.3,2.7,0.0,4.5/
MATL ID='OSB',
    SPECIFIC_HEAT=1.0,
    CONDUCTIVITY=0.1,
    DENSITY=700.0,
    HEAT_OF_COMBUSTION=0.0,
    REFERENCE_TEMPERATURE=300/
SURF ID='STENA_OSB',
    RGB=255.0,24.0,243.0,
    BACKING='VOID',
```

BURN_AWAY=’.TRUE.’
MATL_ID(1,1)=’POROBETON’,
MATL_ID(2,1)=’CETRIS’,
MATL_ID(3,1)=’OSB’,
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(3,1)=1.0,
THICKNESS(1:3)=0.3,0.01,0.022/

Byl proveden výpočet modelu M4 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla na obrázku č. 4.12 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.13. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 165,94 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 150,33 kW.

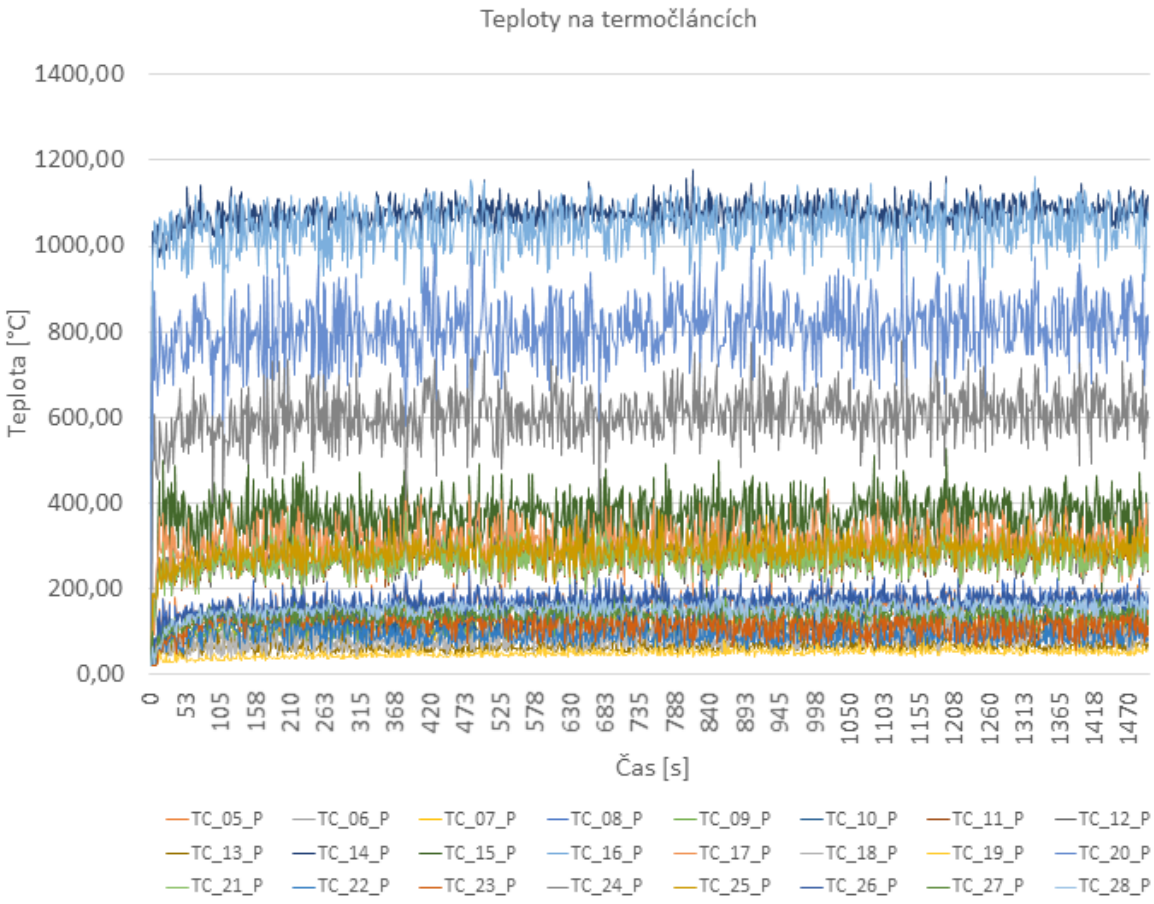


Obrázek 4.12: Průběh rychlosti uvolňování tepla M4

Byl proveden výpočet modelu M4 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.13. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 322,8 ^{o}C.

Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 291,4 ^{o}C.



Obrázek 4.13: Průběh teplot na termočláncích M4

M5 - Model zkoušky v rohu místnosti s odhořívání OSB rozložené na složky

V modelu M5 byla dřevotřísková deska rozložena na tři hlavní složky dřeva. Každá složka má ve své MATL specifikované skutečné hodnoty kinetických součinitelů.

MATL ID='HEMICELULOZA',
SPECIFIC_HEAT=1.0,
CONDUCTIVITY=0.1,
DENSITY=700.0,
HEAT_OF_COMBUSTION=16630.0,
N_REACTIONS=1,
N_S=2.1,
A=3.25E13,
E=1.64E5/

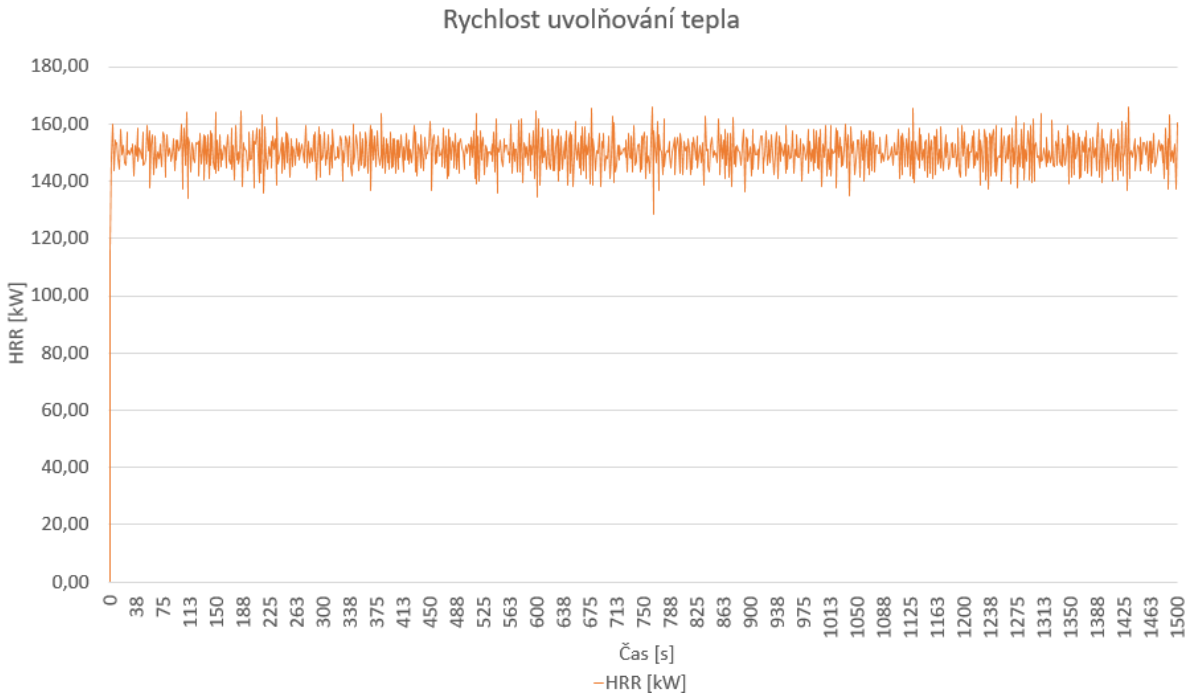
MATL ID='CELULOZA',
SPECIFIC_HEAT=1.0,
CONDUCTIVITY=0.1,
DENSITY=700.0,
HEAT_OF_COMBUSTION=17000.0,
N_REACTIONS=1,
N_S=2.1,

A=3.51E14,
E=1.98E5/

MATL ID='LIGNIN',
SPECIFIC_HEAT=1.0,
CONDUCTIVITY=0.1,
DENSITY=700.0,
HEAT_OF_COMBUSTION=21130.0,
N_REACTIONS=1,
N_S=2.1,
A=8.41E13,
E=1.52E5/

Byl proveden výpočet modelu M5 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.14. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 165,94 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 150,33 kW.

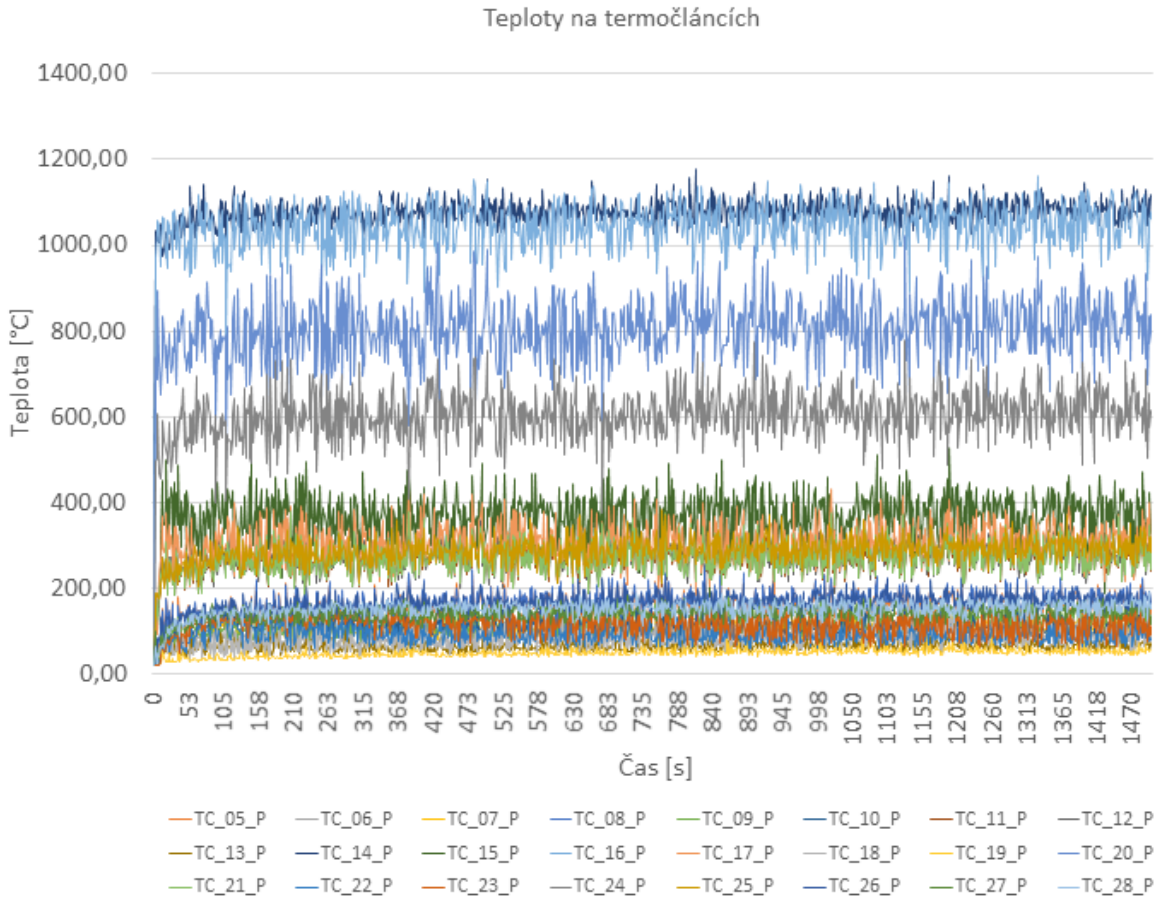


Obrázek 4.14: Průběh rychlosti uvolňování tepla M5

Byl proveden výpočet modelu M5 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.15. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 322,8 ^{o}C.

Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 °C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 291,4 °C.



Obrázek 4.15: Průběh teplot na termočláncích M5

M6 - Model zkoušky v rohu místnosti s odhořívání OSB rozložené na složky v určeném podílu složení v nejjemnější síti

Dalším stupněm tvorby modelu s rozloženými složkami dřevotřískové desky je určení poměrového zastoupení složek v dřevotřískové desce. Nejvyšší zastoupení v dřevotřísce má hemicelulóza a celulóza, nejnižší pak lignin. Celulóza zastupuje 0,5, hemicelulóza 0,3, a nakonec lignin 0,2. Podíly tří složek byly pro účely výpočtu modelu převzaty ze stránek výrobce OSB desek ale jejich přesný podíl ve zkoušené OSB desce není známý.

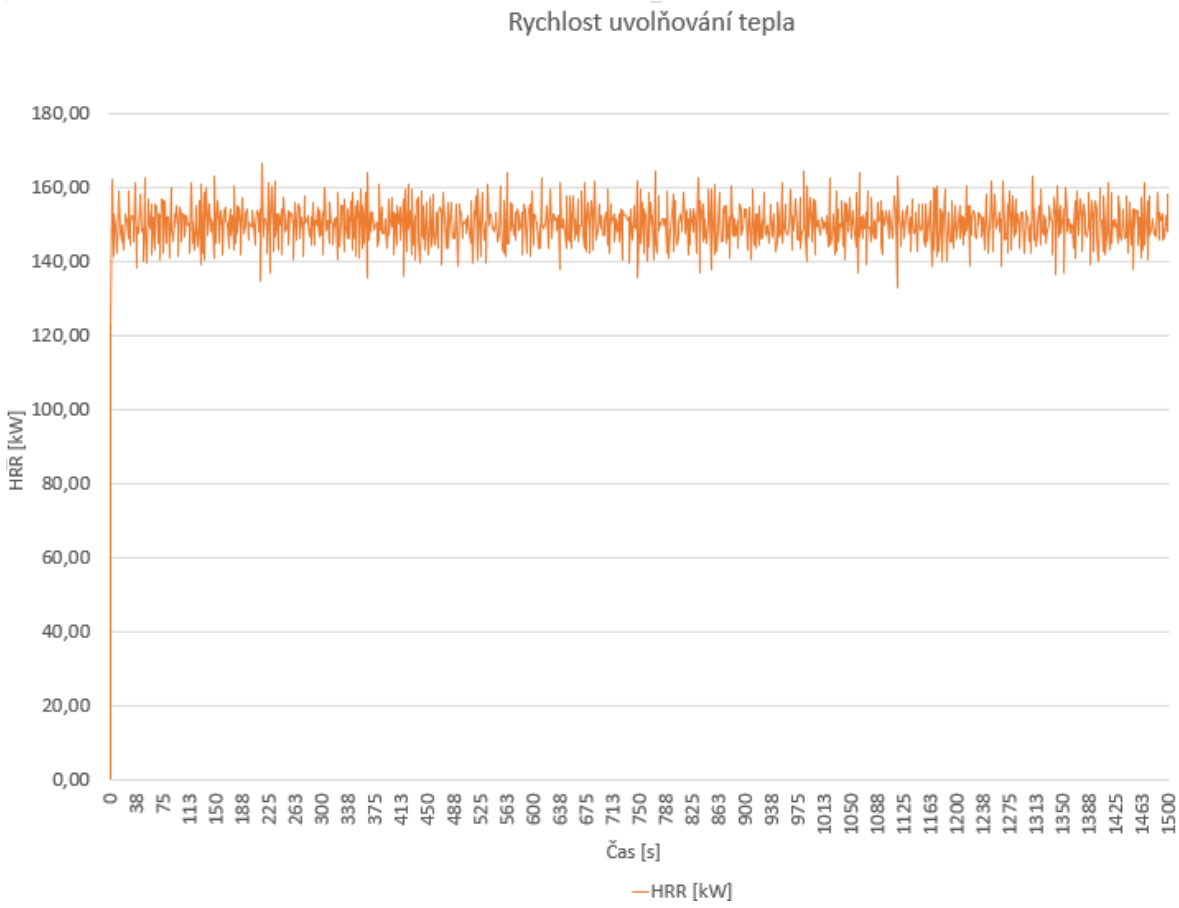
```
MESH ID='rct', IJK=39,48,48, XB=0.0,3.9,0.0,2.4,0.0,2.4/
MESH ID='zvon', IJK=15,30,45, XB=3.9,6.9,-0.3,2.7,0.0,4.5/
SURF ID='STENA_OSB',
    RGB=255.0,24.0,243.0,
    BACKING='VOID',
    BURN_AWAY=.TRUE.,

    MATL_ID(1,1)='POROBETON',
    MATL_ID(2,1)='CETRIS',
    MATL_ID(3,1:3)='HEMICELULOZA','CELULOZA', 'LIGNIN',
```

MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
MATL_MASS_FRACTION(3,1:3)=0.3, 0.5, 0.2,
THICKNESS(1:3)=0.3,0.01,0.22/

Byl proveden výpočet modelu M6 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,05 x 0,05 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 89 856 kontrolních objemů, což je 16 krát více než v modelu s hrubou sítí 0,1 x 0,2 x 0,2 metru a 4 krát více než v jemné sítí 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

Lze pozorovat nejvyšší počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla na obrázku č. 4.16 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.17. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 166,6 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 150,13 kW.

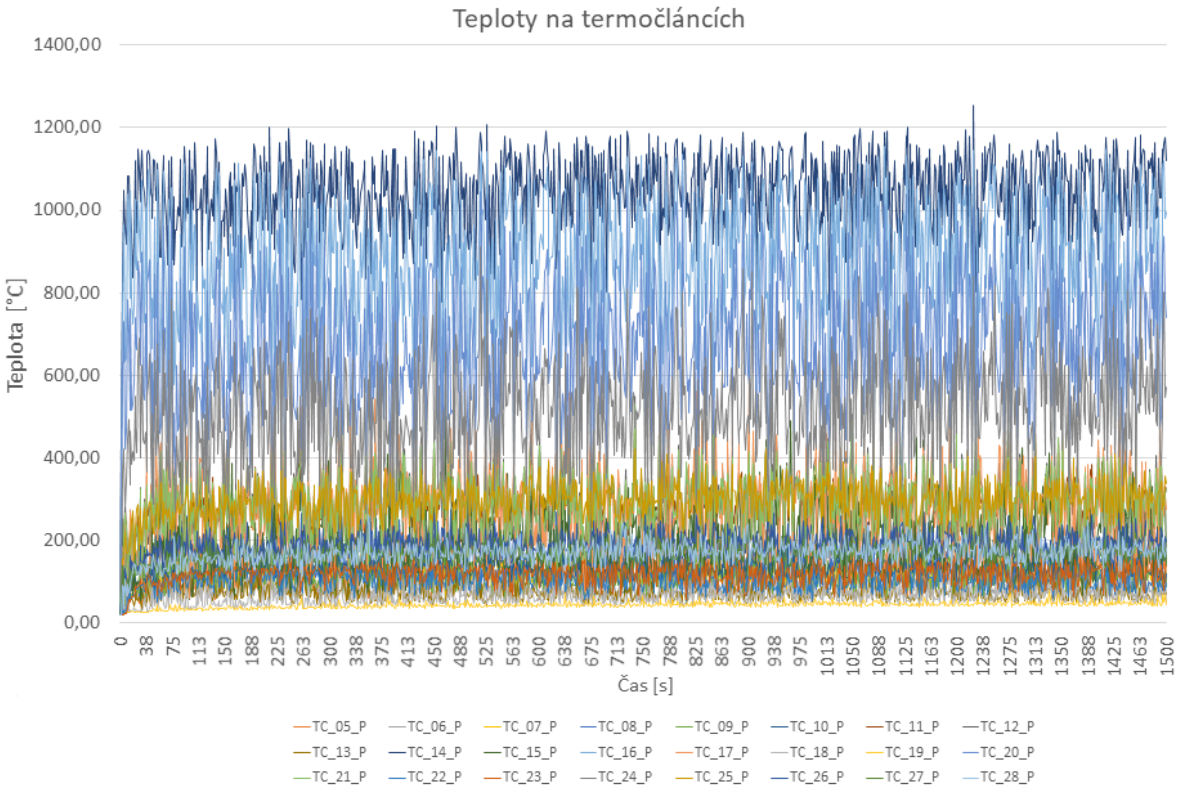


Obrázek 4.16: Průběh rychlosti uvolňování tepla M6

Byl proveden výpočet modelu M6 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel.

Lze pozorovat nejvyšší počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 4.17. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 314,3 ^{o}C.

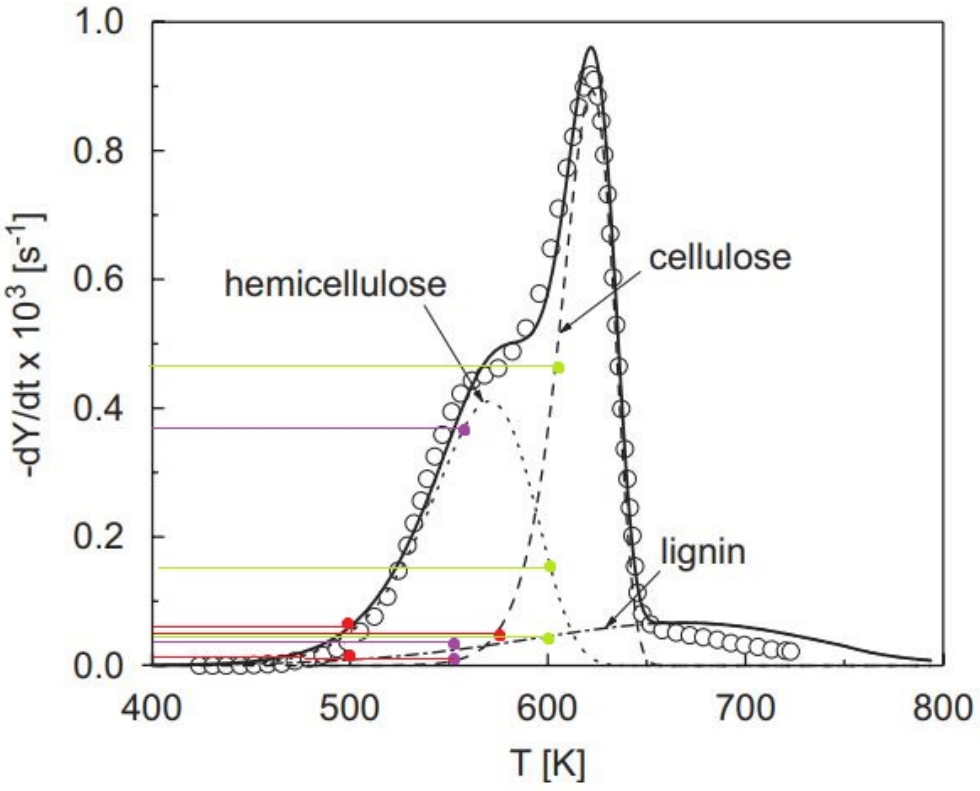
Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 273,3 ^{o}C.



Obrázek 4.17: Průběh teplot na termočláncích M6

S ohledem na velmi mnoho možností zadávání vstupních podmínek je bráno v potaz, že počet provedených výpočtů je poměrně nízký. Bylo vypozorováno, jak průběh rychlosti uvolňování tepla, tak průběhy teplot na termočláncích jsou takřka ve všech provedených modelech podobné. Je to dáno tím, že kinetické součinitele jsou jen velmi malými hodnotami, jejichž výsledky různě měněných podílů odhořívajících složek nesnadno zaznamenat. Kinetické součinitele jsou v řádech desetitisícin. Jediný součinitel, který by výsledky mohl ještě v jemnější síti (například 0,001 x 0,001 x 0,001) poznamenat je lignin, jehož hodnota se pohybuje v řádu jednotek. Podíly byly uváženy dle protnutých bodů v grafu na obrázku .

Výsledky mediánové rychlosti uvolňování tepla nejjemnější sítě 0,1 x 0,05 x 0,05 metru liší od jemné sítě 0,1 x 0,1 x 0,1 o necelých 0,4 %. Teploty nejjemnější sítě 0,1 x 0,05 x 0,05 metru liší od jemné sítě 0,1 x 0,1 x 0,1 o 1,3 %.



Obrázek 4.18: Podíly hlavních tří složek dřeva v závislosti na teplotě v čase

Upřesněné výsledné hodnoty teplot lze pozorovat při zmenšených kontrolních objemech z 0,1 x 0,2 x 0,2 na 0,1 x 0,1 x 0,1. Teploty se pohybují v podobných hodnotách, avšak při zhuštění sítě lze pozorovat ostřejší peaky grafů.

ČAS	ZMĚŘENÁ	M1 HRUBA	M2 BEZ PYROLYZY	M3 PYROLYZA OSB	M4 PYROLYZA OSB POČ. 300 °C	M5 NA ČÁSTI OSB	M6 JEMNA	M7 ZMĚNA TTCH	M8 RAMPA
minuta	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]
0	29,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
15	30,1	177,0	262,6	262,6	262,6	262,6	216,5	249,5	265,3
30	30,7	215,6	242,6	242,6	242,6	242,6	234,7	230,5	245,0
45	31,2	238,2	276,9	276,9	276,9	276,9	257,9	263,1	279,7
60	31,5	241,8	265,8	265,8	265,8	265,8	245,7	252,5	268,5
75	32,5	266,2	278,7	278,7	278,7	278,7	258,9	264,7	281,5
90	34,0	289,1	267,1	267,1	267,1	267,1	243,8	253,7	269,7
105	34,1	233,5	285,2	285,2	285,2	285,2	251,8	270,9	288,0
120	34,2	291,4	292,6	292,6	292,6	292,6	244,8	278,0	295,5
135	34,4	293,8	280,4	280,4	280,4	280,4	256,4	266,4	283,2
150	35,0	304,7	266,8	266,8	266,8	266,8	263,5	253,5	269,5
165	35,5	282,8	293,6	293,6	293,6	293,6	260,2	278,9	296,6
180	36,3	279,5	273,1	273,1	273,1	273,1	273,3	259,5	275,9
195	37,3	305,3	293,6	293,6	293,6	293,6	271,7	279,0	296,6
210	37,9	297,2	275,5	275,5	275,5	275,5	268,8	261,7	278,2
225	38,6	299,6	291,7	291,7	291,7	291,7	273,4	277,1	294,6
240	38,8	286,7	283,1	283,1	283,1	283,1	239,7	269,0	286,0
255	39,2	308,3	298,5	298,5	298,5	298,5	243,4	283,6	301,5
270	39,6	300,6	276,9	276,9	276,9	276,9	278,2	263,1	279,7
285	40,2	313,7	288,7	288,7	288,7	288,7	274,1	274,3	291,6
300	40,6	299,2	283,4	283,4	283,4	283,4	283,5	269,2	286,2
315	41,0	307,2	285,5	285,5	285,5	285,5	264,0	271,2	288,3
330	41,6	295,6	274,3	274,3	274,3	274,3	274,4	260,6	277,0
345	42,3	304,3	295,2	295,2	295,2	295,2	272,2	280,4	298,1
360	43,0	307,1	276,6	276,6	276,6	276,6	266,5	262,8	279,4
375	43,7	281,3	289,0	289,0	289,0	289,0	247,0	274,6	291,9
390	44,4	324,6	280,8	280,8	280,8	280,8	277,6	266,8	283,7
405	45,0	308,3	272,0	272,0	272,0	272,0	271,3	258,4	274,7
420	45,9	311,5	296,3	296,3	296,3	296,3	250,4	281,5	299,3
435	46,5	311,1	285,5	285,5	285,5	285,5	293,2	271,2	288,4
450	47,3	300,2	299,4	299,4	299,4	299,4	304,3	284,4	302,4
465	48,6	299,6	303,4	303,4	303,4	303,4	252,4	288,2	306,4
480	49,4	309,6	322,8	322,8	322,8	322,8	259,5	306,6	326,0
495	49,9	308,4	292,2	292,2	292,2	292,2	253,4	277,6	295,2
510	50,6	299,5	276,4	276,4	276,4	276,4	269,7	262,6	279,2
525	51,1	307,8	288,9	288,9	288,9	288,9	258,9	274,5	291,8
540	51,6	294,5	303,7	303,7	303,7	303,7	281,7	288,5	306,7
555	52,6	305,7	298,9	298,9	298,9	298,9	307,3	284,0	301,9
570	53,1	303,2	306,6	306,6	306,6	306,6	280,9	291,3	309,7
585	53,6	279,3	290,1	290,1	290,1	290,1	257,9	275,6	293,0
600	54,1	312,4	274,8	274,8	274,8	274,8	270,6	261,1	277,6
615	54,8	283,6	303,1	303,1	303,1	303,1	275,2	287,9	306,1
630	55,9	323,9	262,9	262,9	262,9	262,9	281,2	249,7	265,5
645	56,6	306,0	299,9	299,9	299,9	299,9	230,0	284,9	302,9
660	58,2	296,7	277,0	277,0	277,0	277,0	277,3	263,1	279,8
675	59,5	325,1	290,9	290,9	290,9	290,9	261,2	276,3	293,8
690	62,4	306,5	272,0	272,0	272,0	272,0	269,4	258,4	274,7
705	65,7	319,8	292,8	292,8	292,8	292,8	298,5	278,1	295,7
720	71,7	317,0	298,3	298,3	298,3	298,3	265,0	283,4	301,3
735	106,1	306,8	275,9	275,9	275,9	275,9	292,9	262,1	278,7
750	106,5	308,1	293,9	293,9	293,9	293,9	252,1	279,2	296,8
765	107,0	288,9	297,6	297,6	297,6	297,6	266,5	282,7	300,6
780	107,4	312,3	282,3	282,3	282,3	282,3	266,0	268,2	285,1
795	107,9	301,0	296,9	296,9	296,9	296,9	301,7	282,1	299,9
810	108,2	299,6	284,5	284,5	284,5	284,5	284,7	270,3	287,4
825	108,6	290,7	297,5	297,5	297,5	297,5	267,3	282,6	300,5
840	109,1	316,9	287,3	287,3	287,3	287,3	272,9	272,9	290,2
855	109,5	305,2	302,8	302,8	302,8	302,8	314,3	287,7	305,8
870	110,0	318,9	282,3	282,3	282,3	282,3	268,4	268,2	285,1
885	110,5	312,1	287,7	287,7	287,7	287,7	285,7	273,3	290,5
900	110,9	244,5	298,6	298,6	298,6	298,6	288,7	283,7	301,6
915	111,6	312,8	308,3	308,3	308,3	308,3	280,7	292,9	311,4
930	112,1	309,1	306,2	306,2	306,2	306,2	236,6	290,9	309,3
945	112,8	310,0	288,9	288,9	288,9	288,9	295,0	274,5	291,8
960	113,6	318,9	304,4	304,4	304,4	304,4	298,4	289,2	307,4
975	114,4	307,5	273,0	273,0	273,0	273,0	298,9	259,4	275,8

Obrázek 4.19: Hodnoty zprůměrovaných teplot numerických modelů

990	115,3	317,6	294,6	294,6	294,6	294,6	270,7	279,9	297,6
1005	116,3	299,2	281,6	281,6	281,6	281,6	265,3	267,5	284,4
1020	117,0	310,8	296,1	296,1	296,1	296,1	312,8	281,3	299,0
1035	117,8	303,5	301,9	301,9	301,9	301,9	278,9	286,8	304,9
1050	118,9	308,8	296,8	296,8	296,8	296,8	282,5	282,0	299,8
1065	119,8	306,9	297,3	297,3	297,3	297,3	279,0	282,5	300,3
1080	120,8	306,3	291,4	291,4	291,4	291,4	284,0	276,9	294,4
1095	121,6	305,0	295,1	295,1	295,1	295,1	241,1	280,4	298,1
1110	122,5	298,0	291,1	291,1	291,1	291,1	283,7	276,5	294,0
1125	123,2	304,7	286,3	286,3	286,3	286,3	297,2	272,0	289,2
1140	123,6	297,2	295,0	295,0	295,0	295,0	271,6	280,2	297,9
1155	124,4	316,3	288,0	288,0	288,0	288,0	277,5	273,6	290,9
1170	125,4	319,1	300,2	300,2	300,2	300,2	275,5	285,2	303,2
1185	126,3	315,5	308,0	308,0	308,0	308,0	276,0	292,6	311,1
1200	127,2	319,5	302,9	302,9	302,9	302,9	278,6	287,8	306,0
1215	128,0	297,8	312,4	312,4	312,4	312,4	260,3	296,8	315,5
1230	128,8	297,0	293,4	293,4	293,4	293,4	282,8	278,8	296,4
1245	129,6	306,3	281,0	281,0	281,0	281,0	264,1	266,9	283,8
1260	130,4	311,9	299,2	299,2	299,2	299,2	278,4	284,3	302,2
1275	131,3	313,1	293,7	293,7	293,7	293,7	283,4	279,0	296,7
1290	132,0	307,8	301,0	301,0	301,0	301,0	294,8	285,9	304,0
1305	132,8	302,8	295,3	295,3	295,3	295,3	235,0	280,5	298,3
1320	133,5	301,5	308,0	308,0	308,0	308,0	276,0	292,6	311,1
1335	134,3	306,5	278,4	278,4	278,4	278,4	274,3	264,4	281,1
1350	135,1	312,3	301,2	301,2	301,2	301,2	273,5	286,1	304,2
1365	135,9	311,3	276,0	276,0	276,0	276,0	242,1	262,2	278,7
1380	136,7	307,0	279,4	279,4	279,4	279,4	264,7	265,4	282,2
1395	137,4	316,6	259,8	259,8	259,8	259,8	266,6	246,8	262,4
1410	138,2	307,5	278,3	278,3	278,3	278,3	295,0	264,4	281,1
1425	139,0	317,9	294,6	294,6	294,6	294,6	295,7	279,9	297,6
1440	139,6	316,9	305,6	305,6	305,6	305,6	280,8	290,4	308,7
1455	140,4	306,5	295,9	295,9	295,9	295,9	278,8	281,1	298,8
1470	141,1	316,2	310,8	310,8	310,8	310,8	293,3	295,3	313,9
1485	141,8	318,4	288,5	288,5	288,5	288,5	281,1	274,1	291,4
1500	142,5	307,2	296,5	296,5	296,5	296,5	286,1	281,7	299,5
SUMA Σ	8576,0	30068,5	28950,0	28950,0	28950,0	28950,0	27183,4	27503,5	29239,3
ARITMETICKÝ PRŮMĚR $\bar{x}$	84,9	297,7	286,6	286,6	286,6	286,6	269,1	272,3	289,5
ROZPTYL σ^2	1653,2	1270,7	881,0	881,0	881,0	881,0	965,9	790,1	899,7
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA σ	40,7	35,6	29,7	29,7	29,7	29,7	31,1	28,1	30,0
VARIAČNÍ KOEFICIENT v_x	47,9	12,0	10,4	10,4	10,4	10,4	11,5	10,3	10,4

Obrázek 4.20: Hodnoty zprůměrovaných teplot numerických modelů - pokračování

5. Shrnutí

Předmětem pozorování a měření výpočtů simulací se stala teplota a jejich hodnoty v blízkosti zkušebního vzorku dřevotřískové desky. Cílem analýzy citlivosti byla úvaha nad smysluplností změn ve vstupních hodnotách programu. Byly představeny faktory ovlivňující výsledky simulací. Kromě deterministické studie problematiky vstupních parametrů v této práci je třeba rozšířit studii výsledků o pravděpodobnostní. Protože lze v řešení předpokládat více vrcholů bude třeba využít Monte Carlo. Teploty byly zaznamenány do tabulky po pěti minutách. V tabulce je uveden aritmetický průměr, rozptyl, směrodatná odchylka a variační koeficient jednotlivých modelů včetně změřených hodnot teploty ve zkoušce v rohu místnosti. Pro řešení byl využit program FDS verze 6.7.5, ke kterému byla připravena sada vstupních dat v příloze 1 až 8.

Dílčími cíli práce bylo shrnout problematiku numerických modelů, které poskytují dodatečnou důvěru ve schopnost testů na zkušebním měřítku a mají být použity k předpovědi vlastností materiálů v testu ISO 9705. Komplexní virtuální modely vykazují potenciál v predikci realistických scénářů, které se liší od zkušební metody ISO 9705.

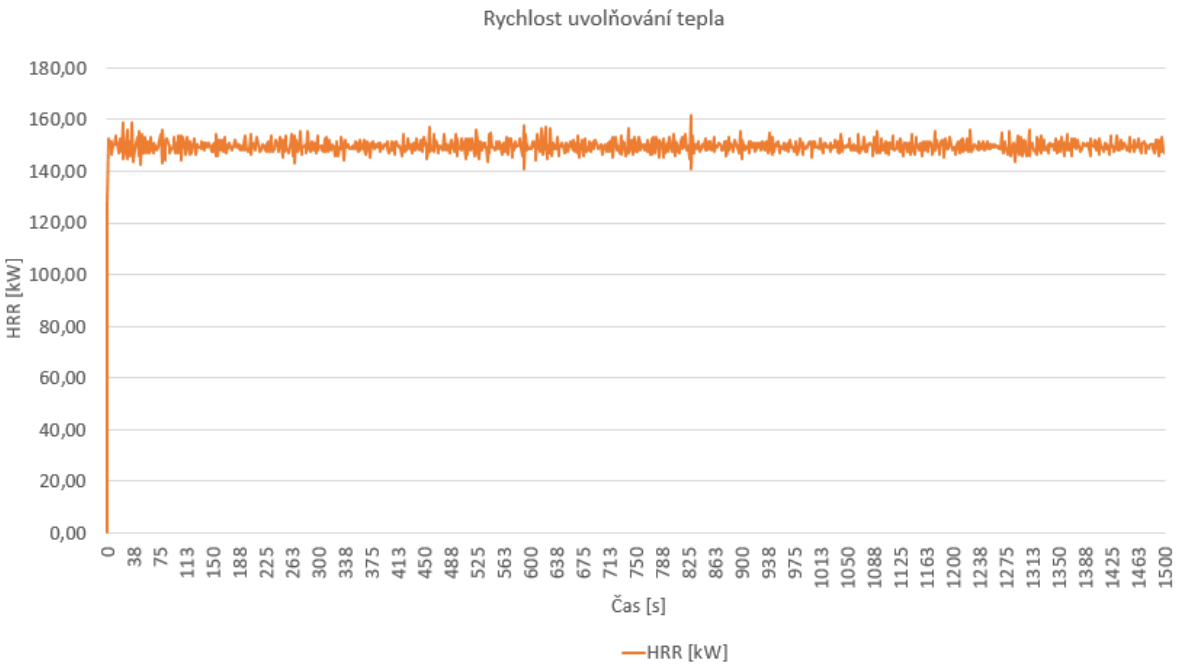
Vstupní výpočet byl proveden na numerickém modelu, který byl validován na experimentu. Výpočet posloužil jako odrazový můstek pro analýzu citlivosti. Následně byla v modelu s různými vstupy studován vliv na hrubší a jemnější síť.

Data z experimentu byla převedena a postupně v každé verzi numerického modelu upravena. Zkoumaným výrobkem byla OSB deska, která v experimentu sloužila jako obložení stěny složené z Cetris desky a pórobetonové stěny z YTONGU. Teploty v experimentu byly snímány pod OSB deskou nainstalovanými termočlánky.

V analýze citlivosti byly studovány tepelně technické charakteristiky materiálů, složení zkoušeného materiálu, síť výpočetního prostotu a fyzikální děje v numerickém modelu. Vstupní podmínky byly zadány a byly počítány s kontrolními objemy 0,1 x 0,2 x 0,2 metru, 0,1 x 0,1 x 0,1 metru a v nejemnější síti 0,1 x 0,05 x 0,05 metru.

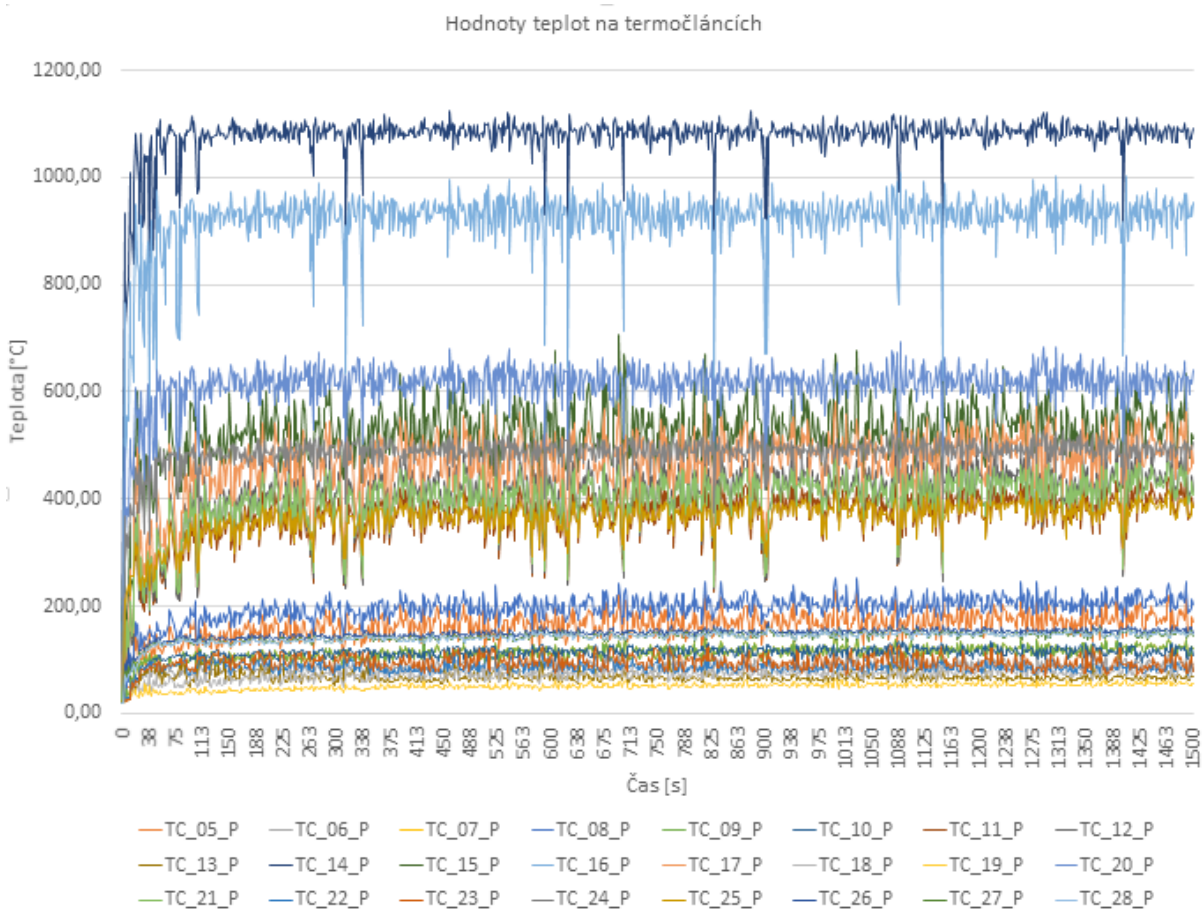
Byl proveden výpočet modelu M1 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,2 x 0,2 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 5 616 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel na grafu obrázku č. 5.1. Výpočet proběhl s nízkým počtem výpočetních kroků v celkovém čase 3 hodiny.

Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla na obrázku č. 5.1 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 5.2. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 161,72 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 149,47 kW.



Obrázek 5.1: Průběh teplot na termočláncích pro hrubou síť

Byl proveden výpočet modelu M1 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,2 x 0,2 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 5 616 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel.

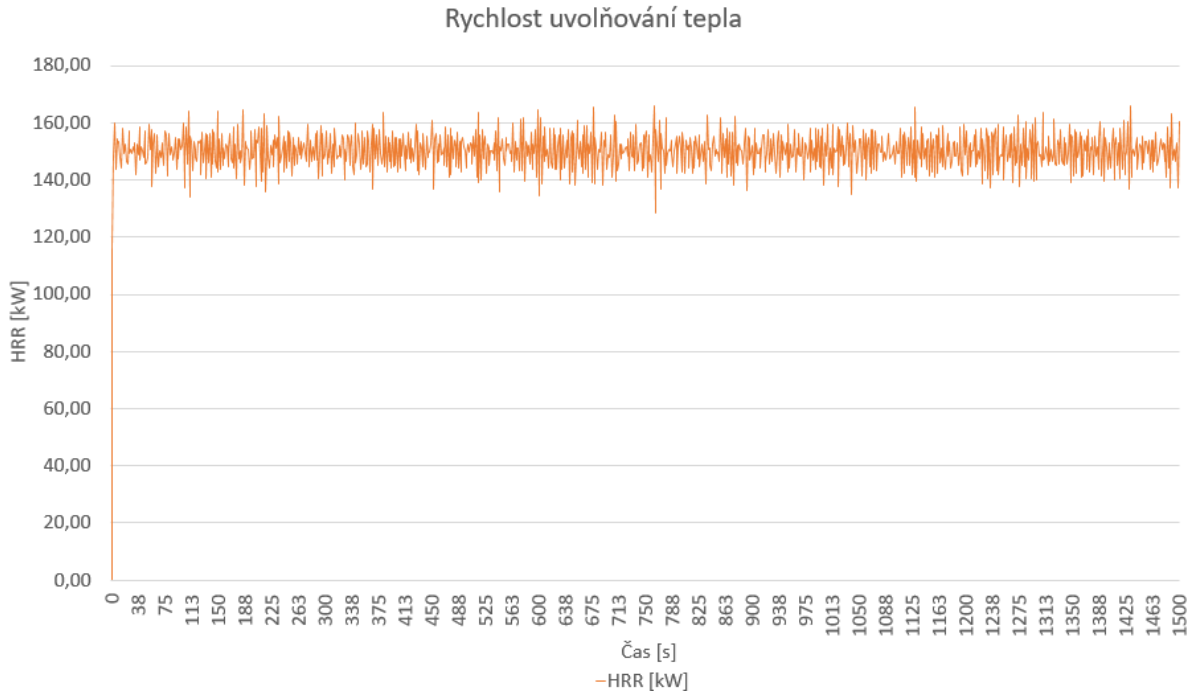


Obrázek 5.2: Průběh teplot na termočláncích pro hrubou síť

Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 5.2. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 325,1 ^{o}C.
Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 306,5 ^{o}C.

Následně byl proveden výpočet modelu M2 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru na obrázku č. 5.3. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla na obrázku č. 5.3 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou oproti modelu s hrubou sítí na obrázku č. 5.4. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 165,94 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 150,33 kW.

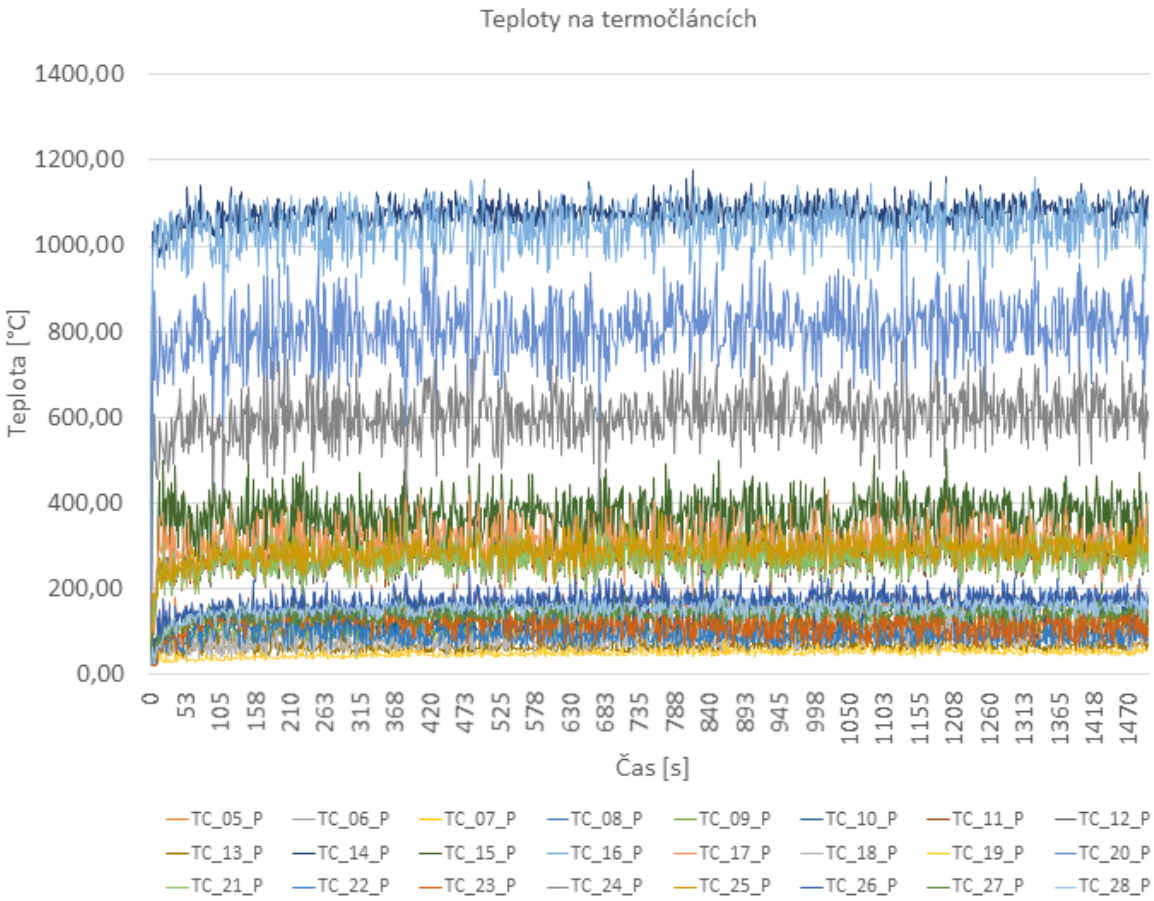


Obrázek 5.3: Průběh rychlosti uvolňování tepla

Na obrázku č. 5.4 byl proveden výpočet modelu M2 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel.

Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 5.4. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 322,8 ^{o}C.

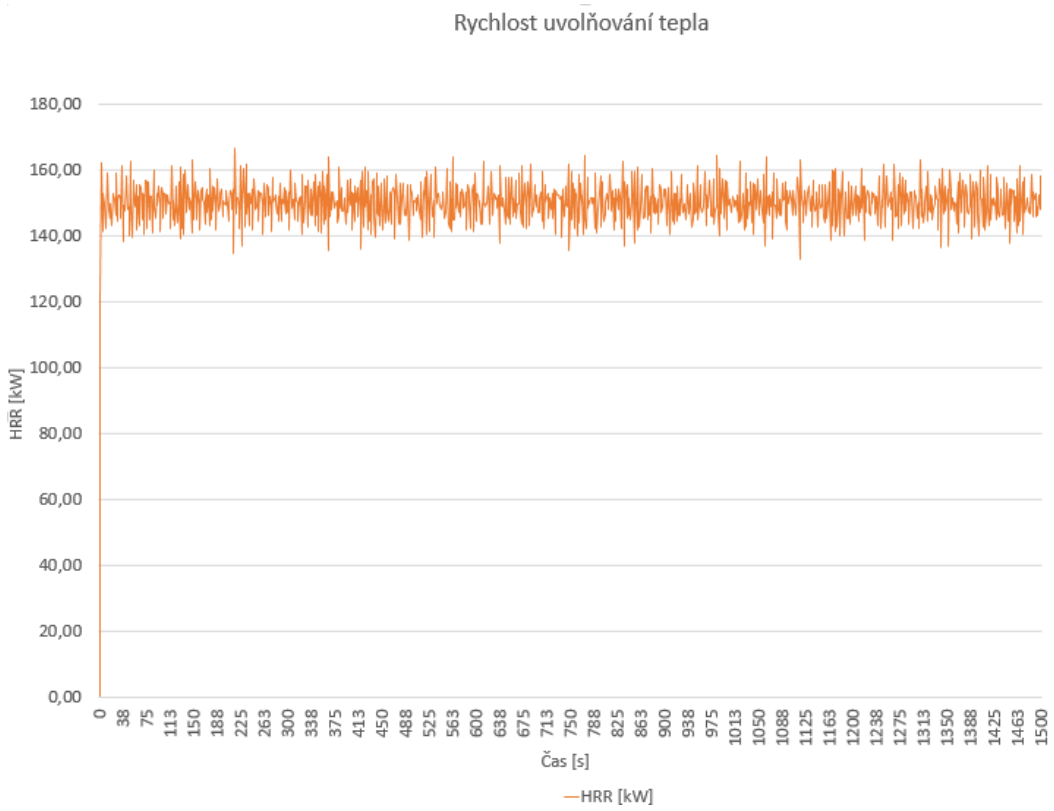
Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 291,4 ^{o}C.



Obrázek 5.4: Průběh teplot na termočláncích

Na následujícím obrázku byl proveden výpočet modelu M6 s jemnou sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,05 x 0,05 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 89 856 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

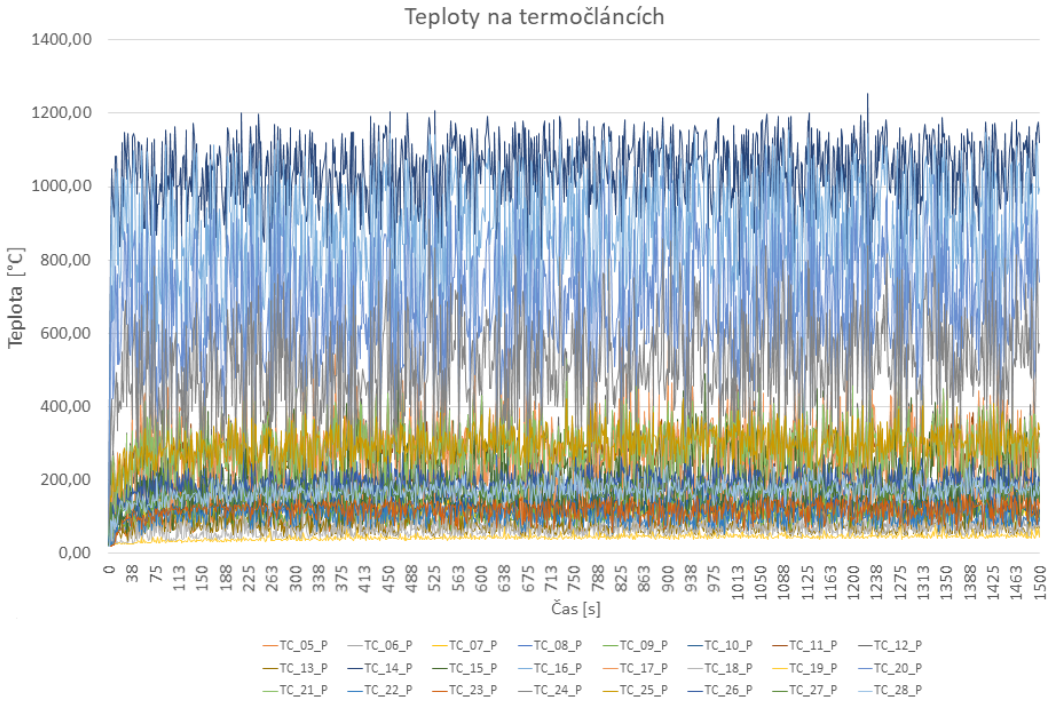
Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla na obrázku č. 5.5 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 5.6. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 166,60 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 150,13 kW.



Obrázek 5.5: Průběh rychlosti uvolňování tepla

Na následujícím obrázku byl proveden výpočet modelu M6 s jemnou sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,05 x 0,05 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 89 856 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel na následujících grafech. Model M6 má čtyřikrát více kontrolních objemů a výpočetní čas trval přibližně čtyřikrát déle, takže z původních šesti hodin na dvanáct hodin.

Lze pozorovat vysoký počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 5.6. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 314,3 ^{o}C.
Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 273,3 ^{o}C.



Obrázek 5.6:

Zjistilo se, že ani s nejemnější sítí o velikosti 0,1 x 0,05 x 0,05 m nelze dobře popsat změny ve výsledcích virtuálních modelů s pozměněnými hodnotami kinetických konstant hemicelulózy, celulózy a ligninu. Změny hodnot konstant se pohybují desetitisícinách a ovlivní výslednou teplotu materiálu jen velmi málo i při různém složení štěpků v OSB desce. V tabulce je uvedeno porovnání hodnot teplot na termočláncích provedených numerických modelů.

ČAS	ZMĚŘENÁ	M1 HRUBA	M2 BEZ PYROLYZY	M3 PYROLYZA OSB	M4 PYROLYZA OSB POČ. 300 °C	M5 NA ČÁSTI OSB	M6 JEMNA	M7 ZMĚNA TTCH	M8 RAMPA
minuta	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]	θ [°C]
0	29,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
5	40,6	299,2	283,4	283,4	283,4	283,4	283,5	269,2	286,2
10	54,1	312,4	274,8	274,8	274,8	274,8	270,6	261,1	277,6
15	110,9	244,5	298,6	298,6	298,6	298,6	288,7	283,7	301,6
20	127,2	319,5	302,9	302,9	302,9	302,9	278,6	287,8	306,0
25	142,5	307,2	296,5	296,5	296,5	296,5	286,1	281,7	299,5
SUMA ∑	8576,0	30068,5	28950,0	28950,0	28950,0	28950,0	27183,4	27503,5	29239,3
ARITMETICKÝ PRŮMĚR $\bar{x}$	84,9	297,7	286,6	286,6	286,6	286,6	269,1	272,3	289,5
ROZPTYL σ^2	1653,2	1270,7	881,0	881,0	881,0	881,0	965,9	790,1	899,7
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA σ	40,7	35,6	29,7	29,7	29,7	29,7	31,1	28,1	30,0
VARIAČNÍ KOEFICIENT v_x	47,9	12,0	10,4	10,4	10,4	10,4	11,5	10,3	10,4

Obrázek 5.7: Hodnoty zprůměrovaných teplot numerických modelů

Změny ve výsledných hodnotách by se výrazněji projevili při jemnější síti například 0,001 x 0,001 x 0,001 metrů. V takovém případě by však výpočtový čas byl náročný na výkon počítače. Výpočet s takto jemnou sítí by mohl trvat v řádu měsíců i déle v závislosti na výkonu počítače. Na tom však už pracuje odvětví na odlišné koleji a to vývoj kvantového počítače, který teoreticky dokáže ve stejný čas počítat mnohonásobně více rovnic než běžný počítač.

6. Budoucí práce v problematice

Samotné programovací či modelování simulací v numerických modelech pomocí CFD je problematika, kterou si lze po letech praxe a pokusných výpočtů osvojit. Nicméně omezením je současná technika. I když jsou dnešní počítače výkonnější než kdy předtím a neustále se vyvíjí, stále jsou výpočty závislé na jedné veličině - čas.

Čas je veličina, nad kterou se uvažuje při všech činnostech a tvorba výpočetních modelů není výjimkou spíše zásadou. Kvůli času se stále více přikláníme ke zjednodušování vstupních dat a optimalizaci kontrolních objemů. Optimalizace a zjednodušení zajistí rychlejší výsledky, dřívější predikci a závěry a tudíž snazší aplikaci.

Hodnoty vstupních dat, které s optimalizovanou sítí ovlivní výpočet velmi nepatrně nebo spíše vůbec, by bylo možné zaznamenat s ještě jemnější sítí. V takovém případě by však výpočtový čas byl velmi dlouhý a náročný na výkon počítače. Na tom však už pracuje odvětví na odlišné koleji a to vývoj kvantového počítače, který laicky vysvětleno, dokáže ve stejný čas počítat mnohonásobně více rovnic než běžný počítač.

Každý kvantový počítač využívá tři základní jevy z kvantového prostoru: superpozici, provázanost a interferenci. Princip superpozice je v mikrosvětě důsledné uplatňován. Objekty mikrosvěta mohou být ve více stavech naráz a teprve v okamžiku měření se realizuje jeden z možných stavů, který je výsledkem tohoto měření. [31]

Když zaostříme na zkoumané materiály na bázi dřeva lze dostupnými zkoušecími zařízeními a dle různých zdrojů dojít k závěru, že zuhelnatělý ablátor neboli tepelný štít na povrchu dřeva je nejúčinnější tepelně stínící materiál pro širokou škálu podmínek ohřevu. Tuhá uhlíkatá vrstva uhlíku, která se tvoří na vnějším povrchu materiálu během hoření je schopna odolat velmi vysokým teplotám.[36] Při počátečním odhořívání povrchu dřeva je značné množství celkového tepelného příkonu na povrchu dřeva vyzařováno do prostoru jako tepelná energie.[37] Kromě toho plyny generované v zóně pyrolýzy zuhelnatělého ablátoru absorbují energii zvýšenou teplotou a chemickými reakcemi během toho co se plyny snaží proniknout porézní vrstvou zuhelnatělé vrstvy.[38]

Prostup pyrolytických plynů přes zuhelnatělou vrstvu je jedním z aspektů ablátoru o které je známo relativně málo. Není znám rozsah chemických reakcí a množství absorbované energie těmito chemickými reakcemi. Ačkoli bylo provedeno mnoho výzkumů o proudění tekutin a plynů prostřednictvím pórů.[39]

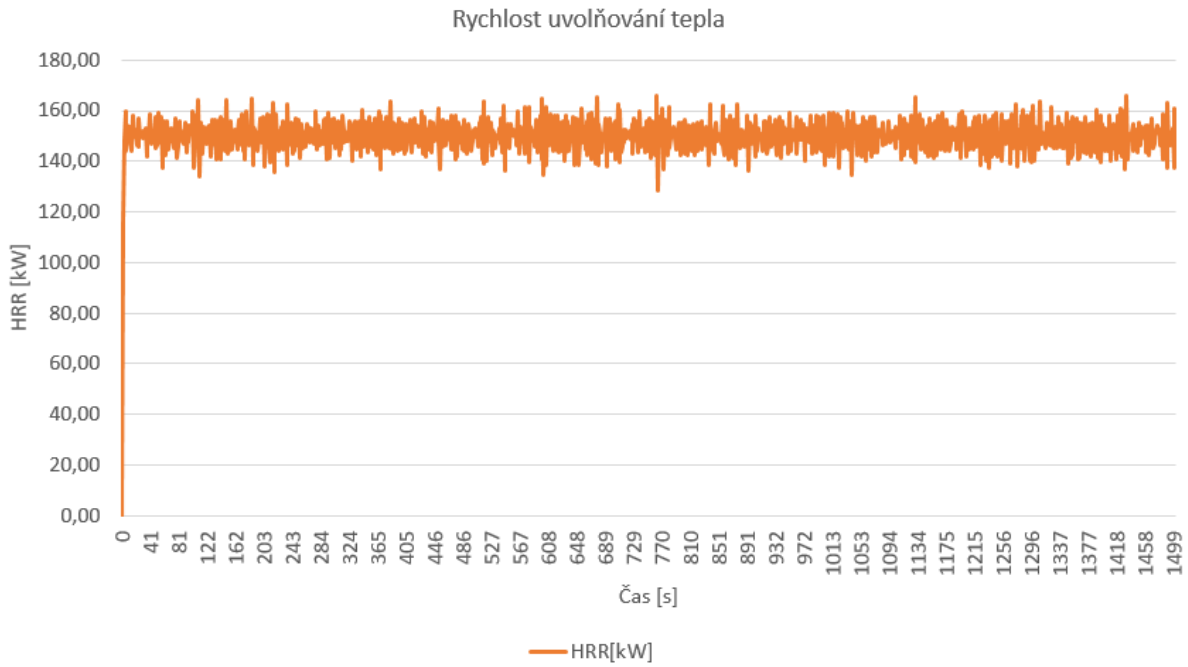
Neschopnost předpovědět tvorbu kouře je zvláště významná pro materiály, které splňují kritéria rychlosti uvolňování tepla podle ISO 9705. Toto je významné pro další zlepšování modelování rychlosti uvolňování hoření materiálů.[39]

M7 - Model odhořívání OSB - změna TTCH součinitelů OSB

Vstupní podmínky modelu M7 byly změněny v tepelně technických charakteristikách OSB desky. Z původní hodnoty SPECIFIC HEAT, což je měrná tepelná kapacita, se její hodnota navýšila z 1,0 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ na 1,5 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Součinitel tepelné vodivosti CONDUCTIVITY byla hodnota změněna z 0,1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ na 0,18 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Hodnota hustoty DENSITY byla navýšena ze 700 $kg \cdot m^{-3}$ na 800 $kg \cdot m^{-3}$. Hodnota spalného tepla HEAT OF COMBUSTION zůstala zachována.

MATL ID='OSB',
SPECIFIC_HEAT=1.5,
CONDUCTIVITY=0.18,
DENSITY=800.0,

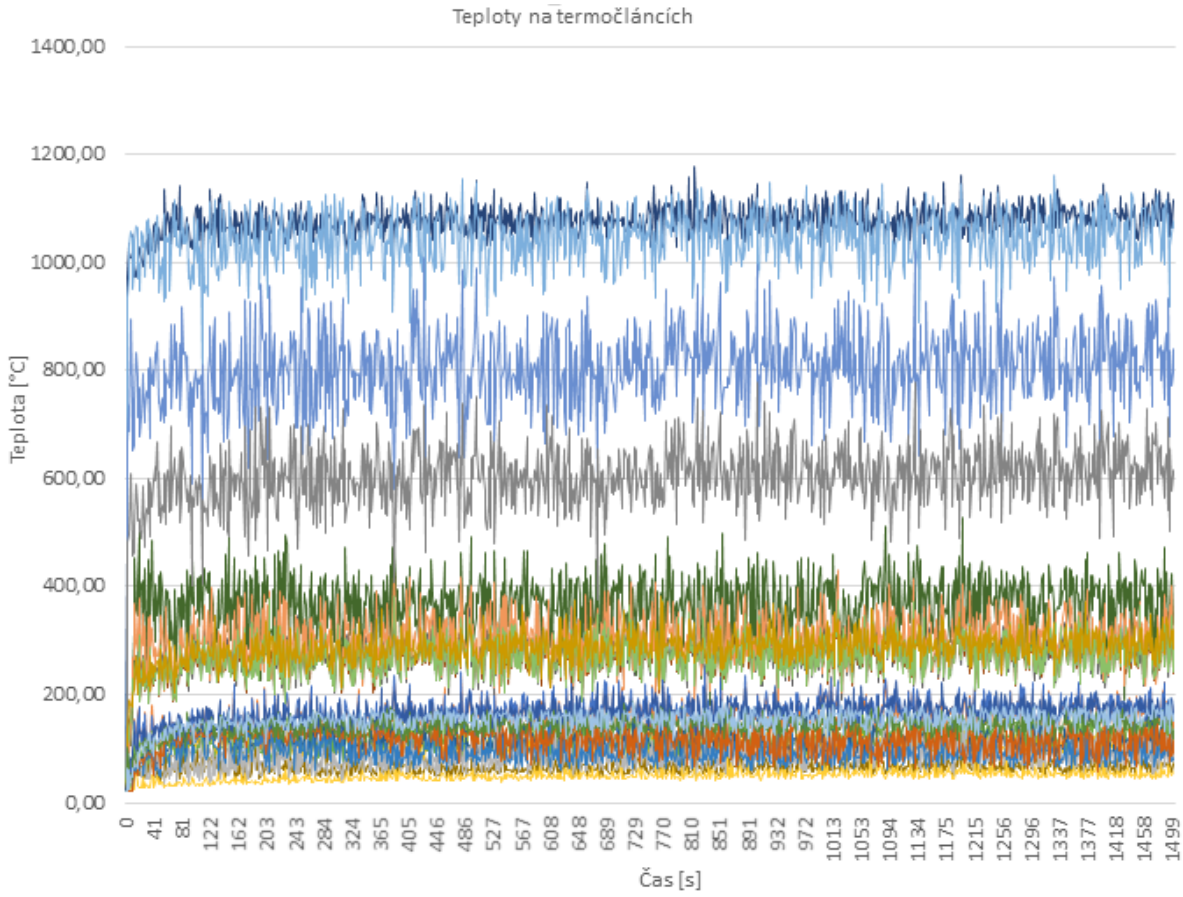
HEAT_OF_COMBUSTION=21700.0,
N_REACTIONS=1,
N_S=1.0,
A=1.56E14,
E=1.71333E6/



Obrázek 6.1: Průběh rychlosti uvolňování tepla M7

Byl proveden výpočet modelu M7 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování teplana obrázku č. 6.1 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 6.2. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 169,3 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 157,5 kW.



Obrázek 6.2: Teploty na termočláncích M7

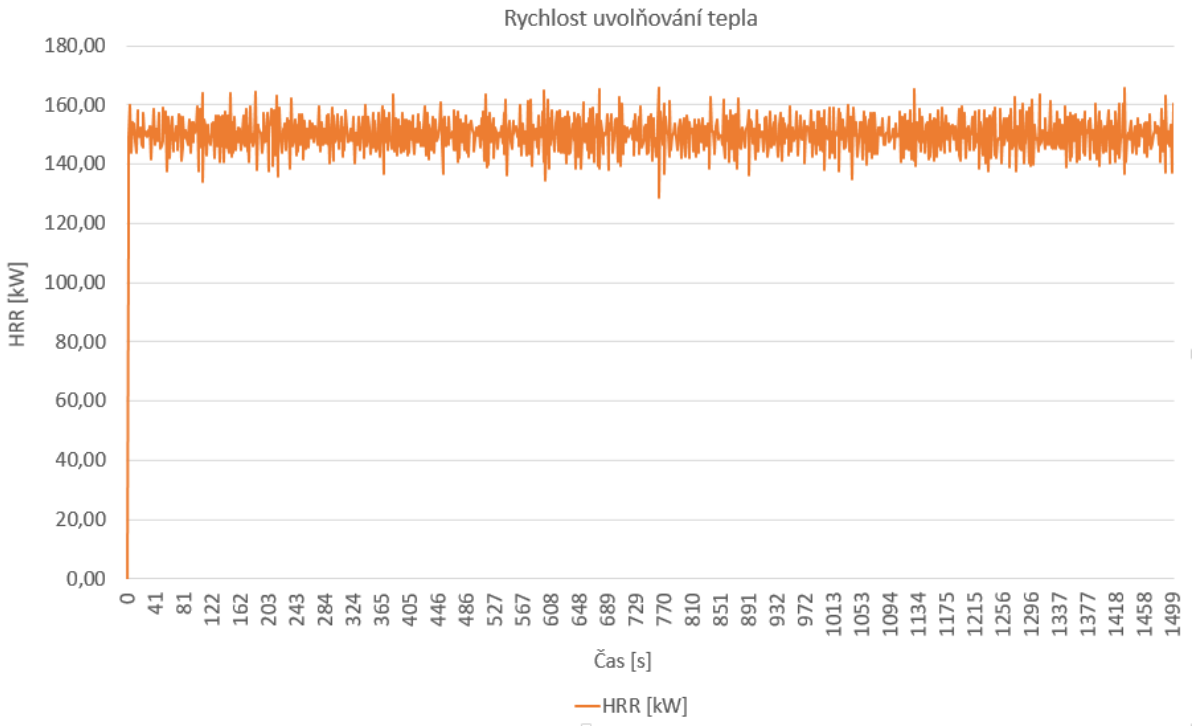
Byl proveden výpočet modelu M7 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel na následujících grafech.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 6.2. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 306,6 ^{o}C.
Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 276,9 ^{o}C.

M8 - Model odhořívání OSB se součinitelem tepelné vodivosti klesajícím s teplotou

Pro teplotní rampy, na rozdíl od ramp časových, je parametr F skutečná fyzikální veličina, ne jen zlomek nějakého jiného množství. Pokud se tedy použije CONDUCTIVITY_RAMP, neměla by existovat žádná hodnota dané teploty vodivosti. Pro hodnoty teploty T pod a nad daným rozsahem, FDS převezme konstantní hodnotu rovnou prvnímu nebo poslednímu zadanému F. Hustotu DENSITY materiálu nelze v FDS ovládat pomocí funkce RAMP.[40]
MATL ID='OSB',
SPECIFIC_HEAT=1.0,
CONDUCTIVITY_RAMP='k_OSB',
DENSITY=700.0,

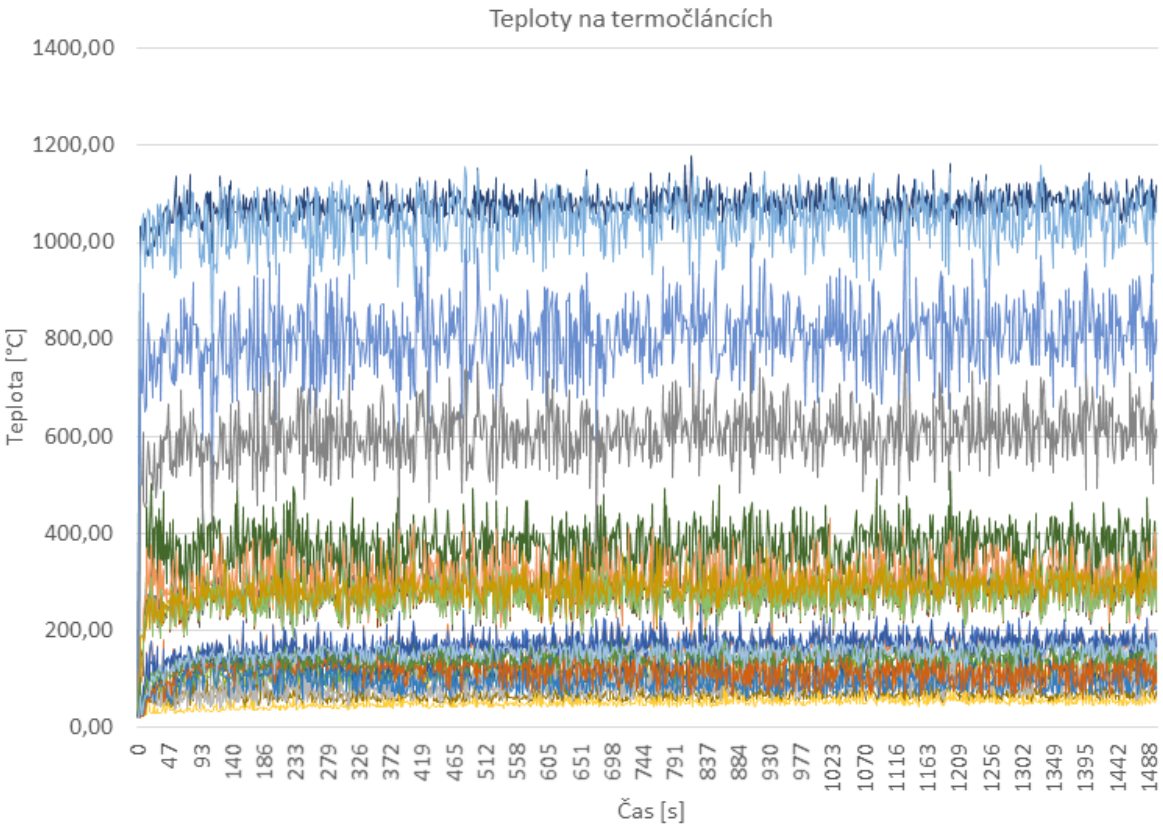
HEAT_OF_COMBUSTION=21700.0/
RAMP ID='k_OSB', T=0, F=1.0 /
RAMP ID='k_OSB', T=20, F=1.0 /
RAMP ID='k_OSB', T=200, F=0.714 /
RAMP ID='k_OSB', T=375, F=0.571 /
RAMP ID='k_OSB', T=900, F=0.571 /
RAMP ID='k_OSB', T=1200, F=0.48 /
RAMP ID='k_OSB', T=1500, F=0.4 /



Obrázek 6.3: Průběh rychlosti uvolňování tepla M8

Byl proveden výpočet modelu M8 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data rychlosti uvolňování tepla HRR v jednotkách kW do souboru Excel.

Lze pozorovat nízký počet peaků v grafu pro rychlost uvolňování tepla na obrázku č. 6.3 i v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 6.4. Maximem grafu pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 166 kW. Medián hodnot pro křivku rychlosti uvolňování tepla je hodnota 152,3 kW.



Obrázek 6.4: Teploty na termočláncích M8

Byl proveden výpočet modelu M8 se sítí s velikostí kontrolního objemu 0,1 x 0,1 x 0,1 metru. Ve výpočetním prostoru RCT bylo 22 464 kontrolních objemů. Jak probíhaly výpočty v každé jednotlivé buňce prostoru, program FDS vygeneroval spočítaná data teploty θ v jednotkách ^{o}C do souboru Excel na následujících grafech.

Lze pozorovat vyšší počet peaků v grafu pro nasnímané teploty termočlánky pod OSB deskou na obrázku č. 6.4. Maximem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 326,0 ^{o}C.
Minimem zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 20,0 ^{o}C. Medián zprůměrovaných teplot termočlánků je hodnota 294,4 ^{o}C.

Výsledky dvou numerických modelů se změnou v tepelně technických parametrech OSB desky vykazují zřejmé změny hodnot teplot a rychlosti uvolňování tepla. Vstupní hodnoty však neodpovídají skutečnosti provedeného experimentu. Cílem pokusů M7 a M8 bylo předvést, že změny hodnot tepelně technických charakteristik výrazněji ovlivní výsledné teploty snímané termočlánky i rychlost uvolňování tepla.

Literatura

[1] Kučera P., Pezdová Z., Základy matematického modelování požáru. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství; 2010.

[2] Kučera P., Kaiser R., Pavlík T., Pokorný J., Požární inženýrství: dynamika požáru. Edice Spektrum; 2009

[3] Balog K, Kvarčák M. Dynamika požáru. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství; 1999.

[4] ČSN EN 13501-2, Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb–Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení. Praha: Český normalizační institut; 2017

[5] Kupilík V., Stavební konstrukce z požárního hlediska. Grada Publishing as; 2006

[6] Böhm M., Reisner J., Bomba J., Materiály na bázi dřeva; 2012

[7] ČSN EN 1-1, Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí-Část 1-1: Obecná pravidla-Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: Český normalizační institut; 2006

[8] Šlesaríková B., Vlastnosti kompozitních materiálů na bázi dřeva; 2015

[9] Kuklík P., Kuklíková A.. Navrhování dřevěných konstrukcí. Český svaz stavebních inženýrů; 1997.

[10] ČSN ISO Tuhá paliva–Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti. Český normalizační institut, Praha; 1999.

[11] ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti-Část 1: Základní požadavky. Praha: ÚNMZ; 2013.

[12] Ahrenfeldt J., Knoef H., Handbook biomass gasification. The Netherlands: BTG biomass technology group; 2005

[13] van Swaaij WP, van den Aarsen FG, Bridgwater AV, Heesink AB. A Review of Biomass Gasification (A report to the European Community, DGXII JOULE Programme); 1994

[14] Kubíček J., FSI–OTJEZ T. Vlastnosti biopaliv ve vztahu k jejich spalování a zplyňování. InSborník přednášek z konference Energie z biomasy I [online], Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství; 2003.

[15] Klass DL., Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals. Elsevier; 1998

[16] Grønli, M.G., A theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass; 1996

[17] Murínová M. Energetické využití biomasy; 2012

[18] McGrattan K., Miles S., Modeling fires using computational fluid dynamics (CFD). InSFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer, New York, NY; 2016

[19] Merci B., Beji T., Fluid mechanics aspects of fire and smoke dynamics in enclosures. CRC press; 2016

[20] Yeoh G.H., Yuen K.K., Computational fluid dynamics in fire engineering: theory, modelling and practice. Butterworth-Heinemann; 2009.

[21] Chung T.J., Computational fluid dynamics. Cambridge university press; 2010.

[22] Versteeg H.K., Malalasekera W., An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson education; 2007.

[23] Blaheta R. Matematické modelování a metoda konečných prvků. Výukový materiál dostupný z http://mi21. vsb. cz. Ostrava; 2012.

[24] Pokorný M, Hejtmánek P, Najmanová H. Virtuální CFD model pro Room Corner Test.

[25] Alauddin Z.A., Lahijani P., Mohammadi M., Mohamed A.R., Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 2010

[26] Brebu M., Vasile C., Thermal degradation of lignin - a review. Cellulose Chemistry & Technology; 2010

[27] Forest Products Laboratory (US). Wood handbook: Wood as an engineering material. The Laboratory; 1987.

[28] Jacques Bourgois, Marie-Claude Bartholin, and Ren_e Guyonnet. Thermal treatment of

wood: analysis of the obtained product. Wood Science and Technology; 1989.

[29] Colomba Di Blasi. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass

pyrolysis. Progress in energy and combustion science; 2008.

[30] Di Blasi C., Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Progress in energy and combustion science; 2008

[31] Sadhukhan A.K., Gupta P., Goyal T., Saha R.K., Modelling of pyrolysis of coal-biomass blends using thermogravimetric analysis. Bioresource technology; 2008

[32] Kim J., Kim K.H., Kwon E.E., Enhanced thermal cracking of VOCs evolved from the thermal degradation of lignin using CO2. Energy; 2016

[33] Martin A., Boyd I., Simulation of pyrolysis gas within a thermal protection system. In40th Thermophysics Conference; 2008

[34] Dente M., Bozzano G., Faravelli T., Marongiu A., Pierucci S., Ranzi E., Kinetic modelling of pyrolysis processes in gas and condensed phase. Advances in chemical engineering; 2007

[35] Faix O., Meier D., Fortmann I., Thermal degradation products of wood. Holz als Roh-und Werkstoff.;1990

[36] Šmak M., Straka B., Development of new types of timber structures based on theoretical analysis and their real behaviour. Wood Research; 2014

[37] Kačíková D, Kačík F. Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene; 2011.

[38] Hofbauer H., Biomass gasification - a promising route for the future. In16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA; 2004

[39] Song P., Cao Z., Fu S., Fang Z., Wu Q., Ye J., Thermal degradation and flame retardancy properties of ABS/lignin: Effects of lignin content and reactive compatibilization. Thermochimica acta; 2011

[40] Fabian F., Kluiber Z., Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění. Prospektrum; 1998.